

Pour la Science

■ POUR LA

# SCIENCE

**AOÛT 1998**

édition française de

**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

**La dépression**

**Les fermes  
à crevettes**

**Prospection  
et gravité**

**La défibrillation**

**Les ordinateurs  
quantiques**

**Le passé d'un désert**

**Les lasers à un seul atome**

Canada \$ 8,75

# Les quasars



**BLOC-NOTES**

de Didier Nordon

5

**TRIBUNE DES LECTEURS**

6



**JEU-CONCOURS**

**Gestion de ressources**

par Pierre Tougne

7



**POINT DE VUE**

**Évaluer les professeurs**

par Alain Milon

9



**PRÉSENCE DE L'HISTOIRE**

**L'histoire des boissons alcoolisées**

par Bert Vallee

10



**SCIENCE ET ÉCONOMIE**

**La «loi» de l'offre et de la demande**

par Bernard Guerrien et Francisco Vergara

15



**SCIENCE ET GASTRONOMIE**

**Entre le demi et le magnum**

par Hervé This

17



**PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES**

20

- L'or des musulmans ■ Un vieux pluviomètre
- Une pépinière de planètes? ■ De vrais dinosaures, avec de vraies plumes ■ Le jeu des quatre coins ■ Foies fractals
- Sursauts lointains ■ Du nouveau pour nos poumons ■ En visite
- La prolifération nucléaire



**VISIONS MATHÉMATIQUES**

**La conjecture du soufflet**

par Ian Stewart

98



**SAVOIR TECHNIQUE**

**Le bang sonique**

par François Coulouvrat

100



**ANALYSES DE LIVRES**

102

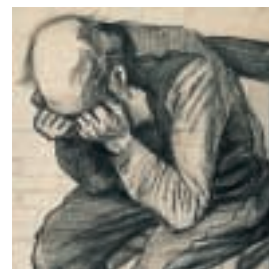
- Les insectes associés aux peupliers, sous la direction d'André Delplanque
- La fin tragique des dinosaures, de Walter Alvarez
- Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Biogéochimie et écologie des eaux continentales et littorales, de François Ramade
- La guerre du tabac, de Michel de Pracontal
- On the Surface of Things, de Felice Frankel et George Whiteside

**La neurobiologie de la dépression**

32

par Charles Nemeroff

Une meilleure compréhension des bases biologiques de cette maladie, souvent fatale, devrait conduire à de nouveaux traitements.



**Les lasers à un seul atome**

42

par Michael Field et Kuyngwon An

Ce nouveau type de laser maîtrise l'énergie des atomes. Il révèle comment la lumière et la matière interagissent.



**Un regard nouveau sur les quasars**

48

par Michael Disney

Des observations du télescope spatial *Hubble* explorent la nature et l'origine des quasars, ces mystérieuses centrales d'énergie cosmiques.



**Le Yémen désertique : une ancienne région humide**

54

par Anne-Marie Lézine

Il y a 8 500 ans, alimentés par des pluies de mousson particulièrement abondantes, de grands lacs se sont formés dans ce qui est aujourd'hui le désert intérieur du Yémen.



## Calcul quantique avec des molécules

par Neil Gershenfeld  
et Isaac Chuang

Les techniques de résonance magnétique nucléaire transforment les molécules des liquides en ordinateurs aux performances hors du commun.

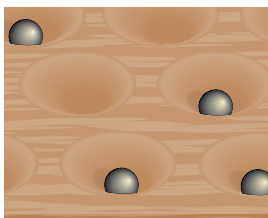


60

## Les lois nouvelles de l'information quantique

par Jean-Paul Delahaye

Principe de non-duplication, téléportation, cryptographie inviolable, codes correcteurs, parallélisme illimité : l'informatique quantique est née.



66

## Aquaculture des crevettes et environnement

par Claude Boyd et Jason Clay

De nouvelles méthodes d'aquaculture des crevettes réduisent les pollutions associées, accroissent les profits et rendent cette activité durable.



74

## La défibrillation : l'étincelle de vie 82

par Mickey Eisenberg

Depuis 50 ans, les médecins utilisent l'électricité pour relancer le cœur ; ils comprennent mieux aujourd'hui comment utiliser les défibrillateurs.



## La gradiométrie gravitationnelle 92

par Robin Bell

Un appareil de mesure mis au point pour le guidage des sous-marins permet l'établissement de cartes géologiques précises.



## Plaidoyer pour la théorie

Nous vivons une révolution : l'informatique quantique (voir *Calcul quantique avec des molécules* et *Les lois nouvelles de l'informatique quantique*, pages 60 à 72). Le sujet est né d'un rêve théorique et, à ce titre, suscite quelques réflexions sur la réorientation didactique actuelle prônant une redécouverte « personnelle » des lois de la physique à partir du concret.

Nous a-t-on assez raconté ces belles histoires de l'Oncle Paul où un futur génie – exemple typique Pascal – retrouvait « tout seul », à 10 ans, l'intégralité des éléments d'Euclide (et miraculeusement... dans le même ordre). Affabulations et sornettes. Il n'empêche, le sphinx de la déraison ressuscite périodiquement sous le masque d'un scientifiquement correct temporaire : l'enfant, l'adolescent, l'étudiant devraient « redécouvrir » les lois naturelles.

Il n'est évidemment pas mauvais d'encourager la démarche inductive fondée sur l'expérience. Les connaissances sont acquises moins rapidement, mais, prêchent les propagandistes, elles sont mieux assimilées. Reconnaissons que la physique des collisions est bellement illustrée par la pétanque et que la trajectoire de la boule de bowling pose des problèmes de mécanique instructifs.

Parallèlement, un argument de poids est avancé : les débutants suivraient la même démarche que les scientifiques qui déduisent les lois des observations.

Est-ce indubitable ? Nombre de découvertes modernes sont nées de déductions logiques de chercheurs éduqués loin des paillasses. L'astrophysicien Chandrasekhar n'avait jamais collé son œil à un télescope ; pourtant, il a trouvé, par une réflexion théorique, que les étoiles de grande masse devaient s'effondrer en ce que l'on dénommera un trou noir.

L'enseignement français incite plus à la déduction qu'à l'induction. Soit. N'est-il pas des domaines où cette caractéristique, aujourd'hui vilipendée, a ses avantages, en physique quantique par exemple ? Les déductions logiques forcent notre compréhension d'un réel quantique qui ne sera jamais familier ; là le formalisme aide à assimiler les règles contre-intuitives du fonctionnement de l'invisible. Nous pouvons tirer parti des qualités de notre enseignement actuel.

Philippe BOULANGER

## Favorable incompétence

**D**ans sa jeunesse, Stendhal aime les sciences. Mais il en est dégoûté par des professeurs incapables de lui expliquer pourquoi moins multiplié par moins fait plus. Stendhal soupçonne ses professeurs de ne pas l'avoir su eux-mêmes. Par esprit de corps, nous ne le suivrons pas sur ce point. Le plus probable est qu'ils étaient mauvais pédagogues. Faisons alors une expérience de pensée. Supposons qu'ils aient été bons pédagogues et aient mieux réussi à se faire comprendre du futur Stendhal. Ce dernier – qui sait ? – aurait peut-être poursuivi des études de sciences, s'en serait satisfait, serait devenu ingénieur et – là encore, qui sait ? – un ingénieur moyen, ne laissant aucune œuvre notable derrière lui. Ceux qui n'aiment pas l'écrivain Stendhal ne s'effraieront pas de ce scénario, mais les autres y verront une catastrophe évitée. Et évitée grâce à qui ? Grâce aux mauvais professeurs !

Quant à Flaubert, imaginons qu'il ne se soit pas ennuyé en classe. (« Me voici revenu au collège où j'ai l'honneur de m'embêter au superlatif »). La colère énorme qui, toute sa vie, l'a accompagné et a nourri son œuvre, cette colère inextinguible ne serait peut-être pas née, et Flaubert n'aurait pas eu la puissance littéraire qu'on lui connaît. Sans professeurs ennuyeux, pas d'œuvre de Flaubert.

Les bons professeurs suscitent, chez certains élèves, une admiration génératrice de grandes et belles vocations. Bravo, c'est fort bien, l'éloge qu'on fait de ces professeurs est mérité. Ne soyons pas

injustes pour autant avec les mauvais professeurs. La jeunesse a une capacité immense à s'insurger, et trouve là une richesse. Par réaction d'hostilité, peut-être les mauvais professeurs ont-ils suscité plus de grandes et belles vocations que les bons n'en ont suscitées par imitation...

## La géologie du pouvoir

**L'**homme qui a le pouvoir vous reçoit. Plein d'espoir, plein d'anxiété, vous déposez sur son bureau surchargé de papiers votre demande de subvention, votre manuscrit, votre programme de recherche ou votre synopsis de film.

Les quelques minutes que l'homme vous accorde suffisent : sous vos yeux, le précieux fruit de vos veilles est recouvert par un papier urgent furtivement apporté par un secrétaire fébrile ; ce papier, à son tour, est recouvert par une note prise en vitesse par l'homme de pouvoir qui – sans cesser de vous écouter – répond à un coup de fil essentiel ; cette note à son tour est recouverte par un dossier auquel votre interlocuteur repense soudain et que – sans cesser de vous porter attention – il replace en haut de la pile pour le traiter dès votre départ.

De sédimentation en sédimentation, vous n'êtes pas sorti d'audience que votre projet appartient déjà aux couches anciennes sur le bureau de votre protecteur. Cette géologie progresse à une vitesse astronomique ! Pourtant, tout comme la géologie des géologues, elle fait sentir la dramatique brièveté de la vie humaine :

si par bonheur votre projet réémerge un jour, mon Dieu, que vous aurez eu le temps de vieillir...

## Allergo-Logique

**À** la question « Aimez-vous les mathématiques ? » un élève de Quatrième répond de la façon suivante : « Les maths c'est logique, donc c'est simple si on est logique, mais le problème, c'est que je suis compliqué ment logique, donc je fais difficile quand il y a plus simple, et non le contraire, ce qui n'est pas logique. Mais j'aime quand même les maths. »

Excessivement compliquée, cette phrase est donc parfaitement adaptée à son objet. Elle fait mieux qu'exprimer ce que son auteur veut dire : elle est ce qu'il veut dire. L'autoréférence n'est pas toujours source de paradoxes.

## Constatation éditoriale

**I**l s'agit d'une constatation faite par un éditeur. Certes, les chiffres avancés par les éditeurs sont toujours sujets à caution, mais, si on ne devait pas faire confiance à ses informateurs, il n'y aurait plus aucune science possible. Mon informateur est l'éditeur Hubert Nyssen. Quant à l'information, la voici.

Si un roman, publié en France, connaît une belle carrière normale – ni un bide ni un tabac, des critiques élogieuses dans la presse, mais pas de matraquage publicitaire ou d'engouement forcené du public – quel chiffre de vente moyen l'auteur et l'éditeur peuvent-ils espérer ? Réponse : 3000 exemplaires.

Ayant observé une relative constance de ce chiffre au fil du temps, H. Nyssen a demandé à des confrères allemands et espagnols quand, pour leur part, ils considéraient qu'un roman publié par eux avait fait une bonne carrière standard. Réponse : à 3000 ventes.

Soit : l'Espagne, l'Allemagne sont, en taille, comparables à la France. Mais l'éditeur a posé la question à des confrères américains. Réponse obtenue : 3 000 exemplaires. Même question aux confrères islandais. Leur réponse : 3 000 exemplaires. Qu'un pays, donc, ait 250 000 habitants comme l'Islande, ou mille fois plus comme les États-Unis, le nombre d'acheteurs est le même.

Quelqu'un comprend-il pourquoi ?

## Table rase

**L**a science n'a pas de mémoire. Il est exceptionnel qu'un article vieux de plus de dix ans soit cité, exceptionnel qu'un classique (Newton, Einstein ou autre) soit relu dans le texte par un chercheur, etc. Cette situation est gênante tant sur le plan culturel (la science a du mal à se percevoir dans son historicité) que sur le plan de l'efficacité : les redécouvertes ne sont pas rares, et il est probable que beaucoup de bonnes idées sont définitivement perdues.

Ce reproche est souvent fait à la science. Si juste soit-il, il se heurte à un contre argument, exprimé par le mathématicien anglais Littlewood (1885-1977). Littlewood incitait ses élèves à ne pas étudier de trop près les articles publiés sur un problème ouvert. « Si vos prédécesseurs n'ont pas réussi à le résoudre, c'est sans doute qu'ils avaient essayé une mauvaise méthode. » Et, bien sûr, la meilleure façon de ne pas se laisser influencer ou parasiter par ce qui existe et qui a échoué, c'est de l'ignorer.

La philosophie n'est pas habituée à résoudre les problèmes qui se posent à elle. Qu'ils soient posés depuis longtemps n'est donc pas une inhibition pour le philosophe. La science, elle, est habituée à résoudre (ou croire résoudre) les problèmes. Avoir conscience des échecs des prédécesseurs est inhibant. Conclusion : si l'on n'avait pas séché si longtemps sur le théorème de Fermat, il aurait été démontré plus tôt.

## Krachs et physique

L'article *Peut-on prévoir les krachs?* (voir *Pour la Science*, juin 1998) discute essentiellement le débat franco-français entre mathématiciens et économistes qui a émergé suite au krach boursier d'octobre 1997. Les travaux de nombreux physiciens hors de l'hexagone éclairent ce débat. Dès août 1997, avec M. Ausloos, nous avons prédit un «krach» pour l'automne 1997, avec une précision de trois semaines. Au vu de l'euphorie que l'on observait depuis 1994 sur les marchés boursiers, nous avons repris l'hypothèse du point critique avancé par Didier Sornette, de l'Université de Nice, pour étudier l'évolution d'indices boursiers classiques. La seule variante au modèle provient du type ou classe de transition de phase qui a été utilisé. Techniquement, nous avons recouru à une transition du type Kosterlitz-Thouless, c'est-à-dire une transition où l'on observe des comportements de foule ou des structures en vortex. La réussite de cette prévision n'est certes pas suffisante pour lever complètement le débat de prédictibilité d'un krach boursier, mais elle conforte l'idée de D. Sornette.

Faudra-t-il attendre 100 krachs pour clore ce débat? D'autant plus que le marché réagit toujours face à des modèles prédictifs, les rendant moins efficaces, parfois inutiles. En fait, le débat scientifique ne se situe pas vraiment sur la prédictibilité du krach, mais sur l'universalité de comportements physiques dans la nature. Benoît Mandelbrot suggère (voir *Pour la Science*, décembre 1997) l'existence de tels comportements «universels» dans l'évolution des cours de bourse. Cela permet alors aux physiciens d'imaginer et de rêver à des modèles boursiers.

Nicolas VANDEWALLE, Liège

## Érosion côtière

Roland Paskoff soulève le débat du coût et de l'efficacité d'équipements destinés à s'opposer à l'érosion marine (voir *La mer envahit la Petite Camargue...*, *Pour la Science*, mai 1998). Ce problème débouche sur des choix de gestion à fortes implications sociales et économiques. D'où la nécessité d'émettre un diagnostic précis et d'en étudier les implications dans l'espace et dans le temps. D'abord, le repli de la côte de 2,5 kilomètres en 200 ans est exagéré. D'autres calculs, à partir du traitement numérique de photos aériennes, montrent que le littoral a reculé de 300 mètres depuis 1944. Comme le retrait s'est accéléré depuis les grands aménagements

hydroélectriques de l'après-guerre, il n'a pu excéder 1,5 kilomètre depuis 200 ans.

Ensuite, la Petite Camargue ne peut pas être isolée du delta occidental du Rhône. Ainsi, reculer localement la côte sur 1,5 kilomètre modifierait profondément les dynamiques côtières. Piégeant les sédiments, le golfe formé priverait de toute défense l'exploitation salinière d'Aigues-Mortes et ouvrirait un nouveau front sensible sur sa face Est. Le cours inférieur du Petit Rhône serait aussi touché, et la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer serait plus isolée et vulnérable.

Les épis et la digue frontale, construits depuis 10 à 15 ans, ont stabilisé la côte pendant sept à dix ans et l'érosion, qui reprend aujourd'hui, est plus lente, avec des «coups d'accélérateur» localisés pendant des tempêtes exceptionnelles. Les équipements de défense ont probablement été mal conçus et dégradent le paysage, mais ils n'aggravent pas la situation. En outre, la côte n'est composée que de pâturages et, surtout, de riches terrains de chasse. Ses utilisateurs considèrent que la beauté du paysage est secondaire.

Les 20 dernières années ont montré qu'il est vain de s'opposer de front à la puissance de la mer. Mais le maintien de l'activité salinière, du paysage et des traditions qu'elle a créées mérite qu'on réfléchisse. On pourrait par exemple reculer la côte en prenant appui sur d'anciens cordons littoraux, quelques centaines de mètres en arrière, que l'on renforcerait par la création d'un nouveau profil de plage en pente douce.

M. PROVANSAL et F. SABATIER,  
Université Aix-Marseille 1

## Réponse de Roland Paskoff

Pour la mesure du repli du littoral de la Petite Camargue, tout dépend de l'endroit où l'on se trouve. Immédiatement au droit de l'embouchure du Petit Rhône, le recul a probablement bien été de l'ordre de 2,5 kilomètres comme on peut le déduire sur la carte de Cassini, levée à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, qui fait apparaître une large protubérance aujourd'hui disparue. Plus à l'Ouest, il a en effet été moindre.

Il est vrai qu'il convient de ne pas isoler la Petite Camargue de la partie occidentale du delta du Rhône et de la replacer dans son compartiment sédimentaire qui va de l'embouchure du Petit Rhône à la pointe de l'Espiguette. Mais il est sans aucun doute exagéré de dire que, si on renonçait à défendre contre l'érosion marine le secteur du Grand Radeau et des Quatre-Maries, il se formerait un golfe qui piégerait des sédiments. On observerait plutôt, au moins dans un premier temps, une augmentation du transfert sédimentaire côtier qui ralentirait peut-être l'érosion le long des marais salants d'Aigues-Mortes.

mais qui accélérerait à coup sûr l'ensablement à la pointe de l'Espiguette. Quant aux Saintes-Maries-de-la-Mer, situées à peu de chose près en tête d'un autre compartiment sédimentaire où le transit littoral se fait vers l'Est, elles ne devraient pas être affectées par l'érosion plus qu'elles ne le sont aujourd'hui.

## Écrans et projecteurs

L'article d'Alan Sobel sur *Les écrans plats* (voir *Pour la Science*, juillet 1998) indique que les projecteurs seraient «de résolution si médiocre qu'on n'envisage pas leur utilisation pour la télévision haute définition». Il existe pourtant plusieurs modèles qui admettent la TVHD avec des couleurs naturelles que ne possèdent pas les écrans à plasma. Et que dire des projecteurs à valves de lumière de la Société JVC-Hugues, qui possèdent au minimum quatre millions de pixels pour une luminosité de 1 000 lumens, avec 2 à 6 mètres de diagonale?

Pascal BOUSSARD, Augy

## Réponse d'Alan Sobel

On trouve effectivement des projecteurs dont les images ont une résolution compatible avec la TVHD et dont les couleurs sont aussi bonnes, voire meilleures. En outre, plusieurs modèles projettent des images de taille variable. Enfin, ces appareils, accompagnés d'un écran roulé, sont plus facilement transportables qu'un grand écran plat (bien que le poids d'un projecteur de bonne qualité puisse excéder celui d'un grand écran à plasma). Toutefois, tous les projecteurs rencontrent des problèmes de luminosité de l'image : une image de haute résolution de 1,5 mètre de diagonale est généralement beaucoup plus pâle lorsqu'elle est projetée que la même image affichée sur un écran à plasma. On doit donc utiliser ces appareils dans des locaux au moins partiellement obscurcis. L'utilisation d'un écran directionnel augmente la brillance de l'image, mais réduit considérablement l'angle de vue. Dans les projecteurs à valves de lumière, on résout ce problème par l'utilisation de sources lumineuses plus puissantes et plus coûteuses, mais l'accroissement de la brillance des images projetées se fait généralement au détriment de leur résolution.

Une nouvelle tendance émerge : des projecteurs pour les ordinateurs de bureau. À l'aide de valves de lumière réfléchissantes de 1,2 à 3,6 centimètres de diagonale, ces projecteurs, moins épais que les projecteurs tri-tubes équivalents et moins coûteux que les écrans à cristaux liquides, produisent des images de 48 à 72 centimètres de diagonale.

# JEU-CONCOURS N° 50

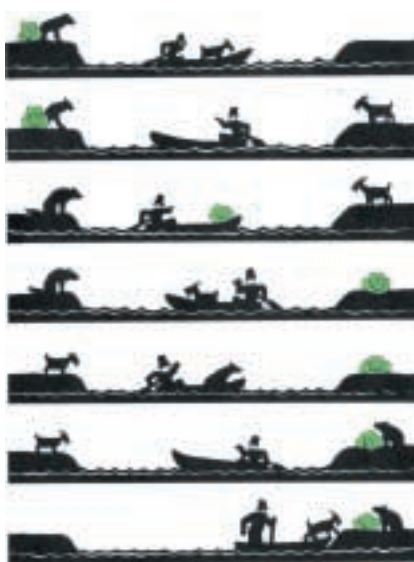
PIERRE TOUGNE

## Gestion de ressources

Les problèmes de traversées sont des classiques des jeux mathématiques qui remontent à l'Antiquité. En voici deux variantes modernes qui ne font pas appel aux mathématiques proprement dites, mais où la logique permet d'éviter de se fourvoyer dans des impasses. La première variante met en scène trois ouvriers Émile, Firmin, Gérard et une caisse à outils au sommet d'un immeuble en construction. Il n'y a pas d'escalier pour redescendre et ils ne disposent que d'un monte-charge rudimentaire formé de deux paniers reliés par un câble passant sur une poulie. Un panier ne peut contenir qu'au plus deux personnes ou une personne et la caisse à outils. La descente se fait naturellement, le panier le plus lourd l'emportant sans qu'il soit possible ni à ceux qui sont dans le panier ni aux autres d'aider cette descente. Enfin si le panier qui descend a sur l'autre un excédent de poids de plus de dix kilogrammes, toute personne qui s'y trouverait se blesserait à l'arrivée, en revanche la caisse supporte sans dommages l'atterrissage. Si Émile pèse 85 kilogrammes, Firmin 50, Gérard 40 et la caisse à outils 30, au départ un panier étant au sommet et l'autre au sol, combien de manœuvres au minimum des

paniers devront effectuer les trois ouvriers pour rejoindre sains et saufs le sol avec la caisse à outils et comment?

La deuxième variante concerne un quatuor qui doit donner un concert dans 17 minutes de l'autre côté d'un pont qu'ils doivent traverser. Vous devez les aider à traverser. Il fait nuit et ils n'ont qu'une



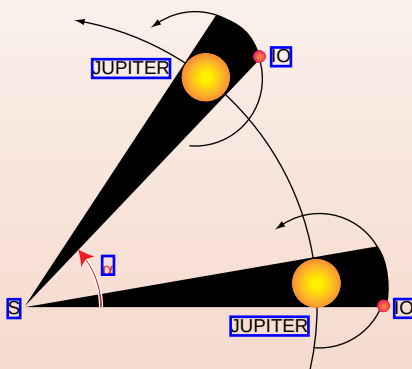
lampe torche. Un maximum de deux personnes peut traverser simultanément le pont. Toute personne ou couple traversant le pont doit avoir la lampe et celle-ci ne peut être lancée d'un bord à l'autre. Chaque membre du quatuor a une vitesse différente et lorsqu'ils traversent en couple, c'est le plus lent qui détermine le temps de passage. Si André met une minute pour traverser, Bertrand deux minutes, Claude cinq minutes et Daniel dix minutes, pouvez-vous trouver les deux façons de faire traverser le pont au quatuor pour commencer le concert à l'heure (c'est-à-dire au plus 17 minutes après)? Ce problème bien que déroutant ne comporte aucune astuce et suppose seulement une gestion précise des possibilités. La rumeur dit que ce problème est posé à l'embauche chez Microsoft et qu'une réponse en moins de cinq minutes est attendue!

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'août 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 48

Soit  $\alpha$  l'angle dont a tourné Jupiter autour du Soleil entre deux éclipses successives, c'est-à-dire lorsque Io pénètre dans le cône d'ombre de Jupiter (voir la figure). Io a alors tourné d'un angle  $2\pi + \alpha$  autour de Jupiter, car Io tourne autour de Jupiter dans le même sens que Jupiter autour du Soleil, ce que j'avais omis de préciser comme me l'ont fait remarquer de nombreux lecteurs. Si  $T$  est la période de l'éclipse et  $T_i$ ,  $T_j$  les périodes de révolution d'Io autour de Jupiter et celle de Jupiter autour du Soleil, alors  $\alpha = 2\pi T/T_j$  et  $2\pi + \alpha = 2\pi T/T_i$  dont on déduit  $1/T = 1/T_i - 1/T_j$ . Le retard dans la date de l'éclipse au voisinage de la conjonction calculée par rapport à la date de l'éclipse au voisinage de l'opposition s'explique par le temps que met la lumière à parvenir à l'observateur, car sa vitesse de propagation est finie. La

distance supplémentaire à parcourir par la lumière entre l'opposition et la conjonction étant de  $3.10^8$  kilomètres, on en déduit que la vitesse de la lumière est de l'ordre de  $3.10^8/(16.5 \times 60) \approx 303\,000$  kilomètres par seconde. De nombreux lecteurs ont reconnu dans ce jeu-concours l'observation faite en 1676 par



l'astronome danois Ole Roëmer à l'Observatoire de Paris qui est considérée dans les livres d'histoire de l'astronomie comme la première mesure de la vitesse de la lumière. En fait, comme me le fait remarquer un lecteur, historiquement Roëmer a annoncé en septembre 1676 à l'Académie des sciences que l'éclipse de Io prévue le 9 novembre se produirait avec dix minutes de retard (calculé entre la quadrature et la conjonction). Cette prédiction se révéla exacte et quelques semaines plus tard Roëmer donnait son explication théorique du phénomène : «la lumière ne s'établit pas instantanément dans tout l'espace comme de grands penseurs l'avaient prétendu, elle met un certain temps pour aller d'un point à un autre.» Il n'a jamais évalué cette vitesse, ce qui n'enlève rien à son extraordinaire découverte pour l'époque.



# Évaluer les professeurs?

ALAIN MILON

*Distinguons des enseignants-chercheurs et des chercheurs enseignants.*

**C**omment aider les professeurs d'Université à se passionner pour l'enseignement qu'ils doivent dispenser? Comment éviter que certains ne deviennent des mandarins incontestables, assoupis à vie dans leur chaire? Les événements de mai 1968 datent de 30 ans, mais ces questions iconoclastes restent d'actualité. Leur examen conduit à des réflexions sur les missions des enseignants-chercheurs et sur le fonctionnement de l'Université française : éternel recommencement!

Le titre d'enseignant-chercheur signale une double mission de recherche et d'activité pédagogique. L'évaluation de l'activité de recherche s'effectue selon des critères communs à tous les chercheurs : publications, invitations à des colloques, obtention de financements non récurrents (contrats industriels, européens ou avec des organisations caritatives). En cas d'évaluation négative, les sanctions sont assez rapides : diminution des crédits de recherche et des financements pour des collaborateurs, notamment des allocations de thèse pour des étudiants...

En revanche, l'Université n'évalue pas les activités pédagogiques. Aucune sanction ne guette le mauvais enseignant et aucun avantage n'attend l'enseignant consciencieux, novateur et compétent. L'évolution des carrières, notamment la nomination des professeurs, se fonde quasi exclusivement sur les résultats de recherche : n'y a-t-il pas de quoi irriter ou décourager ceux qui investissent une grande partie de leur temps et de leurs efforts pour leurs étudiants?

**P**ourquoi cette situation? Il y a peut-être, d'abord, une question d'autorité : qui peut oser se placer plus haut que ceux qui sont en haut de la pyramide de l'enseignement? Toutefois, il y a certainement une difficulté technique : la qualité pédagogique est difficile à mesurer, et plus encore la comparaison des deux sortes d'activités de recherche et d'enseignement. Combien de cours brillants vaut une publication dans une grande revue scien-

tifique, tels *Nature* ou *Science*? Cette raison technique s'ajoute à une dévaluation de la partie enseignement de notre métier d'enseignant-chercheur : ne parle-t-on pas de «charge d'enseignement» ou de «faire ses heures»?

Aujourd'hui, bien que près de la moitié des enseignants n'aient plus de réelle activité de recherche, il est tabou d'admettre ouvertement que les enseignants-chercheurs ne peuvent plus remplir correctement leurs deux missions d'enseignement et de recherche : l'enseignant de l'Université cumule les fonctions d'enseignant, d'inspecteur général (définition des programmes, habilitations des diplômés), de conseiller d'orientation (accueil des étudiants, lettres de recommandations), d'administrateur (participation à d'innombrables conseils d'Université), et aussi, tour à tour, de surveillant, secrétaire et technicien de laboratoire, faute d'un soutien technico-administratif approprié. En raison de la croissance du nombre d'étudiants, depuis le début des années 1980, et de la profonde évolution de leurs attentes, ces diverses responsabilités se sont considérablement alourdies.

**A**dmettons enfin officiellement la coexistence deux métiers pour les personnels de l'enseignement supérieur : les «enseignants du supérieur» et les «chercheurs-enseignants». Ces deux missions doivent pouvoir être choisies librement après un début de carrière commun. Ces deux métiers doivent avoir un égal statut, et les possibilités de carrière doivent être comparables. Le «chercheur-enseignant», effectuant un service d'enseignement moins lourd qu'aujourd'hui, dispenserait un enseignement de spécialité, pointu et actuel, et sa recherche devrait être excellente, selon les critères des grands organismes de recherche tels que le CNRS. L'«enseignant du supérieur» maintiendrait un contact avec la recherche, mais il se consacrerait surtout à l'enseignement, à l'innovation pédagogique ; il rédigerait des articles et des ouvrages pédagogiques (domaine où la

France est très faible) et serait chargé de l'administration des enseignements.

Seule la clarification de ces deux missions permettra de définir et d'utiliser des critères d'évaluation pédagogique : le candidat «chercheur-enseignant» sera évalué sur ses travaux de recherche comme c'est le cas à ce jour, tandis que le candidat «enseignant du supérieur» sera évalué sur des critères pédagogiques.

Quels seraient alors les critères d'évaluation pédagogique? L'évaluation de tous les enseignements par les étudiants est souhaitable, mais l'institution devra se souvenir que son organisation prend du temps, requiert des moyens en secrétariat (création de fiches d'évaluation, saisie des données et analyse statistique). En outre, les données recueillies doivent être interprétées : les étudiants n'apprécient parfois la qualité d'un enseignement que bien après l'avoir suivi.

L'évaluation par les pairs, méthode universellement admise en recherche, compléterait l'évaluation par les étudiants, ne serait-ce que pour analyser et tirer les conséquences de cette dernière. Les commissions de spécialistes locales, qui sont composées d'enseignants-chercheurs, de chercheurs et de membres d'Universités voisines, pourraient se charger de l'évaluation pédagogique des candidats à une promotion. Elles devraient aussi évaluer les personnels nouvellement nommés, afin de les assister et de les conseiller dans leurs premières années d'enseignement.

Quand on envisage l'évaluation des enseignants-chercheurs, on ne peut faire l'impasse sur l'évaluation de l'Université : la moindre prise de décision impose aujourd'hui des dizaines de réunions, entre des conseils successifs qui s'emboîtent comme des poupées gigognes et dont chacun peut défaire ce qu'a décidé le précédent. L'Université française sera-t-elle un jour capable de ne plus gaspiller l'énergie et la créativité de ses membres?

Alain MILON est professeur de biochimie à l'Université Paul Sabatier de Toulouse.



# L'histoire des boissons alcoolisées

BERT VALLEE

*La bière, le vin et l'hydromel naturels étaient nutritifs, soulageaient les douleurs et amélioraient l'humeur. La distillation a permis la fabrication d'alcool pur, plus dangereux.*

L'alcool facilite les contacts sociaux, accompagne les dîners raffinés, protège des maladies cardio-vasculaires, mais il fait aussi des ravages. Le rôle de l'alcool dans les civilisations occidentales a évolué, mais les boissons alcoolisées ont toujours été populaires, surtout quand l'eau était souvent contaminée.

En 1777, le roi de Prusse Frédéric II craint que sa stratégie économique ne soit menacée par des importations de café et déclare : « Sa Majesté est consternée par l'augmentation de la consommation de café et par tout l'argent que dépensent ses sujets pour s'en procurer et qui, ainsi, quitte le pays. Tout le monde boit du café ; cela doit cesser. Le Roi a été élevé à la bière, ainsi que ses ancêtres et ses officiers. De nombreuses batailles ont été livrées et gagnées par des soldats nourris de bière, et le Roi ne croit pas que des soldats qui boivent du café sauraient endurer l'épreuve d'une nouvelle guerre. »

Si un chef d'État préconisait aujourd'hui la consommation d'alcool plutôt que celle de café, surtout dans l'armée, on le traiterait de fou. Pourtant, Frédéric II décrit la bière comme s'il s'agissait de lait maternel parce que l'alcool a joué un rôle sanitaire en Occident jusqu'à la construction, au

xix<sup>e</sup> siècle, des réseaux d'alimentation en eau potable.

Depuis des millions d'années, la nature fabrique des aliments contenant de l'alcool : les levures tirent leur énergie du sucre, et l'alcool éthylique est un sous-produit de ce métabolisme. Ainsi la fermentation des fruits produit de l'alcool. Si l'espèce humaine possède un gène codant une enzyme qui dégrade l'alcool, c'est sans doute qu'au cours de l'évolution, les hommes ont absorbé suffisamment d'alcool pour avoir besoin de le métaboliser. Cependant, la consommation n'est devenue régulière qu'il y a 10 000 ans environ.

Un jour, à la fin de l'Âge de pierre, un gourmand goûte du miel qui a été oublié et qui a fermenté. Il apprécie les effets de cet alcool léger et recommence l'expérience. Avec ses congénères, il codifie la méthode qui donne de l'hydromel ou du vin, à partir de miel, de dattes ou de sève. La recette est simple : laisser la substance sucrée fermenter spontanément.

La bière, qui s'élabore à partir de céréales, apparaît sans doute après le développement de l'agriculture. Les deltas fertiles d'Égypte et de Mésopotamie produisent beaucoup de blé et d'orge, et les céréales sont alors la base de l'alimentation des paysans, des ouvriers et des soldats. Un jour, un curieux goûte de l'eau où ont fermenté des céréales ; il y trouve un goût pétillant plaisant ; la bière est née. Il y a environ 6 000 ans, les Égyptiens et les Babyloniens boivent déjà des bières faites de blé et d'orge. Des recettes de bière sont même inscrites sur des tablettes d'argile babyloniennes vieilles de plus de 6 000 ans.

Le vin semble plus tardif, car les jus de fruits sauvages ne sont généralement pas assez sucrés pour donner du vin. Il n'apparaîtra que lorsque les premiers agriculteurs d'Arménie sélectionneront, puis cultiveront les raisins les plus

**1. LA CIVILISATION OCCIDENTALE, pendant presque 10 000 ans, a trouvé dans le vin et dans la bière des sources de nourriture et de boisson : en l'absence d'eau potable, les boissons alcoolisées étaient les seules boissons saines.**

sucrés : ils inventeront la viticulture, il y a quelque 8 000 ans.

Une fois l'agriculture née, elle garantit un approvisionnement plus régulier de nourriture et favorise la constitution de villages. Toutefois, l'approvisionnement en eau potable reste difficile. Combien de nos ancêtres sont-ils morts d'avoir étanché leur soif avec de l'eau polluée par les déchets de l'agglomération ? Vraisemblablement beaucoup, si l'on se réfère aux bilans des épidémies de dysenterie et de maladies infectieuses qui sont, aujourd'hui encore, dues à la consommation d'eau contaminée. En outre, le manque d'eau potable a longtemps empêché les voyages au long cours. Ainsi, Christophe Colomb voyage avec du vin et de la bière dans les soutes. En 1620, les passagers du *Mayflower* accostent, car leurs réserves de bière sont épuisées.

### ALCOOL SAIN OU EAU CONTAMINÉE?

L'Ancien Testament et le Nouveau ne mentionnent pas l'eau comme une boisson répandue. De même, peu de textes grecs y font référence, mais certains soulignent la qualité de l'eau des sources de montagne. Selon Hippocrate, les eaux de source, celles des puits profonds et les eaux de pluie recueillies dans des citernes sont saines. Les Anciens, vraisemblablement après quelques expériences tragiques, comprennent que beaucoup de leurs réserves d'eau sont impropres à la consommation.

Au contraire, la bière et le vin ne contiennent pas d'agents pathogènes. L'alcool a des propriétés antiseptiques, et le vin et la bière sont naturellement acides, de sorte que, lorsque les boissons alcoolisées sont diluées avec de l'eau polluée, la plupart des agents pathogènes sont détruits. Le vin et la bière (et non pas l'eau) ont longtemps étanché la soif des peuples de l'Ancien Monde.

L'évolution a été différente en Orient où, depuis plus de 2 000 ans, on fait bouillir l'eau pour faire du thé, obtenant ainsi des boissons potables non alcoolisées. De plus, près de la moitié des Asiatiques ne fabriquent pas l'une des enzymes nécessaire au métabolisme de l'alcool, ce qui rend la consommation d'alcool très désagréable. C'est une des raisons pour lesquelles la bière et le vin se sont surtout implantés dans les sociétés occidentales. Ils étaient alors peu alcoolisés, contenaient beaucoup d'acide acétique et d'autres acides organiques produits au cours de la fermentation. La plupart de ces vins anciens rebuteraient le gourmet moderne ; ils tenaient plus du vinaigre à léger goût de cidre qu'à des grands crus.

Les boissons alcoolisées complétaient sans doute la ration calorique des peuples, apportant des vitamines et des sels minéraux. Elles aidaient les consommateurs à supporter la dureté et l'ennui de la vie quotidienne. Enfin, l'alcool était le seul remède contre la douleur. D'après le *Livre des proverbes* : « Donne de l'alcool fort à celui qui va périr, et du vin à celui qui a le cœur lourd. Laisse-le boire et oublier sa pauvreté et sa misère ». Selon Hippocrate, les boissons alcoolisées soulagent toutes les maladies chroniques ou aiguës connues à l'époque, et l'école de médecine d'Alexandrie encourage l'utilisation de l'alcool à des fins thérapeutiques.

Les boissons des civilisations antiques sont peu alcoolisées, mais on connaît déjà leurs effets néfastes sur le comportement.

On recommande une consommation modérée chez les Hébreux, chez les Grecs et chez les Romains. L'Ancien Testament désapprouve l'ivresse, et le prophète Ezra et ses successeurs intègrent le vin dans les rituels hébreux quotidiens, peut-être pour modérer la surconsommation d'alcool : ils instaurent ainsi une forme de prohibition sous couvert de principes religieux.

Dans le Nouveau Testament, Jésus transforme l'eau en vin, reconnaissant probablement la supériorité de l'alcool sur l'eau, souvent polluée. Ses disciples ne condamnent pas l'usage du vin, mais prêchent la modération pour éviter les abus. Saint Paul et ses disciples considèrent le vin comme un don de Dieu, car il a des vertus thérapeutiques et tranquillisantes, soulageant la douleur et l'anxiété.



2. LA DISTILLATION fournit les premières boissons très alcoolisées. Cette colonne à distiller fut publiée en 1500, dans le premier ouvrage consacré à la distillation, *Liber de arte distillandi*, ou l'art de distiller. L'auteur, Hieronymus Brunschwig, y décrivait les vertus de l'alcool distillé : « Il donne de belles couleurs, du courage et une bonne mémoire [...] Il tue les poux et les puces. »

SCIENCE & MÉTIERS



**3. DIVERSES ASSOCIATIONS**, notamment aux Etats-Unis, se sont battues, à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle, contre la consommation d'alcool. « Le secours des femmes », dont les membres sont photographiés ici, vantait les mérites du « remède en or » du docteur Leslie Keeley, un prétendu remède contre l'alcoolisme. Les sels d'or étaient supposés supprimer la dépendance vis-à-vis de l'alcool. En fait, Keeley était bien plus doué pour le commerce que pour la biochimie ; il mourut en 1900, et son traitement avec lui. Les associations de femmes assuraient un soutien social aux alcooliques qui voulaient cesser de boire.

Traditionnellement, la bière est la boisson du peuple, et le vin de raisin celle des personnes aisées. Toutefois, le vin se répand parmi le peuple romain, après un siècle d'expansion des vignobles, car les bénéfices tirés de la vigne sont supérieurs à ceux du blé. L'expansion s'achève vers -30, quand l'augmentation de la production fait baisser les prix au point que le vin est presque gratuit. Puis la viticulture romaine décline en même temps que l'empire. L'Eglise catholique et ses monastères héritent des vignobles et les développent afin de fabriquer le vin de messe. Pendant presque 1 300 ans, les plus grands vignobles (et les meilleurs) sont exploités par l'Eglise, qui en tire des bénéfices considérables. Pendant tout le Moyen Âge, le blé est la nourriture de base des paysans, et la bière leur boisson favorite, avec l'hydromel, le vin et le cidre qu'ils produisent eux-mêmes. Malgré les changements de régimes politiques, de religions et de modes de vie, la consommation de bière et de vin reste remarquablement constante.

### L'EAU DE VIE

Après avoir consommé pendant environ 9 000 ans de l'hydromel, de la bière et du vin peu alcoolisés, l'Occident découvre les alcools forts quand la distillation apparaît. Inventée vers 700 par des alchimistes arabes, la distillation modifie la consommation de l'alcool. Les levures produisent de l'alcool, mais à des concentrations inférieures à 16 pour

cent. La distillation abolit cette limite : la température d'ébullition de l'alcool éthylique étant égale à 78 °C, lorsqu'un mélange d'eau et d'alcool bout, la vapeur est enrichie en alcool, plus volatil. La condensation de cette vapeur fournit un liquide dont la concentration en alcool est notablement supérieure à celle du mélange initial.

La méthode arabe se propage dans toute l'Europe, et la distillation du vin commence vers 1100. Le médecin alsacien Hieronymus Brunschwig la décrit, en 1500, dans le *Liber de arte distillandi*, premier livre imprimé consacré à la distillation. À l'époque où cet ouvrage devient célèbre, l'alcool distillé est considéré à la fois comme un aliment, comme un médicament efficace et comme une substance dangereuse. La consommation d'alcool augmente notablement lors des épidémies de peste du XIV<sup>e</sup> siècle. L'alcool n'a aucune efficacité thérapeutique, mais il donne des forces aux malades, soulage leurs douleurs et leur redonne du courage, vertus précieuses pendant ces épidémies qui tuèrent les deux tiers de la population européenne en quelques dizaines d'années.

Puis, pour oublier cette période, les Européens se livrent aux ripailles et aux beuveries. Malgré quelques tentatives des autorités, la consommation d'alcool se poursuit jusqu'au début du XVII<sup>e</sup> siècle, quand le café, le thé et le cacao deviennent des boissons populaires.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Eglise lutte contre la consommation de l'alcool, avec une

efficacité limitée. Pourtant la dysenterie, le choléra et la typhoïde, transmis par l'eau souillée, font jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle presque autant de victimes que la peste. L'eau ne devient une boisson saine en Occident qu'après la découverte du rôle des micro-organismes dans diverses maladies et après la construction de dispositifs de filtration et de traitement des réserves d'eau. Une proportion notable de la population se détourne progressivement de l'alcool, d'une part parce que l'Eglise en condamne l'usage, et, d'autre part parce que l'eau potable est désormais disponible. Enfin, la dépendance vis-à-vis de l'alcool finit par être reconnue comme une maladie.

### LES MALADIES LIÉES À L'ALCOOL

Au XIX<sup>e</sup> siècle, les médecins commencent à appliquer la méthode scientifique à la médecine, classant les symptômes cliniques et étudiant rationnellement les maladies. Deux diplômés de la Faculté de médecine d'Édimbourg, Thomas Trotter et Benjamin Rush, montrent que l'alcoolisme est une maladie chronique potentiellement mortelle. En 1813, Trotter écrit que la consommation régulière et prolongée de liqueurs fortes déclenche des maladies du foie, un amaigrissement et des troubles mentaux. Rush publie, en Amérique, des thèses semblables ; signataire de la Déclaration d'Indépendance, il est une personnalité reconnue ; il proclame que la société américaine est malade de l'alcoolisme, et ce diagnostic aboutit à la prohibition qui dure de 1919 à 1933.

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, l'alcoolisme se révèle être un problème de santé publique. Dans les pays industrialisés, c'est la troisième cause de mortalité « évitable » (après le tabagisme et une mauvaise alimentation) ; plus des deux tiers des personnes ont un membre de leur famille alcoolique et, chaque année, plusieurs milliers d'enfants naissent de mères alcooliques, avec des handicaps physiques et intellectuels.

Pendant des millénaires, des boissons naturellement alcoolisées ont soulagé les hommes de leurs douleurs physiques et morales, sans les rendre malades. En revanche, depuis plus de 1 000 ans et l'invention de la distillation, l'alcool pur fait payer aux sociétés occidentales un lourd tribut.

**Bert VALLEE, membre de l'Académie des sciences américaine, est professeur honoraire à la Faculté de médecine de Harvard.**



# L'histoire des boissons alcoolisées

BERT VALLEE

*La bière, le vin et l'hydromel naturels étaient nutritifs, soulageaient les douleurs et amélioraient l'humeur. La distillation a permis la fabrication d'alcool pur, plus dangereux.*

L'alcool facilite les contacts sociaux, accompagne les dîners raffinés, protège des maladies cardio-vasculaires, mais il fait aussi des ravages. Le rôle de l'alcool dans les civilisations occidentales a évolué, mais les boissons alcoolisées ont toujours été populaires, surtout quand l'eau était souvent contaminée.

En 1777, le roi de Prusse Frédéric II craint que sa stratégie économique ne soit menacée par des importations de café et déclare : « Sa Majesté est consternée par l'augmentation de la consommation de café et par tout l'argent que dépensent ses sujets pour s'en procurer et qui, ainsi, quitte le pays. Tout le monde boit du café ; cela doit cesser. Le Roi a été élevé à la bière, ainsi que ses ancêtres et ses officiers. De nombreuses batailles ont été livrées et gagnées par des soldats nourris de bière, et le Roi ne croit pas que des soldats qui boivent du café sauraient endurer l'épreuve d'une nouvelle guerre. »

Si un chef d'État préconisait aujourd'hui la consommation d'alcool plutôt que celle de café, surtout dans l'armée, on le traiterait de fou. Pourtant, Frédéric II décrit la bière comme s'il s'agissait de lait maternel parce que l'alcool a joué un rôle sanitaire en Occident jusqu'à la construction, au

xix<sup>e</sup> siècle, des réseaux d'alimentation en eau potable.

Depuis des millions d'années, la nature fabrique des aliments contenant de l'alcool : les levures tirent leur énergie du sucre, et l'alcool éthylique est un sous-produit de ce métabolisme. Ainsi la fermentation des fruits produit de l'alcool. Si l'espèce humaine possède un gène codant une enzyme qui dégrade l'alcool, c'est sans doute qu'au cours de l'évolution, les hommes ont absorbé suffisamment d'alcool pour avoir besoin de le métaboliser. Cependant, la consommation n'est devenue régulière qu'il y a 10 000 ans environ.

Un jour, à la fin de l'Âge de pierre, un gourmand goûte du miel qui a été oublié et qui a fermenté. Il apprécie les effets de cet alcool léger et recommence l'expérience. Avec ses congénères, il codifie la méthode qui donne de l'hydromel ou du vin, à partir de miel, de dattes ou de sève. La recette est simple : laisser la substance sucrée fermenter spontanément.

La bière, qui s'élabore à partir de céréales, apparaît sans doute après le développement de l'agriculture. Les deltas fertiles d'Égypte et de Mésopotamie produisent beaucoup de blé et d'orge, et les céréales sont alors la base de l'alimentation des paysans, des ouvriers et des soldats. Un jour, un curieux goûte de l'eau où ont fermenté des céréales ; il y trouve un goût pétillant plaisant ; la bière est née. Il y a environ 6 000 ans, les Égyptiens et les Babyloniens boivent déjà des bières faites de blé et d'orge. Des recettes de bière sont même inscrites sur des tablettes d'argile babyloniennes vieilles de plus de 6 000 ans.

Le vin semble plus tardif, car les jus de fruits sauvages ne sont généralement pas assez sucrés pour donner du vin. Il n'apparaît que lorsque les premiers agriculteurs d'Arménie sélectionnent, puis cultiveront les raisins les plus

**1. LA CIVILISATION OCCIDENTALE, pendant presque 10 000 ans, a trouvé dans le vin et dans la bière des sources de nourriture et de boisson : en l'absence d'eau potable, les boissons alcoolisées étaient les seules boissons saines.**

sucrés : ils inventeront la viticulture, il y a quelque 8 000 ans.

Une fois l'agriculture née, elle garantit un approvisionnement plus régulier de nourriture et favorise la constitution de villages. Toutefois, l'approvisionnement en eau potable reste difficile. Combien de nos ancêtres sont-ils morts d'avoir éteint leur soif avec de l'eau polluée par les déchets de l'agglomération ? Vraisemblablement beaucoup, si l'on se réfère aux bilans des épidémies de dysenterie et de maladies infectieuses qui sont, aujourd'hui encore, dues à la consommation d'eau contaminée. En outre, le manque d'eau potable a longtemps empêché les voyages au long cours. Ainsi, Christophe Colomb voyage avec du vin et de la bière dans les soutes. En 1620, les passagers du *Mayflower* accostent, car leurs réserves de bière sont épuisées.

### ALCOOL SAIN OU EAU CONTAMINÉE?

L'Ancien Testament et le Nouveau ne mentionnent pas l'eau comme une boisson répandue. De même, peu de textes grecs y font référence, mais certains soulignent la qualité de l'eau des sources de montagne. Selon Hippocrate, les eaux de source, celles des puits profonds et les eaux de pluie recueillies dans des citernes sont saines. Les Anciens, vraisemblablement après quelques expériences tragiques, comprennent que beaucoup de leurs réserves d'eau sont impropres à la consommation.

Au contraire, la bière et le vin ne contiennent pas d'agents pathogènes. L'alcool a des propriétés antiseptiques, et le vin et la bière sont naturellement acides, de sorte que, lorsque les boissons alcoolisées sont diluées avec de l'eau polluée, la plupart des agents pathogènes sont détruits. Le vin et la bière (et non pas l'eau) ont longtemps éteint la soif des peuples de l'Ancien Monde.

L'évolution a été différente en Orient où, depuis plus de 2 000 ans, on fait bouillir l'eau pour faire du thé, obtenant ainsi des boissons potables non alcoolisées. De plus, près de la moitié des Asiatiques ne fabriquent pas l'une des enzymes nécessaire au métabolisme de l'alcool, ce qui rend la consommation d'alcool très désagréable. C'est une des raisons pour lesquelles la bière et le vin se sont surtout implantés dans les sociétés occidentales. Ils étaient alors peu alcoolisés, contenaient beaucoup d'acide acétique et d'autres acides organiques produits au cours de la fermentation. La plupart de ces vins anciens rebuteraient le gourmet moderne ; ils tenaient plus du vinaigre à léger goût de cidre qu'à des grands crus.

Les boissons alcoolisées complétaient sans doute la ration calorique des peuples, apportant des vitamines et des sels minéraux. Elles aidaient les consommateurs à supporter la dureté et l'ennui de la vie quotidienne. Enfin, l'alcool était le seul remède contre la douleur. D'après le *Livre des proverbes* : « Donne de l'alcool fort à celui qui va périr, et du vin à celui qui a le cœur lourd. Laisse-le boire et oublier sa pauvreté et sa misère ». Selon Hippocrate, les boissons alcoolisées soulagent toutes les maladies chroniques ou aiguës connues à l'époque, et l'école de médecine d'Alexandrie encourage l'utilisation de l'alcool à des fins thérapeutiques.

Les boissons des civilisations antiques sont peu alcoolisées, mais on connaît déjà leurs effets néfastes sur le comportement.

On recommande une consommation modérée chez les Hébreux, chez les Grecs et chez les Romains. L'Ancien Testament désapprouve l'ivresse, et le prophète Ezra et ses successeurs intègrent le vin dans les rituels hébreux quotidiens, peut-être pour modérer la surconsommation d'alcool : ils instaurent ainsi une forme de prohibition sous couvert de principes religieux.

Dans le Nouveau Testament, Jésus transforme l'eau en vin, reconnaissant probablement la supériorité de l'alcool sur l'eau, souvent polluée. Ses disciples ne condamnent pas l'usage du vin, mais prêchent la modération pour éviter les abus. Saint Paul et ses disciples considèrent le vin comme un don de Dieu, car il a des vertus thérapeutiques et tranquillissantes, soulageant la douleur et l'anxiété.



2. LA DISTILLATION fournit les premières boissons très alcoolisées. Cette colonne à distiller fut publiée en 1500, dans le premier ouvrage consacré à la distillation, *Liber de arte distillandi*, ou l'art de distiller. L'auteur, Hieronymus Brunschwig, y décrivait les vertus de l'alcool distillé : « Il donne de belles couleurs, du courage et une bonne mémoire [...] Il tue les poux et les puces. »



LIBERTY COLLECTION

**3. DIVERSES ASSOCIATIONS, notamment aux Etats-Unis, se sont battues, à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle, contre la consommation d'alcool. «Le secours des femmes», dont les membres sont photographiés ici, vantait les mérites du «remède en or» du docteur Leslie Keeley, un prétendu remède contre l'alcoolisme. Les sels d'or étaient supposés supprimer la dépendance vis-à-vis de l'alcool. En fait, Keeley était bien plus doué pour le commerce que pour la biochimie ; il mourut en 1900, et son traitement avec lui. Les associations de femmes assuraient un soutien social aux alcooliques qui voulaient cesser de boire.**

Traditionnellement, la bière est la boisson du peuple, et le vin de raisin celle des personnes aisées. Toutefois, le vin se répand parmi le peuple romain, après un siècle d'expansion des vignobles, car les bénéfices tirés de la vigne sont supérieurs à ceux du blé. L'expansion s'achève vers -30, quand l'augmentation de la production fait baisser les prix au point que le vin est presque gratuit. Puis la viticulture romaine décline en même temps que l'empire. L'Eglise catholique et ses monastères héritent des vignobles et les développent afin de fabriquer le vin de messe. Pendant presque 1 300 ans, les plus grands vignobles (et les meilleurs) sont exploités par l'Eglise, qui en tire des bénéfices considérables. Pendant tout le Moyen Âge, le blé est la nourriture de base des paysans, et la bière leur boisson favorite, avec l'hydromel, le vin et le cidre qu'ils produisent eux-mêmes. Malgré les changements de régimes politiques, de religions et de modes de vie, la consommation de bière et de vin reste remarquablement constante.

### L'EAU DE VIE

Après avoir consommé pendant environ 9 000 ans de l'hydromel, de la bière et du vin peu alcoolisés, l'Occident découvre les alcools forts quand la distillation apparaît. Inventée vers 700 par des alchimistes arabes, la distillation modifie la consommation de l'alcool. Les levures produisent de l'alcool, mais à des concentrations inférieures à 16 pour

cent. La distillation abolit cette limite : la température d'ébullition de l'alcool éthylique étant égale à 78 °C, lorsqu'un mélange d'eau et d'alcool bout, la vapeur est enrichie en alcool, plus volatil. La condensation de cette vapeur fournit un liquide dont la concentration en alcool est notablement supérieure à celle du mélange initial.

La méthode arabe se propage dans toute l'Europe, et la distillation du vin commence vers 1100. Le médecin alsacien Hieronymus Brunschwig la décrit, en 1500, dans le *Liber de arte distillandi*, premier livre imprimé consacré à la distillation. À l'époque où cet ouvrage devient célèbre, l'alcool distillé est considéré à la fois comme un aliment, comme un médicament efficace et comme une substance dangereuse. La consommation d'alcool augmente notablement lors des épidémies de peste du XIV<sup>e</sup> siècle. L'alcool n'a aucune efficacité thérapeutique, mais il donne des forces aux malades, soulage leurs douleurs et leur redonne du courage, vertus précieuses pendant ces épidémies qui tuèrent les deux tiers de la population européenne en quelques dizaines d'années.

Puis, pour oublier cette période, les Européens se livrent aux ripailles et aux beuveries. Malgré quelques tentatives des autorités, la consommation d'alcool se poursuit jusqu'au début du XVII<sup>e</sup> siècle, quand le café, le thé et le cacao deviennent des boissons populaires.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Eglise lutte contre la consommation de l'alcool, avec une

efficacité limitée. Pourtant la dysenterie, le choléra et la typhoïde, transmis par l'eau souillée, font jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle presque autant de victimes que la peste. L'eau ne devient une boisson saine en Occident qu'après la découverte du rôle des micro-organismes dans diverses maladies et après la construction de dispositifs de filtration et de traitement des réserves d'eau. Une proportion notable de la population se détourne progressivement de l'alcool, d'une part parce que l'Eglise en condamne l'usage, et, d'autre part parce que l'eau potable est désormais disponible. Enfin, la dépendance vis-à-vis de l'alcool finit par être reconnue comme une maladie.

### LES MALADIES LIÉES À L'ALCOOL

Au XIX<sup>e</sup> siècle, les médecins commencent à appliquer la méthode scientifique à la médecine, classant les symptômes cliniques et étudiant rationnellement les maladies. Deux diplômés de la Faculté de médecine d'Édimbourg, Thomas Trotter et Benjamin Rush, montrent que l'alcoolisme est une maladie chronique potentiellement mortelle. En 1813, Trotter écrit que la consommation régulière et prolongée de liqueurs fortes déclenche des maladies du foie, un amaigrissement et des troubles mentaux. Rush publie, en Amérique, des thèses semblables ; signataire de la Déclaration d'Indépendance, il est une personnalité reconnue ; il proclame que la société américaine est malade de l'alcoolisme, et ce diagnostic aboutit à la prohibition qui dure de 1919 à 1933.

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, l'alcoolisme se révèle être un problème de santé publique. Dans les pays industrialisés, c'est la troisième cause de mortalité «évitable» (après le tabagisme et une mauvaise alimentation) ; plus des deux tiers des personnes ont un membre de leur famille alcoolique et, chaque année, plusieurs milliers d'enfants naissent de mères alcooliques, avec des handicaps physiques et intellectuels.

Pendant des millénaires, des boissons naturellement alcoolisées ont soulagé les hommes de leurs douleurs physiques et morales, sans les rendre malades. En revanche, depuis plus de 1 000 ans et l'invention de la distillation, l'alcool pur fait payer aux sociétés occidentales un lourd tribut.

**Bert VALLEE, membre de l'Académie des sciences américaine, est professeur honoraire à la Faculté de médecine de Harvard.**



# La «loi» de l'offre et de la demande

BERNARD GUERRIEN • FRANCISCO VERGARA

*Cette loi d'établissement des prix, prônée par les économies libérales, est modélisée par une organisation centrale des offres et des demandes !*

**Q**uel est le statut de la «loi de l'offre et de la demande»? Plutôt qu'une relation précise entre des variables, cette expression désigne un processus, un mouvement, au statut assez vague : en gros, lorsque la demande d'un bien est supérieure à son offre, son prix monte, dans le cas contraire, il baisse. Quand on cherche à préciser cette «loi», une série de questions surgissent : qu'entend-on exactement par offre et demande d'un bien? Comment l'une et l'autre affectent-elles son prix? Pourquoi celui-ci serait-il unique?

Nous allons voir que, par souci de modélisation, les théoriciens ont élaboré un «modèle de la concurrence parfaite» très éloigné de notre conception habituelle d'une économie de marché où les prix résulteraient du «libre jeu de l'offre et de la demande».

## COMMENT DÉFINIR L'OFFRE ET LA DEMANDE?

L'offre et la demande sont le fait des agents économiques, ménages et entreprises, qui désirent vendre leur travail ou leurs produits et acheter des biens de consommation ou de production. Il ne le peuvent que compte tenu des prix déjà existants. D'où la question : comment s'établissent les prix de départ?

La première réponse est conforme à l'intuition : les prix sont proposés par les agents économiques, du moins par certains d'entre eux, et alors un bien peut avoir provisoirement plusieurs prix.. La dynamique d'établissement du prix résulte d'une succession de rencontres bilatérales, avec, à chaque rencontre, marchandage entre les deux parties. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que toutes les possibilités d'échanges mutuellement avantageux soient épuisées, ce qui entraîne la disparition des différences de prix d'un même bien. Pour que le prix soit ainsi fixé, il faut toutefois supposer que l'information soit très bien diffusée, et cela sans coût.

Le principal problème posé au théoricien par cette approche de type «brownien» (succession de rencontres aléatoires) est que l'issue de ce processus est indéterminé, puisqu'il dépend de paramètres insaisissables – sur le plan mathématique – tels que l'ordre des rencontres des candidats à l'échange et leur aptitude au marchandage.

Pour lever cette indétermination il faut faire appel à des hypothèses supplémentaires. La plus importante d'entre elles consiste à supposer qu'il existe un prix unique par bien et que ce prix est connu de tous. Cette hypothèse élimine ainsi le problème des marchandages bilatéraux, et on peut comptabiliser sans ambiguïté les offres et les demandes à prix donnés, ce qui simplifie énormément l'analyse et confère un contenu aux notions d'offre et de demande ; mais il reste encore à préciser le processus dont la loi de l'offre et de la demande est l'expression. L'option retenue actuellement par les théoriciens s'inspire d'un processus par «tâtonnement» proposé il y a plus d'un siècle par Léon Walras (1834-1910).

## LE TÂTONNEMENT

Walras suppose qu'il existe un «crieur de prix» et que celui-ci regroupe et additionne les offres et les demandes formulées sur la base de prix «criés». On peut alors observer si «la demande est supérieure à l'offre» ou vice versa, et donc donner un contenu à la «loi de l'offre et de la demande» ; mathématiquement, la loi se traduit par un système d'équations où la variation du prix d'un bien est établie en fonction de la différence entre la demande et l'offre.

Cette formulation mathématique n'est applicable que s'il existe une organisation sociale très centralisée, où une instance extérieure aux individus fixe les prix, les en informe, puis regroupe leurs offres et leurs demandes. Paradoxalement, les économistes qui se réfèrent à cette forme d'organisation économique parlent

à son propos «de concurrence parfaite», suggérant ainsi qu'elle représente le marché idéal, où chacun prend sa décision en fonction des seuls prix (donnés). Or l'idée qu'on se fait habituellement du marché – bien vague, il est vrai – est celle d'un système décentralisé, sans entité extérieure «totalisatrice ou totalitaire» qui décide des prix et regroupe les décisions individuelles. Curieux...

Où mène le tâtonnement? On peut *a priori* penser qu'il aboutit, au bout d'un certain temps, à un ensemble de prix dits d'équilibre, qui égalisent l'offre et la demande pour chaque bien. Or, l'étude des équations du modèle – et les simulations effectuées sur ordinateur – montre qu'il n'en est rien : le tâtonnement – qui est, rappelons-le, la version mathématique de la loi de l'offre et de la demande – ne mène généralement pas à l'équilibre ; autrement dit, des prix soumis exclusivement à l'action des offres et des demandes vont évoluer de façon cyclique, ou même chaotique, et ce indéfiniment.

Ce résultat, auquel ne s'attendaient pas les économistes qui ont essayé de donner un contenu précis à la loi de l'offre et de la demande, s'explique par la complexité des interactions des choix individuels. Ainsi, une hausse du prix d'un bien a, à la fois, une répercussion négative sur ceux qui demandent ce bien et une répercussion positive sur ceux qui l'offrent ; le signe de la résultante de ces deux actions opposées peut varier au cours du tâtonnement, en lui imposant un cours irrégulier, et sans fin.

Une conclusion se dégage de tout ceci : dès qu'on cherche à préciser la loi de l'offre et de la demande, on constate que cette «loi» est à l'origine d'un processus complexe, dont les conséquences sont éloignées de celles que suggère l'intuition. Contrairement à ce qu'on attend habituellement d'elle, la modélisation mathématique ne conduit pas à la certitude, mais plutôt au doute ; mieux vaut, cependant, ce doute que des affirmations péremptoires, simplistes, et non fondées.



# Entre le demi et le magnum

HERVE THIS

*Le Champagne vieillit plus vite dans les petites bouteilles.*

**L**e magnum de Champagne est un seigneur : les amateurs lui reconnaissent des qualités qu'ils ne trouvent pas dans les demi bouteilles. Ont-ils raison ? Le Champagne conservé couché évoluerait mieux parce que le bouchon serait humidifié en permanence et qu'ainsi il conserverait mieux ses propriétés hermétiques. Est-ce exact ? Au Centre interprofessionnel des vins de Champagne (CIVC), Michel Valade, Isabelle Tribaut-Sohier et Félix Bocquet ont examiné ces questions de conservation. Leurs expérimentations... débouchent sur une compréhension nouvelle du rôle des bouchons lors du vieillissement du vin.

Le Champagne est un vin qui mousse, par opposition à tous ces vins « tranquilles », dont les bulles sont presque un défaut. Qui mousse, mais pourquoi ? Parce que des levures introduites dans le vin en consomment le sucre, libérant du dioxyde de carbone dans l'espace clos de la bouteille ; celui-ci se dissout dans le liquide et le fait pétiller, quand saute le bouchon. Ce dernier est donc la clef du Champagne, avec la bouteille, puisqu'ils retiennent le gaz.

Longtemps, on a supposé que le bouchon était hermétique : le vin ne reste-t-il pas dans la bouteille ? Le vin, oui, mais pas le gaz : les œnologues savent que les bouteilles de Champagne perdent de leur pression au cours du vieillissement. L'observation de ce dégazage les a poussés à analyser plus finement le rôle des bouchons. Au cours de la fabrication, avant la pose des bouchons qu'ouvriront les gourmets, les producteurs utilisent des capsules munies d'un joint ; ils doivent choisir entre des joints de liège et des joints de plastique. Les œnologues ont comparé les deux systèmes de bouchage... et observé que la

perméabilité n'est pas régulière avec les joints de liège, ce qui explique les variations de bouteille à bouteille.

Avec les joints synthétiques, la régularité est supérieure, mais faut-il ainsi bloquer le passage des gaz ? Les jurys de dégustation ont clairement établi que les vins évoluent alors moins vite : ils ont moins ces goûts de fruits cuits, souvent associés à une oxydation. Une oxydation, mais pourquoi ? L'oxygène diffuserait-il à travers les bouchons ? Le rapport surface du bouchage sur volume de liquide expliquait-il les différences entre les demi bouteilles, les bouteilles et les magnums ?

**N**aguère, les dégustateurs avaient eu l'impression de telles différences, mais impression ne vaut pas démonstration. Pour étudier les différences entre des bouteilles de différentes tailles, les œnologues ont comparé le même vin de Champagne, tiré dans des conditions identiques et bouché de façon clas-

par les levures. Seuls restent l'azote et du dioxyde de carbone.

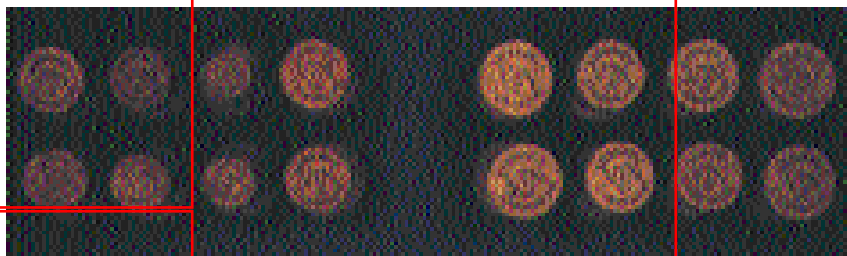
L'évolution du vin s'expliquait-elle alors par des échanges gazeux avec l'atmosphère, malgré le bouchon ? Les dosages montrèrent que, lors du vieillissement, la quantité d'oxygène qui entre par le bouchage est proportionnellement supérieure quand la capacité de la bouteille est faible : la quantité d'oxygène est approximativement identique pour les trois types de bouteilles, mais le volume de liquide qui réagit avec cet oxygène est inférieur pour les petites bouteilles. Si l'on comprend que le dioxyde de carbone quitte la bouteille, pourquoi l'oxygène entre-t-il ? Parce que sa pression partielle à l'extérieur des bouteilles (un cinquième d'atmosphère environ) est supérieure à la pression partielle dans le champagne (elle y est nulle).

**L**a position de stockage, elle, n'a pas d'influence, sauf sur l'état des bouchons : les propriétés mécaniques du bouchon sont mieux conservées quand

les bouteilles sont conservées debout. Plus précisément, la force à exercer pour extraire le bouchon est supérieure, et les bouchons reprennent leur forme de champignon quand ils sont retirés des bouteilles, car le vin, quand il est au

contact du bouchon, pénètre progressivement dans le liège et altère ses propriétés mécaniques.

Enfin le CIVC a exploré l'influence de la Lune sur l'enrichissement en sucre des raisins avant la récolte. On s'en doutait, mais les premiers résultats l'indiquent : il n'y a pas d'effet !



Bouchons de bouteilles conservées couchées (à gauche) et debout (à droite).

sique par des capsules à joint de liège. Puis, après un vieillissement de un an, ils ont soumis les vins à un jury de dégustation : le vin des magnums paraît toujours plus jeune que celui des bouteilles, et le vin des demi bouteilles est plus évolué.

Des échanges avaient-ils lieu entre de l'oxygène présent dans le petit volume de gaz emprisonné lors du bouchage et le liquide ? Non, car les dosages ont montré que l'oxygène emprisonné dans ce volume ou dissous dans le vin est tout entier consommé

**Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 août 1998, avec la chronique Info Science de Marie-Odile Monchicourt.**



## L'or des musulmans

*L'origine du métal qui compose les pièces indique l'évolution des zones d'influence.*

**A**u VII<sup>e</sup> siècle, alors que l'Europe est appauvrie, et que les empires byzantin et perse sont déchirés par des conflits incessants, les musulmans, partant d'Arabie, entreprennent la constitution d'un vaste empire. Les monnaies d'or frappées au cours de cette conquête témoignent de la progression de l'islam, et leur composition chimique indique l'origine de l'or : on précise ainsi quelles dynasties ont dominé les différentes régions productrices, et à quelles périodes.

Sous Abû Bakr, à qui Muhammad confie la direction de la prière en 632, année de sa mort, les musulmans entreprennent des expéditions militaires. Ils défont les Byzantins, et les Sassanides en Perse. En 650, ils ont conquis la Mésopotamie, la Palestine, la Perse, la Syrie, l'Égypte, Chypre et lancent leurs premières attaques en Ifriqiya (la Tunisie actuelle). Après la prise de

Carthage en 679 et celle de Cordoue en 711, les musulmans, que leur religion réunit malgré leurs divisions politiques, contrôlent tout le commerce en Méditerranée.

Le dinar, pièce d'or frappée pour la première fois au type arabisant par Abd al-Malik, qui règne de 685 à 705, devient «la» monnaie du commerce en Méditerranée et permet aux musulmans de financer leur conquête. D'où provenait l'or nécessaire à sa fabrication?

Nous avons analysé le métal des dinars frappés à plusieurs époques et dans différentes régions, et nous avons comparé les concentrations des impuretés présentes. Cette comparaison n'est significative que pour quelques éléments chimiques : pendant la purification à haute température du minerai d'or, de nombreuses impuretés sont oxydées et évaporées, dans des proportions qui dépendent des conditions opératoires. Quelques éléments ne subissent pas ces transformations et restent donc intégralement dans le métal, mais ils y sont présents en très petites quantités.

Comment doser les monnaies sans les endommager? Nous utilisons deux techniques. Le bombardement du métal

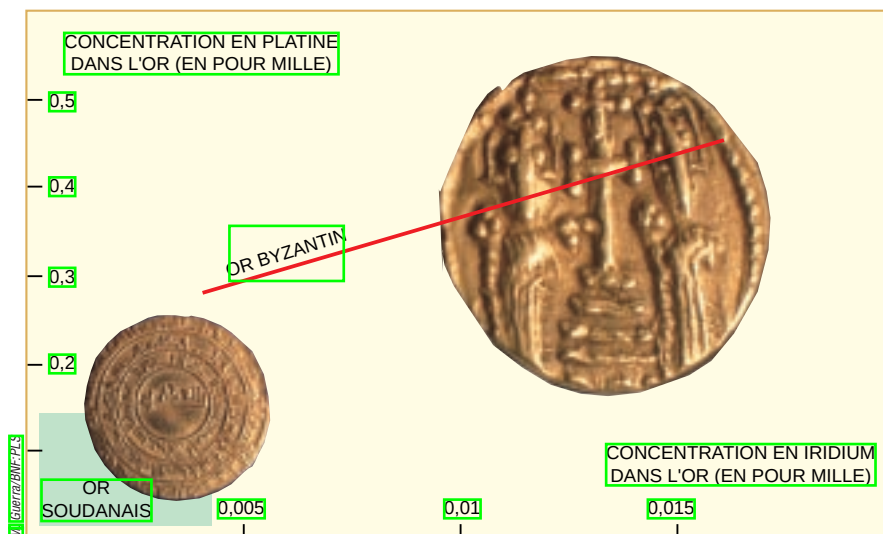
avec des protons transforme les différents éléments présents en isotopes radioactifs (un isotope d'un élément chimique est un atome dont le noyau contient le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons). La désactivation naturelle de ces isotopes produit un rayonnement gamma à une énergie caractéristique de l'élément initial et dont l'intensité dépend de l'abondance de celui-ci. Nous analysons aussi, par spectrométrie de masse, des échantillons d'un microgramme seulement, prélevés par un laser et ionisés dans un plasma.

Après la prise de Carthage aux Byzantins (en 679), les musulmans frappent leur monnaie en Ifriqiya. L'or de ces dinars contient une forte proportion de platine, et le rapport entre les concentrations en iridium et en platine y est constant : c'est de l'or byzantin. Les pièces byzantines, récupérées par les conquérants, ont été fondues et refrappées, sans doute par le même personnel et dans les mêmes ateliers que sous la domination byzantine.

Les dinars frappés par la deuxième dynastie musulmane installée en Ifriqiya, les Aghlabides, le sont avec deux types d'or. La comparaison avec des dinars frappés en Égypte à la même période montre que le premier or aghlabide, frappé de 802 à 833, provient d'Égypte. Les pièces frappées après cette date, en revanche, contiennent peu de platine et beaucoup de gallium : l'or qui les compose provient certainement du Soudan (Mali, Niger et Mauritanie actuels). On date ainsi le début du contrôle (qui reste toutefois partiel) qu'exercent les Aghlabides sur les routes commerciales transsahariennes.

Au XI<sup>e</sup> siècle, la dynastie Almoravides, originaire de l'Ouest saharien, réunit l'ensemble du Maghreb et de l'Andalousie sous sa domination. Les dinars almoravides, frappés en Espagne et dans les ateliers africains situés sur les plus importantes pistes transsahariennes, sont tous en or du Soudan. Ce résultat confirme que l'exploitation des riches gisements aurifères du Soudan procure assez d'or aux Almoravides : pour battre monnaie, ils n'ont besoin ni des réserves ni des mines d'or des territoires qu'ils ont conquis, notamment dans la péninsule ibérique.

Maria GUERRA, CEB IRAMAT-CNRS, Orléans



Les concentrations en platine et en iridium permettent de distinguer les différentes origines de l'or utilisé par les musulmans pour frapper leur monnaie au cours de leur conquête, du VII<sup>e</sup> au XI<sup>e</sup> siècle. À leur arrivée dans l'actuelle Tunisie, les musulmans frappent des pièces «arabo-latines» (à droite) en récupérant l'or des pièces byzantines. Le platine et l'iridium y sont assez abondants et, surtout, leurs concentrations varient proportionnellement (droite rouge). Les pièces frappées plus tard avec de l'or du Soudan (Mali, Mauritanie, Niger) contiennent peu de platine et d'iridium (rectangle vert). Elles contiennent en revanche une forte proportion de gallium.

## Un vieux pluviomètre

*Des sédiments lacustres enregistrent les variations de pluviosité depuis 6 000 ans.*

La Terre se réchauffera-t-elle dans les prochaines décennies? Si oui, quelles seront les conséquences sur le climat des différentes régions? Une partie des réponses à ces questions réside dans les climats du passé, que les paléoclimatologues tentent de reconstituer, bien souvent à partir d'indices indirects, tels que les pollens fossiles, témoins de la végétation. Pour la première fois, des sédimentologues ont reconstitué directement des évolutions passées de la pluviosité en Afrique centrale : l'assèchement responsable du recul de la forêt tropicale lui est antérieur de plus de 1 000 ans.

Depuis la fin de la dernière glaciation, il y a 12 000 ans, la pluviosité a fortement varié en Afrique centrale. Une phase très humide a culminé il y a 9 000 ans. L'analyse des pollens fossiles, qui indique quelles espèces végétales sont présentes et en quelles proportions, révèle que la forêt tropicale humide couvrait à cette époque l'ensemble de la région. Puis le climat est devenu globalement plus sec. Il y a 2 800 à 3 000 ans, les arbres ont commencé à reculer, au profit de la savane. Cette transformation est plus ou moins marquée : la forêt a disparu des zones les plus sèches, elle a moins régressé dans les plus humides.

Cette transformation du paysage a-t-elle pour origine une brusque variation climatique ou n'est-elle que l'aboutisse-

ment d'un processus engagé depuis plus longtemps? Pour trancher entre les deux possibilités, Dominique Schwartz, Jacques Bertaux et leur collègues de l'ORSTOM ont recherché les informations enregistrées par deux lacs, Sinnda et Kitina, situés au Sud du Congo, en prélevant des carottes de sédiments empilées au fond en couches régulières. La partie organique de ces carottes, surtout des restes des algues, des plantes aquatiques et de la végétation des rives, permet de dater les différentes couches par la méthode du carbone 14. Les minéraux contenus dans les sédiments, quartz, kaolinite et gibbsite, ont été arrachés des sols environnant par le ruissellement de l'eau de pluie. Dans la forêt tropicale, le ruissellement et l'érosion sont faibles : en l'absence de modification profonde de la végétation, l'abondance des particules minérales varie quasi proportionnellement à l'écoulement, donc à la pluviosité.

La mesure, par spectrométrie infrarouge, des variations de concentration en minéraux au cours du temps révèle une baisse progressive du ruissellement depuis plus de 4 000 ans. Comme cette diminution du ruissellement est antérieure à la modification de la végétation autour des lacs (qui n'a pas plus de 3 000 ans), elle n'a qu'une seule origine possible : la réduction de la pluviosité.

Pas de catastrophe climatique donc, mais un assèchement progressif du climat, dont les conséquences sur la végétation sont apparues avec un décalage d'au moins 1 000 ans. Le recul de la forêt n'est pas directement proportionnel à la pluviosité : les espèces de milieu humide n'ont commencé à disparaître que lorsque la pluviosité est passée au-

## BRÈVES

### Matériau composite

Au début du deuxième millénaire avant notre ère, les habitants de la ville de Mashkan-shapir, en Mésopotamie (à moins de 100 kilomètre de Bagdad aujourd'hui), manquaient de pierre pour moudre le grain. Selon Elisabeth Stone, de l'Université de l'État de New York, ils ont alors fabriqué un matériau synthétique qui présente les mêmes qualités de texture et de résistance que le basalte, en chauffant à 1 200 °C de la boue alluviale, qu'ils laissaient ensuite refroidir pendant plusieurs dizaines d'heures.

### Popeye avait raison

Les chercheurs américains ont montré que les enzymes particulièrement puissantes contenues dans les feuilles des épinards pouvaient neutraliser des explosifs comme le TNT. La nitroréductase de l'épinard digère et transforme les composés explosifs en des molécules bénignes.



Photos : A. S. / M. S. / M. S. / M. S.

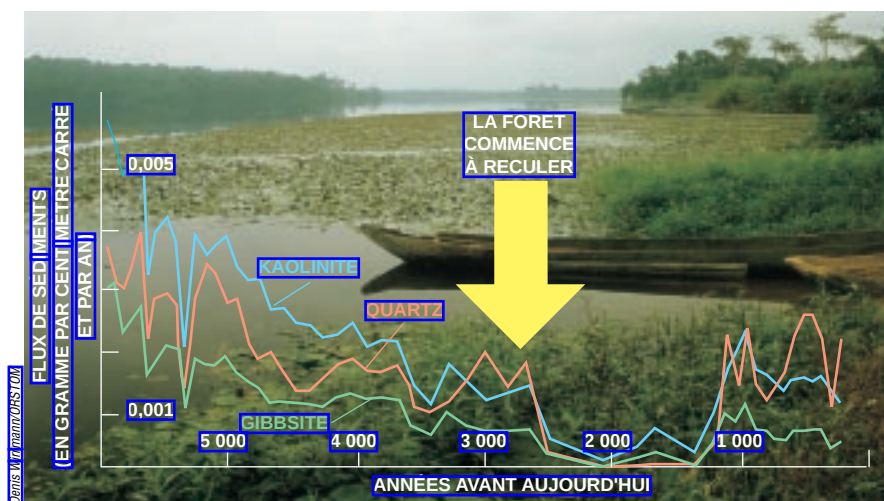
### Premier choix

Les théoriciens des nombres ont lancé un défi : trouver le plus grand nombre de nombres premiers en progression arithmétique (dont la différence de deux nombres consécutifs est constante). Le record établi en mars 1998 est de 10 nombres premiers dont la différence est égale à 210. Le premier des « premiers » est 10099697246971424763778665558796984032958919004180360341775890434170334888215906. Les informaticiens pensent que ce record tiendra longtemps : pour trouver une progression arithmétique de 11 nombres premiers il faudra un temps de calcul mille milliards de fois supérieur.

### Réchauffement de Triton

Le réchauffement global n'est pas propre à la Terre : sur Triton, l'un des satellites de Neptune, des astronomes ont noté une augmentation de la température de cinq pour cent entre 1989, époque du passage de la sonde *Voyager* à proximité, et aujourd'hui. Pour cette dernière détection, les astronomes ont attendu que Triton passe devant une étoile de la constellation du Sagittaire. Lors de ce passage, la mesure de la quantité de lumière de l'étoile absorbée par l'atmosphère de Triton, a permis d'y calculer la pression et la température.

Suite page 22



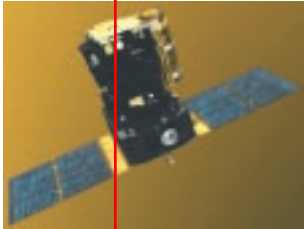
Les flux de sédiments minéraux (kaolinite, quartz et gibbsite) entraînés par le ruissellement au fond du lac Kitina, au Sud du Congo, pendant les 6 000 dernières années suivent les variations de la pluviosité. Celle-ci a commencé à décroître bien avant que les conséquences de l'assèchement ne fassent reculer la forêt tropicale au profit de la savane.

### La fin de la tonte

On pourra bientôt récupérer la laine des brebis sans les tondre. Une société australienne produit une protéine dont l'injection aux moutons fait tomber la toison en une semaine dans un filet dont on a préalablement enveloppé l'animal. Cette protéine a été isolée chez une race de moutons qui la produit naturellement. La laine ainsi obtenue est de longueur plus homogène qu'avec la tonte mécanique, et les animaux ne sont plus blessés par les lames des tondeuses.

### Contact perdu avec SOHO

Les contrôleurs au sol ont perdu le contact avec l'Observatoire héliosphérique SOHO. Quand les communications sont interrompues, le programme du satellite le place en mode d'urgence (réorientation par rapport au Soleil) pour qu'il recharge ses batteries. La procédure a apparemment échoué et les efforts pour rétablir le contact ont été vains. Lancé le 2 décembre 1992, SOHO avait terminé sa mission d'étude du Soleil en avril 1998, mais les astronomes espéraient observer le maximum d'activité solaire de l'an 2000.



### Le sperme déshydraté

Comment conserver facilement la semence des souris transgéniques nécessaires aux biologistes? Les biologistes japonais ont la solution : en déshydratant le sperme de souris. La semence est conservée trois mois sous vide, à une température de quatre degrés, puis utilisée. Mode d'emploi : ajoutez de l'eau, coupez les têtes de spermatozoïdes et injectez-les dans des ovules à l'aide d'une micropipette. Sur 46 œufs implantés dans des souris femelles, 14 se sont développés normalement et ont donné naissance à des souris normalement constituées.

### Des molécules froides

En refroidissant les atomes, les physiciens obtiennent des condensats de Bose-Einstein, où les atomes se confondent en un superatome. Les molécules sont plus difficiles à refroidir. En refroidissant d'abord des atomes de césium, puis en les associant deux à deux, des physiciens d'Orsay ont obtenu des molécules à une température de 300 microkelvins. Le condensat de molécules est en vue!

Suite page 24

## Une pépinière de planètes?

### Découverte d'un disque de poussières froides dans la constellation du Centaure.

I l y a près de cinq milliards d'années, les planètes de notre Système solaire se sont formées dans un disque de poussières. Aussi, la découverte d'un disque autour de l'étoile  $\beta$  de la constellation du Chevalier du peintre ( $\beta$ -Pictoris), voici une quinzaine d'années, indiqua pour la première fois qu'il pouvait exister des planètes autour d'une étoile autre que le Soleil.

Depuis, plusieurs planètes ont été décelées indirectement hors du Système solaire, par les perturbations du mouvement des étoiles autour desquelles elles orbitent, mais aucune planète n'a été vue directement (en mai 1998, le Télescope spatial Hubble aurait observé une planète dans la constellation du Taureau, mais ce résultat n'a pas été confirmé). Aussi, la recherche de disques de poussières a été l'un des domaines de recherche actif de ces dernières années. À l'aide de caméras qui enregistrent le rayonnement infrarouge, installées sur le télescope Keck, à Hawaii, une équipe d'astronomes américains vient de photographier, dans la constellation du Centaure, un disque plus froid que celui de  $\beta$ -Pictoris.

Comment détecter les disques de poussières? Les astronomes savent que les étoiles qui émettent plus de rayon-

nement infrarouge que la moyenne sont probablement entourées d'un disque de poussières : ces dernières, chauffées par le rayonnement visible de l'étoile, rayonnent des infrarouges. En 1984, le satellite IRAS a détecté de nombreuses étoiles qui présentent un tel excès dans l'infrarouge. HR 4796 est l'une d'elle. Comme plus des deux tiers des étoiles de notre Galaxie, HR 4796 est une étoile double.

Au télescope Keck, les astronomes ont observé ce système dans l'infrarouge car, à ces longueurs d'onde, l'étoile émet peu de lumière : l'éventuel disque de poussière ressort. La première image de ce système stellaire a révélé un disque autour de l'une des étoiles du système avec un trou dans sa partie interne.

A quoi est dû ce trou? Une particule de poussière en orbite circulaire perd de l'énergie et tombe en spirale vers l'étoile. Deux mécanismes peuvent bloquer cette chute. D'une part, la captation des poussières par une planète, d'autre part, l'élimination par collisions internes. Lorsque deux poussières entrent en collision, elles sont divisées en poussières beaucoup plus fines, pour lesquelles la gravitation devient négligeable ; elles sont alors éjectées du système par le rayonnement. Aussi, l'absence de poussières à proximité de l'étoile indique la présence possible d'une planète, mais surtout que les poussières ne sont pas produites dans cette région.

La double particularité de cette découverte tient à la grande taille de ce vide et à la jeunesse du système. Le trou interne a un diamètre de 50 unités astronomiques, c'est-à-dire la taille du Système solaire. Ensuite, l'âge de HR 4796 a été déterminé

précisément. Le résultat a surpris les astronomes : une dizaine de millions d'années, alors que  $\beta$ -Pictoris est âgée de 200 millions d'années. Ce disque est d'âge intermédiaire entre des disques autour d'étoiles en formation, comme les étoiles T-Tauri, âgées de quelques millions d'années à peine, et des disques autour d'étoiles plus âgées, comme  $\beta$ -Pictoris. Dans des disques de poussières de cet âge, des planètes pourraient s'être formées il y a peu de temps. Avec le démarrage du VLT, le très grand télescope européen, et les techniques d'interférométrie à très longue base, les astronomes pensent observer des détails des disques, dont des planètes.

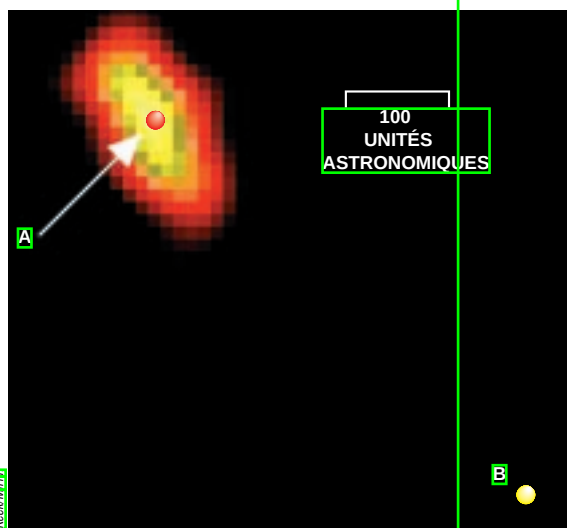


Image en fausses couleurs du disque autour de l'étoile HR 4796A (B désigne l'emplacement du compagnon, HR 4796B). Le disque rayonne dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 19,2 micromètres. L'émission résulte de poussières chauffées par l'étoile. La forme allongée de l'émission indique que le disque est observé presque par la tranche.

## De vrais dinosaures, avec de vraies plumes

**De nouveaux fossiles chinois démontrent que les oiseaux descendent bien de petits dinosaures carnivores.**

Les couches lacustres datant des environs de la limite Jurassique-Crétacé (il y a quelques 135 millions d'années) dans le Nord-Est de la Chine livrent aux paléontologues des fossiles qui éclairent les grandes énigmes de l'évolution, notamment l'origine des oiseaux. Ces sédiments au grain très fin ont conservé non seulement des squelettes remarquablement complets, mais aussi des restes de tissus qui sont rarement préservés. Après de nombreux oiseaux primitifs encore couverts de leur plumage, puis le petit dinosaure *Sinosauropteryx*, au corps revêtu de curieux filaments qui étaient peut-être des proto-plumes, les dépôts des anciens lacs de la province du Liaoning ont fourni ce que certains paléontologues attendaient depuis longtemps : de véritables dinosaures au corps couvert d'indubitables plumes.

Trois squelettes de tels animaux ont été décrits par Ji Qiang, Philip Currie, Mark Norrell et Ji Shu-an. L'un d'entre eux appartient à *Protarchaeopteryx robusta*, un animal qui avait déjà été signalé mais non encore décrit en détail, les deux autres à une espèce et un genre nouveaux, *Caudipteryx zoui*. Ces deux animaux offrent une combinaison originale de caractères : le squelette est celui d'un dinosaure (théropode) et ils possèdent des plumes qui ne sont guère diffé-

ports entre la longueur du bras et celle de la jambe nous éclairent sur les possibilités locomotrices de ces animaux et sur la phylogénie. Le bras de *Protarchaeopteryx* est plus long (relativement au fémur) que chez les dinosaures théropodes, mais plus court que chez les oiseaux. Chez *Caudipteryx*, le bras est plus court encore par rapport à la jambe. Grâce à l'analyse des caractères du squelette de ces deux étranges dinosaures, on les a replacés dans l'«arbre généalogique» des dinosaures et des oiseaux : *Caudipteryx* est le «groupe-frère» de l'ensemble des oiseaux, y compris *Archaeopteryx*. *Protarchaeopteryx* est plus primitif encore, très proche de petits dinosaures carnivores, tels que le célèbre *Velociraptor*.

Les restes d'un plumage clairement associés aux squelettes confèrent à ces petits dinosaures (dont le plus grand n'atteignait pas 90 centimètres de longueur) un intérêt particulier. Chez *Protarchaeopteryx*, de petites plumes sont présentes dans la région du thorax, à la partie antérieure de la queue et le long du fémur, et des plumes plus longues, des rectrices atteignant 13 centimètres de longueur, prolongent l'extrémité de la queue. Chez *Caudipteryx*, des rémiges sont attachées au membre antérieur, des rectrices au bout de la queue, et le corps est couvert de petites plumes formant une sorte de duvet. Les plumes de ces deux dinosaures sont construites comme celles des oiseaux, avec une tige centrale, le rachis, portant des barbes, elles-mêmes pourvues de barbules. Mais les rémiges (sur les bras) et les rectrices (sur la queue) de *Protarchaeopteryx* et de *Caudipteryx* sont symétriques de part et d'autre du rachis, alors que chez les oiseaux volants,

y compris *Caudipteryx*, les plumes sont asymétriques. Peut-on voler avec des plumes symétriques? C'est possible, mais pas certain. En tout état de cause, ces dinosaures, surtout *Caudipteryx*, avaient des bras et des rémiges trop courts pour voler ; leurs longues jambes suggèrent qu'ils étaient des coureurs terrestres.

Les conséquences de ces remarquables découvertes sont multiples. D'abord, une prédiction se vérifie : il y a déjà longtemps que certains paléontologues postulaient l'existence de plumes chez certains petits dinosaures carnivores, mais, faute de preuves tangibles, cette hypothèse restait une supputation. La magnifique conservation des fossiles chinois le démontre : certains théropodes étaient bel et bien couverts de plumes similaires à celles des oiseaux.

L'idée selon laquelle les oiseaux dérivent de petits dinosaures carnivores n'est pas nouvelle : elle fut émise dès le XIX<sup>e</sup> siècle, mais c'est depuis 25 ans que les indices les plus convaincants se sont accumulés, sans pour autant vaincre toutes les réticences. La découverte, chez des animaux qui sont clairement des dinosaures, de plumes qui n'ont rien à envier à celles des oiseaux d'aujourd'hui, est une preuve qui devrait être décisive : les ancêtres des oiseaux étaient bien des théropodes. Ni *Protarchaeopteryx*, ni *Caudipteryx* ne pourront cependant figurer en droite ligne dans ce prestigieux pedigree : *Archaeopteryx*, aux bras plus longs et aux rémiges asymétriques, était déjà un vrai oiseau capable de voler, et pourtant il est très probablement plus ancien que les fossiles chinois, qui ne peuvent donc faire figure que de «cousins» un peu attardés, au moins en ce

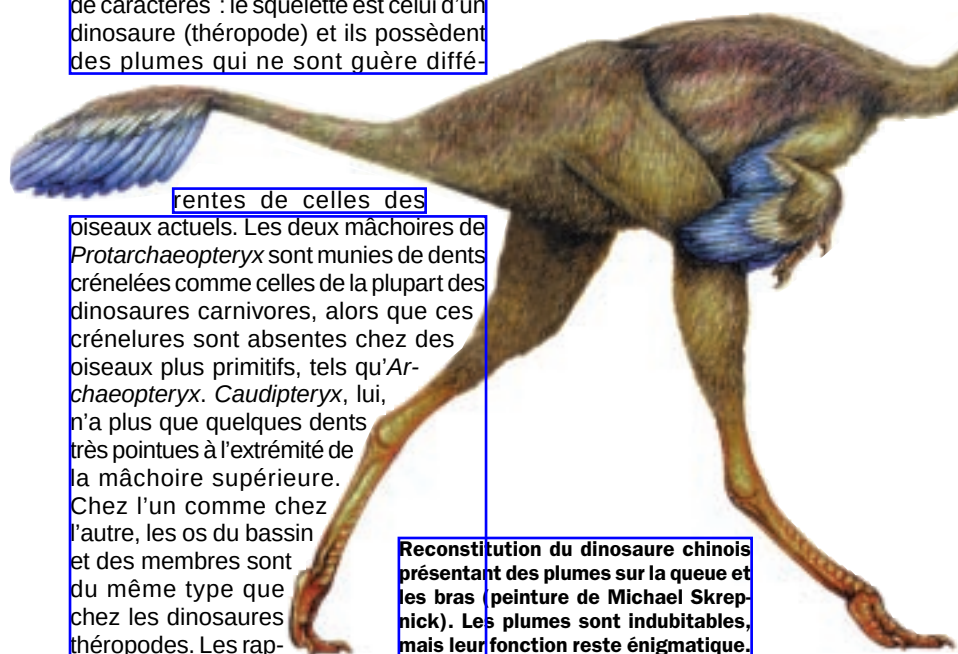
qui concerne le vol.

Il est désormais clair, en effet, que la présence de plumes bien développées (pas celles, fort transformées, des autruches ou des manchots) n'implique pas la possibilité de voler, puisque ni *Protarchaeopteryx*, ni *Caudipteryx*, à en juger par leur squelette, n'étaient des animaux volants. Les plumes sont donc apparues indépendamment du vol.

Dernière conséquence, et non des moindres : «plume» n'est plus synonyme d'«oiseau». Méfiance, donc : une plume isolée trouvée dans des terrains mésozoïques ne démontre plus la présence d'oiseaux, elle peut fort bien avoir appartenu à un dinosaure.

«Je suis oiseau, voyez mes ailes», disait la chauve-souris de La Fontaine. À cause de ces dinosaures chinois, les oiseaux ne peuvent plus dire «Je suis oiseau, voyez mes plumes»...

Eric BUFFETAUT



rentes de celles des oiseaux actuels. Les deux mâchoires de *Protarchaeopteryx* sont munies de dents crénelées comme celles de la plupart des dinosaures carnivores, alors que ces crénelures sont absentes chez des oiseaux plus primitifs, tels qu'*Archaeopteryx*. *Caudipteryx*, lui, n'a plus que quelques dents très pointues à l'extrémité de la mâchoire supérieure. Chez l'un comme chez l'autre, les os du bassin et des membres sont du même type que chez les dinosaures théropodes. Les rap-

Reconstitution du dinosaure chinois présentant des plumes sur la queue et les bras (peinture de Michael Skrepnick). Les plumes sont indubitables, mais leur fonction reste énigmatique.

### Extinction fulgurante

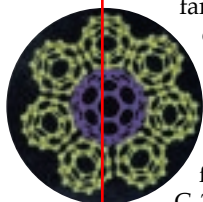
Il y a 252 millions d'années, à la fin du Permien, 85 pour cent des espèces océaniques et 70 pour cent des vertébrés terrestres ont disparu. L'extermination a été rapide : elle n'a duré qu'un million d'années. Pour établir cette durée, Douglas Erwin du Musée américain d'histoire naturelle, a daté le zircon créé dans les roches volcaniques appartenant aux niveaux de la fin du Permien où les espèces disparaissent. Le zircon incorpore de l'uranium lors de sa formation, et le dosage des produits de désintégration indique l'âge du minéral. Ces mesures intéressent les paléontologues qui s'interrogent sur les possibilités d'évolution des animaux lors de ces crises, possibilités réduites si la cause de l'extinction est brève (type chute de météorite), réelles si la cause est plus étalée dans le temps (type éruption volcanique).

### Oasis des glaces

Des organismes vivants ont été découverts dans la couverture de trois à six mètres de glace de lacs de l'Antarctique, dans l'un des déserts les plus froids et les plus secs sur Terre. Du sable et des graviers, colonisés par des communautés microbiennes, sont apportés par le vent et piégés dans des fissures de la glace. Au plus chaud de l'été, la partie supérieure de la glace fond, et ces agrégats denses de sédiments et de bactéries s'enfoncent jusqu'à la couche solide. Quand la surface gèle à nouveau, ces agrégats sont pris dans la glace, mais les sédiments sombres absorbent l'énergie solaire et fondent la glace environnante, formant des poches d'eau où survivent les communautés microbiennes pendant plusieurs mois.

### C 36, fullerène prometteur

La molécule C 36 (en vert) vient d'être synthétisée et isolée par des chercheurs américains : c'est la petite dernière de la famille des fullerènes, ces molécules en forme de cages composées uniquement d'atomes de carbone. Depuis sa découverte, en 1990, on a beaucoup étudié C 60 (en violet), en forme de ballon de football. C 36 est plus réactif que son grand frère, et s'associe plus facilement avec d'autres atomes. On pense ainsi que C 36, dopé par du rubidium, devient supraconducteur à température plus élevée que C 60 (-242 °C).



## Le jeu des quatre coins

**La solution existait ; elle est maintenant construite.**

**A**ux yeux du public et de quelques scientifiques, les mathématiques sont dépréciées par l'artificialité des problèmes posés. Pourtant, il est à peu près certain que les problèmes d'apparence futile auront dans le futur des applications pratiques. Toujours est-il qu'aujourd'hui, les mathématiques ludiques sont une branche des mathématiques appliquées.

Le problème des quatre coins est de ce type : comment remplir un quadrillage  $10 \times 10$  avec trois couleurs (rouge, blanc et vert), de manière qu'aucun rectangle (quelle que soit sa taille) n'ait quatre coins de la même couleur. Nous baptiserons RCP ces quadrillages. M. Beresin, E. Levine et J. Winn ont montré, en 1989, que de tels quadrillages existent, mais sans donner de méthode pour en construire. Jerome Lewis nous en propose une.

Tout d'abord, remarque-t-il, la probabilité d'avoir des rectangles aux coins de la même couleur augmente avec le nombre de cases de cette couleur, aussi pense-t-il raisonnable d'utiliser, autant que possible, le même nombre de cases de chaque couleur et postule aussi que les chances de réussite seront maximales avec au moins 3 cases de chaque couleur dans chaque rangée et colonne.

Le remplissage s'effectue colonne par colonne, chacune ayant ses cases numérotées de 1 à 10. La première étape consiste à mettre trois cases rouges dans la première colonne. Pour cela on établit la liste des 120 combinaisons de trois chiffres ordonnés parmi 10 : 1-2-3, 1-2-4, 1-2-5, 1-2-6, ..., 7-8-9, 7-8-10, 7-9-10 et 8-9-10 ; on choisit un de ces tri-

|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 2  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 4  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 5  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 6  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 7  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 8  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 9  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

**Quadrillage-RCP avec 34 cases rouges, 34 cases blanches, et 32 cases vertes.**

plets, qui détermine la place des cases rouges de la première colonne. Tous les triplets des autres colonnes qui donnent un rectangle avec deux coins rouges, c'est-à-dire qui ont au moins deux chiffres en commun avec un autre triplet, sont mis à l'écart. Pour la colonne suivante, un second triplet est choisi parmi les triplets autorisés, et ainsi de suite jusqu'à la colonne 10. Les 4 cases rouges manquantes sont ensuite placées par essais et erreurs.

La deuxième étape permet de placer les cases blanches et donc les cases vertes. Pour cela, J. Lewis construit une matrice à 120 lignes et 10 colonnes. Chaque ligne correspond à un des triplets possibles, chaque colonne de la matrice correspond à la colonne de même rang du quadrillage. On place un 0 dans les cases correspondant à un triplet de cases blanches compatible avec l'emplacement des cases rouges (c'est-à-dire sans chiffre commun). Le placement des cases blanches de la première colonne est donné par le premier zéro de cette colonne rencontré ; chaque triplet incompatible des 9 autres colonnes est alors écarté (deux chiffres en commun) et marqué par un «1». Passons à la colonne 2 et recherchons, dans la matrice, le premier zéro pour la place des cases blanches, mais n'oublions pas de vérifier qu'aucun rectangle aux coins verts n'a été créé ; en ce cas, il nous faut opter pour un autre zéro. Marquons maintenant dans les colonnes 3 à 10, les triplets incompatibles avec cette deuxième colonne par un «2» et réitérons la procédure pour les autres colonnes.

En cas d'impasse, c'est-à-dire plus aucun zéro dans une colonne matrice, il est nécessaire de remonter jusqu'au zéro pris en compte dans la colonne précédente, et tenter le suivant, jusqu'à pouvoir remplir la colonne 10. La démarche par essais et erreurs s'apparente à celle employée dans un labyrinthe : si vous débouchez dans un cul-de-sac, vous revenez à la dernière bifurcation et tentez une autre voie jusqu'à trouver la sortie.

Un ordinateur moyen mettra une dizaine de minutes pour produire cette figure. Contrairement à ce qui était attendu, on obtient un quadrillage à 34, 34 et 32 cases respectivement rouges, blanches et vertes et non un 34, 33 et 33. Ces derniers sont-ils inexistant, seulement rares, ou bien cette méthode ne permet-elle pas de les obtenir ? Il est impossible de répondre à l'heure actuelle.

Remarquons enfin qu'à partir d'un quadrillage-RCP, on peut, par permutation de colonnes, de rangées, par rotation et réflexion, en obtenir de multiples. L'ensemble de ces quadrillages obtenus à partir d'un peut constituer une classe. Combien existe-t-il de classes ? Mystère.

LOÏC MANGIN

## Foies fractals

*La géométrie fractale vient à la rescousse de l'imagerie médicale.*

**P**our visualiser l'intérieur d'un foie avant de l'opérer, des chercheurs ont mis au point des algorithmes de reconstruction de la structure des vaisseaux sanguins hépatiques, qui complètent les données des scanners. Ces algorithmes sont fondés sur la structure fractale de la vascularisation du foie.

En effet, le foie est irrigué par des vaisseaux sanguins qui, à la manière d'un chêne ou d'un réseau fluvial, présentent une structure en arbre : les ramifications, de plus en plus petites et nombreuses, se répètent à l'identique d'une génération à l'autre (cette propriété est nommée l'auto-similarité). Grâce à cette structure dite fractale, les arborescences de feuilles, de fleuves ou de vaisseaux sanguins s'approchent très près de n'importe quel point d'un grand volume, sans remplir complètement celui-ci.

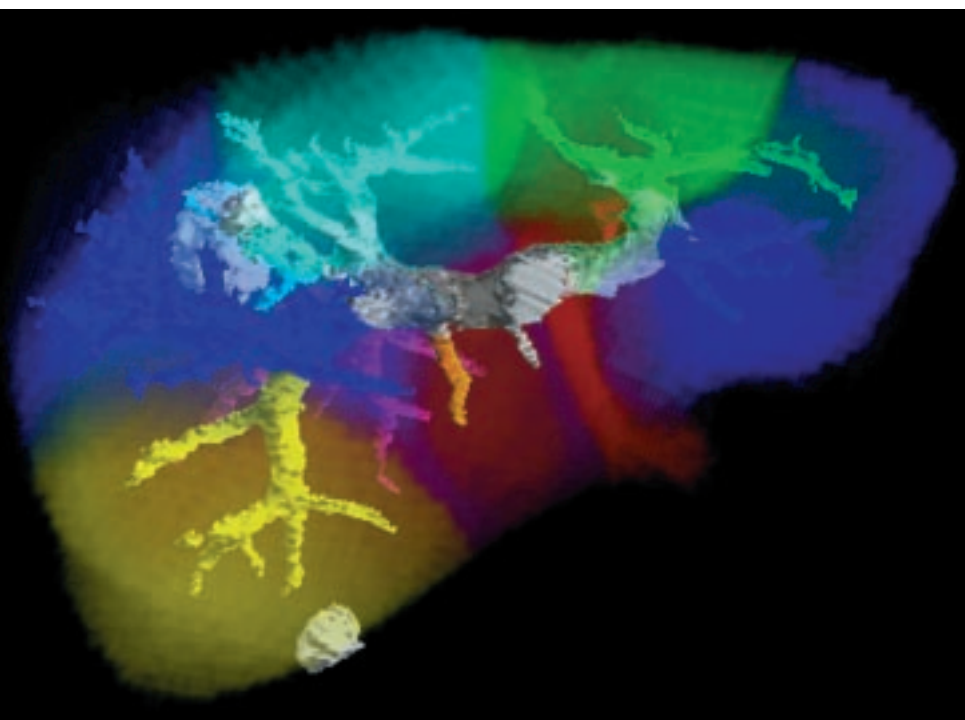
Un chirurgien, qui ôte une tumeur, sectionne certaines branches de l'arbre :

les ramifications en aval ne sont alors plus alimentées et n'irriguent plus les tissus alentour. Ainsi, si on ne retire pas entièrement ces tissus, ils meurent après l'opération et handicapent le patient. On ne doit cependant pas couper plus que nécessaire.

Si le chirurgien savait quels vaisseaux irriguent la tumeur, il pourrait visualiser les segments irrigués par ces vaisseaux en injectant un colorant dans ceux-ci ; mais il ne peut déterminer directement les vaisseaux concernés, car les parties du foie correspondant aux différentes branches sont trop enchevêtrées. Il faut donc faire cette détermination avant l'opération, pour chaque patient (car la structure des vaisseaux diffère énormément d'un individu à l'autre).

Pour visualiser en trois dimensions l'intérieur d'une partie du corps, les médecins disposent de la tomographie informatisée (utilisation de scanners). Malheureusement, pour le foie, cette technique ne fournit qu'une information partielle, car la résolution des images ne permet de voir que les plus gros vaisseaux, jusqu'à la troisième «génération» de ramifications environ.

On connaît ainsi la souche et les plus grosses branches : comment compléter l'arbre ? Si on savait selon quels principes l'arbre des vaisseaux du foie



Subdivision d'un foie en segments. Les branches issues de la veine porte, localisées par tomographie informatisée, sont matérialisées par des teintes opaques. Chaque segment est représenté en transparence, dans la couleur de la branche qui l'irrigue. Deux petites tumeurs sont visibles (au bord inférieur du segment jaune, ainsi qu'à la limite entre les segments bleu et turquoise), dont la position et l'extension ont été déterminées à l'aide d'un autre procédé de segmentation.

**CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (CNRS)**

**INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES APPLIQUEES  
DE TOULOUSE (INSA)**

**UNIVERSITE PAUL SABATIER  
DE TOULOUSE (UPS)**

**APPEL  
A CANDIDATURES**

**DIRECTEUR  
DU SERVICE NATIONAL  
DES CHAMPS MAGNETIQUES  
PULSES**

**Niveau :** Directeur de recherche  
1ère classe

**Localisation :** TOULOUSE

**Début du contrat :**

Fin 1999-Début 2000

Le Service National des Champs Magnétiques Pulsés, situé à Toulouse, est un des centres d'excellence de recherche en physique sur les champs magnétiques intenses. Une très grande installation de 12 MJ à la pointe technique sur les champs magnétiques intenses pulsés sera opérationnelle d'ici fin 1998.

Le Directeur est responsable du programme scientifique et du développement technique du Service.

Les candidats devront être spécialistes en physique de la matière condensée expérimentale et avoir au moins 10 ans d'expérience dans la recherche. Ils devront avoir travaillé dans le domaine des champs magnétiques intenses. Une expérience de direction et des connaissances d'ingénierie électrique seraient appréciées.

**Informations :** Direction du  
département Sciences Physiques  
et Mathématiques (CNRS)

**Par e-mail :** [spm-direction@cnrs-dir.fr](mailto:spm-direction@cnrs-dir.fr)

**ou téléphone :** 01.44.96.42.50

**Candidatures par courrier** en joignant deux exemplaires du CV à :

**CNRS**  
Département des Sciences Physiques  
et Mathématiques  
3, rue Michel-Ange  
75794 Paris cedex 16



## FESTIVAL INTERNATIONAL DU CIEL ET DE L'ESPACE

Le 8<sup>ème</sup> Festival international du ciel et de l'espace de Fleurance, parrainé par Hubert Reeves, se déroulera du 1<sup>er</sup> au 8 août.

Il propose un arrêt sur les extraordinaires découvertes réalisées ces dernières années sur les planètes. Programmes d'exploration du Système solaire, traces d'eau sur la Lune, soupçon de vie sur Mars, nouvelles planètes autour d'autres étoiles, autant de découvertes qui nous apprennent beaucoup sur notre propre histoire et modifient notre vision de l'Univers.

- Un cycle de conférences sur le thème des planètes et de la vie avec des astrophysiciens et des biologistes.
- Des cours, stages pratiques et ateliers pour découvrir et pratiquer l'astronomie.
- Des animations tous publics (micro-fusées, cadrans solaires, observations, etc.)
- De merveilleuses veillées aux étoiles musicales sous le ciel de Gascogne.
- Des expositions.

**Renseignements et réservations :**  
60 bis, rue Gambetta  
32500 Fleurance

Tél. : 05 62 06 62 76  
Fax : 05 62 06 24 99  
E. mail :  
Etoiles.Fleurance@mipnet.fr

croît, au stade de l'embryon et au-delà, on pourrait effectuer des simulations numériques afin de reconstruire, pour chaque patient, le reste de l'arbre. Mais on ne connaît pas ces principes ; aussi utilise-t-on les principes de croissance des fractals.

Heinz-Otto Peitgen et ses collègues, du Centre de diagnostic médical et d'imagerie de l'Université de Brême, font l'hypothèse que la structure en arbre des vaisseaux du foie, depuis la souche de cet arbre jusqu'à la périphérie du foie, est semblable à celle d'une décharge électrique entre une électrode centrale et une électrode périphérique entourant un isolant. L'équipe de Brême a effectué des simulations numériques utilisant l'équation mathématique correspondante, une équation différentielle de Laplace. Celle-ci décrit la diffusion d'un grand nombre de particules dans un milieu hétérogène, sous l'effet d'un champ : individuellement, les particules se déplacent au hasard jusqu'à ce qu'elles rencontrent la souche ou l'une des branches déjà construites, puis y restent collées.

Ce processus, nommé agrégation limitée par diffusion (en anglais *diffu-*

*sion-limited aggregation*, ou DLA), est l'un des mécanismes de croissance fractale les plus fréquents dans la nature inanimée : cristaux de glace, décharges électriques, électrolyse, etc.

L'analogie entre ce type de croissance fractale et la croissance des vaisseaux sanguins hépatiques est pour l'instant purement spéculative. L'équipe de Brême a néanmoins réussi, grâce aux simulations fondées sur cette analogie, à localiser très précisément les différents segments de foies humains destinés aux expériences. La mise en œuvre clinique du procédé a démarré. Déjà, des chirurgiens de l'Université de Hanovre utilisent l'algorithme de reconstruction pour connaître, avant une opération du foie, la position des vaisseaux irriguant la tumeur.

Peut-on en conclure, inversement, que l'agrégation limitée par diffusion soit un principe fondamental de la croissance des vaisseaux sanguins ? Il semble que non : le groupe de H. Peitgen a essayé également un procédé mathématique plus simple, qui associe à chaque point du foie la branche la plus proche, et les résultats sont aussi bons.

Christoph POPPE

## Sursauts lointains

*Nouveaux sursauts, nouvelles hypothèses.*

**A** chaque nouvelle observation astronomique à la une des journaux, les médias clament la remise en cause des théories existantes. Le domaine des sursauts gamma est l'un des rares où cette prétention est justifiée. En 1991, la théorie selon laquelle ces brefs éclairs de rayonnements gamma proviennent du disque de notre Galaxie s'est effondrée : l'instrument BATSE, à bord de l'*Observatoire Compton* a montré que les sursauts se répartissaient uniformément sur la voûte céleste, et non le long du plan galactique.

Une autre hypothèse, selon laquelle les sursauts se produisent dans un halo sphérique entourant notre Galaxie, a été balayée en 1997, lorsque la première mesure de distance d'un sursaut le plaça beaucoup trop loin. Bien que les astronomes s'entendent aujourd'hui pour dire que les sursauts sont des sortes d'explosions géantes qui émanent de galaxies lointaines, leur origine demeure l'un des grands mystères de l'astronomie.

Les astronomes ont mesuré récemment la distance de deux nouveaux sur-

sauts. Le premier, enregistré le 14 décembre 1997 par le satellite italien *Beppo-Sax*, émane d'une galaxie distante de 12 milliards d'années-lumière. La luminosité enregistrée était si grande que, situé à une telle distance, ce sursaut est l'événement cosmique le plus énergétique jamais observé depuis le Big Bang.

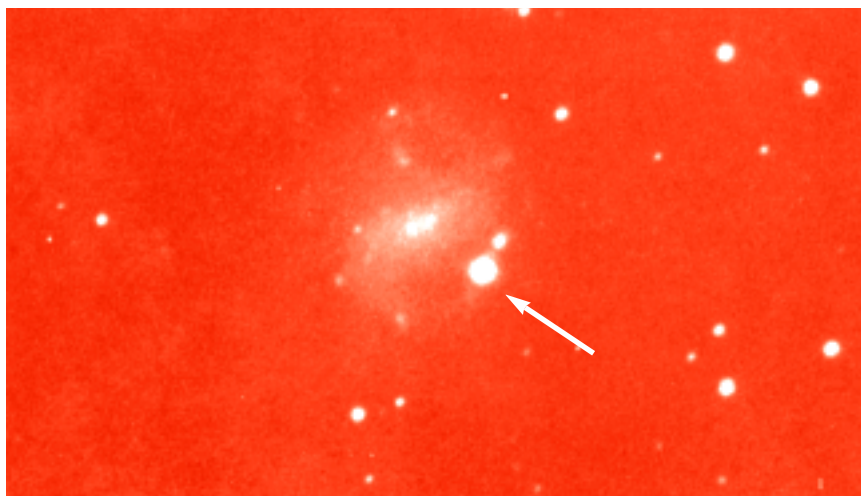
Alors que les astronomes s'accordaient sur la distance et la luminosité incroyables de ce sursaut, le satellite *Beppo-Sax* enregistra le 25 avril 1998, un sursaut 100 fois plus proche et 100 000 fois moins brillant que le sursaut de décembre. Pour ajouter à la confusion, ce dernier fut suivi, non par l'émission rémanente habituelle, mais par une supernova. C'était la première fois qu'un sursaut gamma et une supernova étaient associés. Là encore, il ne s'agissait pas d'une supernova ordinaire : sa luminosité a diminué plus lentement que celles des supernovae aux caractéristiques spectrales identiques, et elle a émis plus d'énergie dans le domaine radio que toutes les supernovae connues.

Dans une supernova, l'énergie provient de l'explosion thermonucléaire d'une petite étoile, nommée naine blanche, ou de l'implosion d'une étoile massive. Toutefois, ces événements n'engendrent pas de sursauts gamma, car les couches externes de la supernova en expansion bloquent les éventuels rayons gamma émis

au centre. Les sursauts émanent de régions de faible densité ; pourtant, leur énergie résulte d'événements cataclysmiques qui se produisent dans des régions denses, dont la taille est inférieure à 100 kilomètres : sinon ils n'émettraient pas de sursauts si brefs. Ces deux impératifs indiquent un scénario en deux étapes : production d'énergie, suivie de l'émission du rayonnement gamma.

La seconde étape a été expliquée par Martin Rees, de l'Université de Cambridge, et par Peter Mészáros, de l'Université de Pennsylvanie. Un jet de rayonnement et d'électrons, émis à une vitesse proche de celle de la lumière, ne serait pas gêné par les débris de la supernova. Après que cette boule de feu a grossi, des ondes de choc produites par l'interaction avec le gaz environnant déclencheraient l'émission du rayonnement gamma ; plus tard, des collisions avec le milieu interstellaire produiraient l'émission rémanente observée.

D'où provient ce jet énergétique ? Deux scénarios s'opposent : l'un met en jeu la coalescence de deux étoiles à neutrons, ou d'une étoile à neutron et d'un trou noir, l'autre suggère une supernova d'un type particulier qui se produit avec une étoile très massive, une hypernova. Malgré les affirmations initiales de nombreux observateurs, l'intensité des sursauts ne suffirait pas à discriminer entre ces deux hypothèses, car elles aboutissent toutes deux au même type d'objet :



UTLUS / CALAMIA European Southern Observatory

Une supernova inhabituelle est apparue (flèche) juste après qu'un sursaut gamma a été détecté. Les deux événements sont vraisemblablement liés.

un trou noir entouré d'un disque de débris.

De surcroît, ces deux modèles laissent sans réponse des questions lancinantes : qu'est-ce qui déclenche la boule de feu ? Le rayonnement est-il émis dans des jets collimatés, ou uniformément ? L'analyse de la position des sursauts dans les galaxies apporterait un premier élément de réponse : les étoiles à neutrons errent sur de grandes distances avant de coalescer, tandis que les étoiles très massives brûlent leur carburant très vite et finissent en hypernova sur le lieu même de leur naissance. Ainsi, des sursauts qui se produiraient près des régions de for-

mation d'étoiles, comme certaines observations le suggèrent, privilégieraient l'hypothèse des hypernovae.

La diversité des sursauts enregistrés laisse penser que plusieurs modèles coexistent. Cependant, les sursauts gamma engendrés par des hypernovae sont particulièrement intéressants d'un point de vue cosmologique, car ils permettraient de sonder les régions de formation d'étoiles des galaxies lointaines : comme ces régions sont généralement dans des cocons de poussières opaques, les sursauts y produiraient des éclairs décelables à de très grandes distances.

## Du nouveau pour nos poumons

*Des gaz aimantés pour voir l'intérieur des poumons.*

L'imagerie par résonance magnétique, ou IRM, outil de diagnostic utilisé dans les hôpitaux depuis une quinzaine d'années, n'est pas adaptée à l'examen des poumons. Une nouvelle méthode, qui combine l'inhalation de gaz polarisés et leur visualisation par résonance magnétique nucléaire, comble cette lacune.

Les protons (les noyaux d'hydrogène) possèdent un moment magnétique : soumis à un fort champ magnétique extérieur, ils s'alignent dans ce champ, comme de minuscules aimants. Or les tissus sont riches en protons, de sorte qu'un tel champ magnétique y crée une petite aimantation. Cette aimantation, ou polarisation, est très faible, mais détectable par la technique

de résonance magnétique nucléaire. Les images obtenues, en deux ou trois dimensions, ont une excellente résolution (inférieure au millimètre) ; on y détecte certaines lésions invisibles par les autres méthodes d'imagerie, et le patient n'est pas exposé à des rayonnements ionisants.

Malheureusement, on ne peut pas obtenir d'images des poumons par cette méthode : les poumons étant des milieux très hétérogènes, où alternent, à l'échelle du dixième de millimètre, de l'air et des tissus, les fortes variations locales du champ magnétique brouillent les signaux de résonance magnétique nucléaire, qui disparaissent trop rapidement pour être détectés.

Pourtant, en 1994, une équipe américaine présenta les premières images par résonance magnétique de poumons de souris remplis d'un gaz polarisé, le xénon 129. Celles de poumons humains furent obtenues indépendamment, fin 1995, par le même groupe et par une équipe allemande, avec un autre gaz rare, l'hélium 3. Des physiciens du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supé-

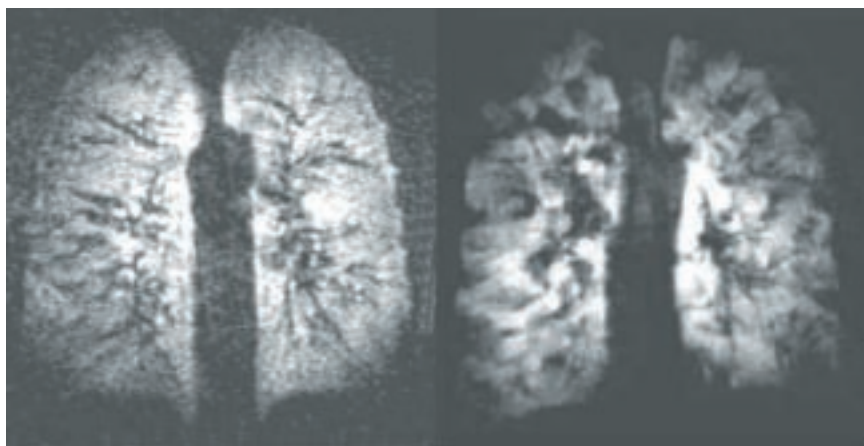
rieure, à Paris, et des physiciens et des médecins de l'Unité de recherche en résonance magnétique médicale de l'Université Paris XI, à Orsay, tentent de perfectionner la méthode.

Pourquoi l'inhalation d'un gaz polarisé améliore-t-elle les images ? Pour obtenir une aimantation détectable, on polarise le gaz avant l'inhalation, par pompage optique : un faisceau laser polarisé est envoyé sur le gaz, dont les atomes absorbent, puis réémettent, des photons. L'énergie absorbée est réémise, mais la polarisation est transférée de la lumière au gaz. Par cette technique, près de 80 pour cent des moments magnétiques s'alignent, contre un sur un million par la méthode classique (l'application d'un champ magnétique intense). Ainsi, bien que la densité du gaz soit faible, la polarisation obtenue est détectable.

Toutefois, le gaz ainsi polarisé n'est pas en équilibre, et perd progressivement sa polarisation : celle-ci disparaît au bout de ce que l'on appelle le temps de relaxation ; ce dernier atteint quelques

heures si le gaz est conservé dans des ampoules en verre spécial (car les verres ordinaires contiennent des ions paramagnétiques qui interagissent avec les atomes du gaz et détruisent leur polarisation), ce qui autorise le transport jusqu'au lieu d'utilisation. Dans les poumons, la polarisation subsiste quelques dizaines de secondes, ce qui suffit pour réaliser les clichés.

Les équipes de Paris et d'Orsay tentent de réduire la taille et les coûts des appareils, et les contraintes imposées par la méthode. Elles ont réalisé cette année les premières images de ventilation pulmonaire dans des champs magnétiques de 0,1 tesla, bien plus faibles que les champs de 1 à 4 teslas habituellement utilisés pour l'imagerie par résonance magnétique classique : pour celle-ci, des champs magnétiques intenses doivent polariser les tissus, tandis qu'avec la nouvelle méthode, les champs magnétiques servent uniquement à la détection des gaz déjà polarisés. En outre, avec le dispositif mis au point par ce groupe, l'hélium 3 est polarisé sur le lieu même de l'examen, et seuls quelques centimètres cubes de ce gaz aimanté sont nécessaires. Les clichés sont effectués en un tiers de seconde, ce qui permettra notamment de réaliser des séries d'images



Wolfgang Knebel

**Images de poumons réalisés à l'Université de Mayence (Allemagne) par résonance magnétique d'hélium 3 polarisé. De telles coupes renseignent sur la ventilation des différentes cavités pulmonaires. Pour un sujet sain (à gauche), cette ventilation est homogène : toutes les zones sont éclairées, car remplies de gaz, et seuls les vaisseaux sanguins apparaissent en sombre. En revanche, l'image des poumons d'un fumeur (à droite) atteint de troubles respiratoires (bronchopathie chronique obstructive et emphysème) présente de nombreuses zones sombres qui ne sont pas, ou pas suffisamment, ventilées.**

qui renseigneront sur la dynamique de ventilation des bronches et des alvéoles. La résolution spatiale, déjà de cinq millimètres, devrait être améliorée.

L'inhalation d'hélium 3 est inoffensive, de sorte que des examens répétés seront possibles, ce que n'autorise pas la scin-

tigraphie (une méthode de visualisation des poumons par des gaz radioactifs inhalés, actuellement utilisée en hôpital). Enfin, une voie de recherche est l'utilisation des gaz polarisés, transportés par la circulation sanguine, comme traceurs pour l'organisme entier.

## En visite

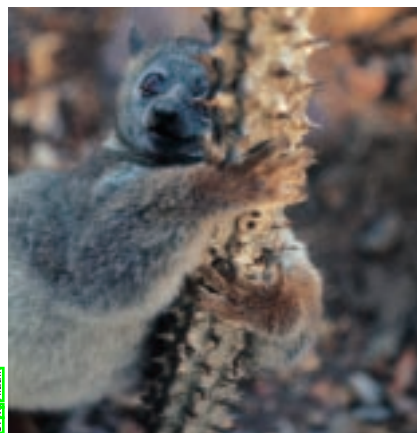
**Les visiteurs des réserves naturelles ne perturbent pas les populations de lémuriens nocturnes.**

L'ouverture au public des réserves naturelles menace-t-elle la faune sauvage ? Au Sud de Madagascar, des zones de forêt-galerie et de bush sont ouvertes aux touristes depuis de nombreuses années. Pendant la journée, les visiteurs jouissent du spectacle fascinant offert par les lémuriens diurnes makis (*Lemur catta*) et par les propitèques (*Propithecus verreauxi*) ; la nuit, des guides qui connaissent bien la faune sauvage leur montrent, dans le faisceau d'une lampe, les microcèbes (*Microcebus murinus*) et les lépilémurs (*Lepilemur leucopus*). Claude-Marcel Hladik et Bruno Simmen, du CNRS et du Muséum national d'histoire naturelle, ont comparé des estimations des densités de prosimiens nocturnes aux mesures qui avaient été faites sur les mêmes lieux il y a 30 ans : les diverses populations sont stables.

Dans la forêt-galerie qui s'étend sur quelques centaines de mètres de part

et d'autre du fleuve Mandrare, le lépilémur est le mammifère le plus abondant. Ce prosimien nocturne d'environ 600 grammes était très abondant en 1970.

Les éthologistes ont repris les itinéraires le long desquels les lépilémurs avaient été recensés en 1970. Dans chaque cas, les observations ont été effectuées à la lampe frontale, en début de nuit, après le réveil des animaux qui s'activent alors à la recherche de nourriture ; c'est à cette période que des cris territoriaux sont fréquemment échangés, ce qui facilite le repé-



C. M. Hladik

**Le bush de Berenty, à Madagascar, est occupé par le lémurien *Lepilemur leucopus*. Cet animal n'est apparemment pas gêné par les touristes.**

rage des individus. Les plus fortes densités de lépilémurs étaient de 810 individus par kilomètre carré en 1970, contre 790 individus par kilomètre carré en 1997. Dans le bush, où les densités avaient été calculées par marquage de tous les animaux d'une petite population, les observations de 1997 ont révélé, d'après la localisation des cris territoriaux, la présence de lépilémurs dans des territoires individuels dont la superficie semble tout à fait comparable à celle qui avait été mesurée en ce même lieu, il y a 27 ans.

Quelques sorties nocturnes ont également montré la relative constance des populations de microcèbes dans le bush (où des arbres isolés poussent au milieu d'un couvert composé de buissons serrés). À Rapily, dans une zone mise en réserve pour la protection des tortues, les zoologistes ont estimé la densité de *Microcebus murinus* à 240 individus par kilomètre carré. Cette partie du bush n'est pas exactement comparable à la zone plus reculée de Bébarimo, sur socle cristallin, où les relevés de 1970 indiquaient la présence de 360 microcèbes par kilomètre carré, mais les densités restent du même ordre de grandeur : avec quelques précautions, les lémuriens supportent la présence humaine.

## La prolifération nucléaire

*Les essais nucléaires de l'Inde et du Pakistan démontrent qu'il est facile de fabriquer des armes nucléaires avec les combustibles produits par les centrales nucléaires civiles.*

Les 11 essais du mois de mai 1998 traduisent la tension entre deux pays qui se sont affrontés à trois reprises au cours de leurs 51 années d'existence en tant que nations indépendantes. Depuis des lustres, les experts présumaient que l'Inde et le Pakistan s'étaient dotés d'un arsenal nucléaire, et les essais récents ont confirmé l'impossibilité de limiter la prolifération nucléaire. Les différentes solutions utilisées pour la confection des bombes reflètent la facilité avec laquelle les bombes thermonucléaires peuvent être bricolées. Le moratoire nucléaire actuel est fragile quand un nombre toujours plus grand de pays sont dotés de centrales nucléaires civiles produisant des combustibles nucléaires, plutonium, tritium et uranium.

Depuis les années 1950, l'Inde et le Pakistan ont développé leur programme nucléaire civil sous les auspices internationaux du programme *l'Atome pour la paix*. Les États Unis fournirent à l'Inde les plans, le savoir-faire et les dispositifs majeurs pour le retraitement du combustible des réacteurs, mis en œuvre dans une usine à Trombay, au Nord de Bombay.

Le retraitement extraie, pour les réutiliser, les différents éléments du combustible irradié des réacteurs ; l'un d'entre eux, le plutonium 239 est le constituant de base de la plupart des bombes thermonucléaires. Le centre de retraitement de Trombay, construit à la fin des années 1950 et au début des années 1960, utilise le procédé américain *Purex* de séparation du plutonium.

Le plutonium résulte de l'irradiation des combustibles nucléaires dans les réacteurs civils. Le Canada avait livré à l'Inde, à la fin des années 1950, le réacteur de recherche *Cirus* à eau lourde (utilisée comme

ralentisseur de neutrons) où le taux de conversion d'uranium 238 en plutonium 239 est élevé. Avec *Cirus* et l'usine de Trombay, les ingénieurs nucléaires indiens avaient produit suffisamment de plutonium pour fabriquer la bombe atomique qu'ils firent exploser en 1974.

Ce test mit fin à l'aide internationale, mais les scientifiques indiens purent néanmoins construire des réacteurs à eau lourde imités du modèle canadien et des usines de retraitement : en 1985 un réacteur de production de plutonium, dénommé *Dhruva*, était opérationnel à Trombay. Le programme indien incluait également, près de Mysore, un centre de production de tritium, autre combustible des bombes thermonucléaires, et une usine d'enrichissement d'uranium 235.

Mais la production majeure était le plutonium. Les experts estiment que l'ensemble des installations indiennes ont accumulé 1,2 tonne de plutonium, quantité suffisante pour une dizaine, voire une centaine de bombes, selon la technicité atteinte par les spécialistes indiens. L'effort militaire considérable et la grande qualité de leurs scientifiques permirent aux Indiens de maîtriser l'ensemble du cycle nucléaire, de l'extraction de l'uranium à la construction de réacteurs à la pointe de la technique.

Il n'est toutefois pas certain que la troisième bombe indienne ait été une véritable bombe thermonucléaire. La

puissance du test du 11 mai aurait été, aux dires du gouvernement indien, de 43 kilotonnes, mais les experts, au vu des enregistrements sismographiques, pensent que la puissance était moindre, 25 kilotonnes, typique d'une réaction de fission améliorée, plutôt que d'une réaction de fusion. D'autres spécialistes estiment que les Indiens maîtrisent la fusion, mais que la faible puissance de leur test était voulue et qu'ils voulaient parfaire leur maîtrise de la technique, plus difficile à contrôler sur des bombes de faible puissance.

Le programme nucléaire pakistanais utilise plus systématiquement l'uranium 235. Cet isotope de l'uranium ne constitue que 0,72 pour cent de l'uranium naturel et cette teneur est augmentée dans des usines d'enrichissement. La séparation isotopique est réalisée par centrifugation dans le Centre de recherche de Kahuta, près de Islamabad. Le père de la bombe pakistanaise, Abdul Qadeer Khan, s'était procuré les plans des centrifugeuses mises au point par une société hollandaise, *Ultra-Centrifuge*, dans les années 1970.

La masse critique d'uranium nécessaire pour la confection d'une bombe est beaucoup plus élevée que la masse critique de plutonium, et la fabrication de missiles nucléaires avec des bombes à uranium est plus difficile. Pour les bombes pakistanaises de type chinois, de conception rudimentaire, il fallait au moins 15 kilogrammes d'uranium de qualité militaire (enrichi en uranium 235 à plus de 93 pour cent), alors que pour les bombes à plutonium il suffit de trois à six kilogrammes de produit fissile. Les militaires américains estiment que les Pakistanais ont suffisamment d'uranium pour fabriquer une trentaine de bombes par an et que leur possibilité d'enrichissement correspond à cinq bombes par an. De plus, les programmes de construction de réacteurs et de centres de retraitement pourraient amener les Pakistanais à produire annuellement 10 à 15 kilogrammes de plutonium.

Les efforts diplomatiques tendent à persuader ces nouvelles puissances nucléaires de signer le traité de non-prolifération et de les amener à renoncer à placer leurs charges sur des missiles. À court terme, ces espoirs semblent ténus.



Titre de ce journal pakistanais publié après les essais nucléaires : « Nous détruirons l'Inde ».

Glenn ZORPETTE et Tim BEARDSLEY



# La neurobiologie de la dépression

CHARLES NEMEROFF

*Une meilleure compréhension des bases biologiques de cette maladie, souvent fatale, devrait conduire à de nouveaux traitements.*

**D**ans *Le choix de Sophie*, William Styron a remarquablement décrit la dépression : «Le psychiatre me demanda si j'avais des pensées suicidaires, et je finis par lui répondre par l'affirmative. Je ne lui avouai pas que je voyais désormais les objets qui m'entouraient comme des instruments possibles d'autodestruction : les poutres du grenier ou les érables du jardin me servaient à me prendre, le garage était un endroit pour inhaler du monoxyde de carbone, la baignoire recevait le sang s'écoulant de mes artères ouvertes. Les couteaux de cuisine, dans leurs tiroirs, n'avaient plus qu'une seule fonction pour moi. J'aurais voulu mourir d'une crise cardiaque, car ainsi je n'aurais pas eu à forcer le sort. Je pourrais essayer d'attraper une pneumonie en me promenant en forêt, sous une pluie glacée, en manches de chemise. J'avais aussi envisagé de traverser l'autoroute, toute proche, devant un camion.»

W. Styron fait bien comprendre que la dépression diffère d'une mélancolie passagère ou du chagrin lié à un deuil. C'est une maladie handicapante et dangereuse, caractérisée par de nombreux symptômes qui s'ajoutent à une tristesse permanente. Notamment les personnes dépressives ont des pensées suicidaires, mais aussi un sentiment de culpabilité. Elles se sentent inutiles, leur pensée est confuse, leurs souvenirs sont flous et elles ne prennent plaisir à rien. Elles sont parfois anxieuses, sans énergie ; elles mangent et dorment peu ou, au contraire, à l'excès.

Quelles sont les causes de la dépression ? Des expériences traumatisantes ? Des sentiments de dépréciation du soi ? Des mécanismes biologiques ? Quel

que soit le facteur déclenchant, le cerveau étant le support de l'esprit, la dépression engendre finalement des modifications biochimiques du cerveau, qui sont responsables de la tristesse profonde et des autres caractéristiques de la maladie. Si l'on ignore encore l'étendue de ces perturbations, les progrès sont rapides.

Les neurobiologistes qui étudient la dépression sont un peu comme des aveugles qui palperaient les différentes parties d'un éléphant afin de l'identifier. Pis encore, c'est comme si certains examinaient des éléphants et d'autres des éléphants adultes : les anomalies biochimiques ne sont pas identiques dans toutes les dépressions. Toutefois, les principales caractéristiques biologiques de la dépression commencent à se préciser ; les malades devraient en bénéficier, car le diagnostic, les traitements et la prévention en seront améliorés.

## Le lourd tribut de la dépression

Pour progresser, les psychiatres cherchent également à répertorier les caractéristiques de la maladie qui varient selon les malades, car ils espèrent mettre au point des traitements plus spécifiques et mieux ciblés : chez certains, l'activité de neuromédiateurs (des molécules transmettant des signaux d'un neurone à un autre) est réduite ; chez d'autres, l'activité hormonale est excessive (les hormones circulent dans le sang et agissent parfois très loin du site de leur production). Simultanément, la psychiatrie cherche des marqueurs biologiques simples qui indiqueraient le type exact de maladie

qui frappe chaque patient : la concentration sanguine en certaines molécules ou la modification de certaines aires cérébrales, aisément visualisables.

Ayant détecté l'un de ces marqueurs chez un malade dépressif, un psychiatre pourrait prescrire un traitement adapté à l'anomalie biologique identifiée, tout comme un médecin recherche la présence de streptocoques chez un patient qui a mal à la gorge et, si nécessaire, lui prescrit ensuite l'antibiotique qui lutte spécifiquement contre le microbe détecté. Aujourd'hui, on n'en est pas là : les psychiatres sélectionnent intuitivement ou par approximations successives le médicament efficace pour chaque malade dépressif, mais cette longue stratégie est parfois fatale aux personnes suicidaires. La psychothérapie est un complément souvent nécessaire, mais insuffisant, surtout quand la dépression est très grave.

Bien que les antidépresseurs actuels aient moins d'effets secondaires que les médicaments antérieurs et qu'ils soient souvent très utiles, le tribut à payer à la dépression reste trop lourd. On estime que 5 à 12 pour cent des hommes et 10 à 20 pour cent des femmes ont un épisode dépressif notable à un moment de leur vie. La moitié d'entre eux ont plusieurs crises, et jusqu'à 10 pour cent traversent des phases maniaques, qui s'ajoutent aux dépressions (c'est la maladie maniaco-dépressive ou maladie bipolaire). Les personnes maniaques dorment peu,

**1. CE TABLEAU du Vieil homme tenant sa tête entre ses mains (à droite) a été dessiné par Vincent Van Gogh en 1882 ; il ressemble au Vieil homme triste, peint en 1889. Van Gogh fut lui-même dépressif pendant une bonne partie de sa vie. Il se donna la mort en 1890.**



Van Gogh Museum, Amsterdam / Van Gogh Foundation, Amsterdam

parlent vite, ont des idées de grandeur, sont hyperactives, conduisent dangereusement, dépensent sans compter et multiplient les aventures amoureuses.

Enfin, chaque année, 15 pour cent des personnes dépressives ou maniaco-dépressives se donnent la mort. Dans les pays industrialisés, le suicide est la neuvième cause de décès (près de 12 000 en 1995, en France). Les statistiques sont vraisemblablement sous-estimées : d'une part, la cause du décès n'est pas toujours mentionnée sur les certificats de décès, sinon les familles ne pourraient toucher certaines primes d'assurance ; d'autre part, certains accidents de la route sont des suicides maquillés. De surcroît, la dépression augmente aussi le risque de décès après une crise cardiaque ou un accident vasculaire cérébral. Elle réduit souvent la qualité (et peut-être la durée) de vie des patients cancéreux.

### Les premiers antidépresseurs

La dépression et la maladie maniaco-dépressive sont souvent familiales : des parents proches (enfants, parents, frères et sœurs) des personnes souffrant de dépressions ou de maladie maniaco-dépressives graves ont plus de risques

que la moyenne de la population d'avoir la même maladie (ou une maladie proche). Les études réalisées sur les jumeaux confortent l'hypothèse d'une composante génétique : la probabilité qu'un jumeau soit dépressif ou maniaco-dépressif quand l'autre jumeau l'est est plus grande pour les vrais jumeaux que pour les faux jumeaux (qui ne se ressemblent pas plus que des frères et sœurs).

Depuis une vingtaine d'années, les biologistes recherchent d'éventuelles anomalies génétiques, mais sans succès, peut-être parce que plusieurs gènes prédisposent à la dépression et que la contribution de chacun est si faible qu'on la détecte très difficilement.

La maladie maniaco-dépressive est fréquente chez les Amishs, une communauté fermée des environs de Philadelphie. Une vaste étude de ce groupe semblait avoir révélé qu'une ou plusieurs anomalies génétiques du chromosome 11 prédisposaient à la maladie maniaco-dépressive, mais les résultats n'ont pas été confirmés. Un gène localisé sur le chromosome X jouerait un rôle dans certains cas, mais pas dans la plupart des cas étudiés. Des études plus récentes ont révélé que diverses régions du chromosome 18 et un site sur le chromosome 21 participeraient

à la susceptibilité à la maladie, mais leurs résultats n'ont pas encore été reproduits.

Tandis que ces études génétiques se poursuivent, des biologistes s'intéressent à la neurochimie de la maladie et, notamment, aux neuromédiateurs. Ainsi, de nombreuses dépressions semblent résulter, du moins en partie, de perturbations des circuits cérébraux qui utilisent un type particulier de neuromédiateurs : les monoamines. Ces dérivés d'acides aminés sont la sérotonine, la noradrénaline et la dopamine (les deux premiers sont particulièrement mis en cause).

Dès les années 1950, les biologistes ont incriminé les monoamines, parce qu'ils ont observé que 15 pour cent environ des personnes hypertendues devenaient gravement dépressives quand elles étaient traitées par la réserpine. Or, cette substance diminue les concentrations en monoamines dans les neurones. Simultanément, des médecins notèrent qu'un des médicaments prescrits contre la tuberculose améliorait l'humeur de personnes dépressives. Or, l'enzyme monoamine oxydase détruit les monoamines dans les neurones ; la substance antituberculeuse inhibe la dégradation enzymatique, de sorte qu'elle protège les monoamines, leur permet d'être actives plus longtemps dans le cerveau et, par conséquent, améliore l'état des personnes dépressives. Comme la dépression semblait ainsi résulter d'une baisse des concentrations cérébrales en monoamines, on se mit à rechercher des inhibiteurs de la monoamine oxydase et l'on découvrit les premiers médicaments antidépresseurs.

### Le rôle de la noradrénaline

Certaines monoamines ont-elles un rôle prépondérant ? Au cours des années 1960, à l'Université de Harvard, Joseph Schildkraut supposa que la noradrénaline était le principal responsable. Dans son hypothèse, dite des catécholamines, il postulait que la dépression résulte d'un déficit en noradrénaline (qui appartient à la classe des catécholamines) dans certains circuits cérébraux, tandis que la manie, ou phase maniaque de la maladie maniaco-dépressive, résultait au contraire d'un excès de noradrénaline. Plusieurs expériences ont confirmé que la baisse de la concentration en noradrénaline suscite fréquemment un état dépressif. Les neu-

## Les symptômes d'une dépression grave

Les psychiatres considèrent généralement qu'une personne souffre d'une dépression quand elle présente au moins cinq des symptômes suivants, presque tous les jours pendant au moins deux semaines. Les symptômes doivent inclure au moins un des deux premiers critères, doivent provoquer une détresse notable ou perturber la vie quotidienne, et ne résulter ni de la prise de médicaments, ni de la consommation de drogues, ni d'une maladie (par exemple un dysfonctionnement de la thyroïde), ni d'un deuil.

Humeur déprimée presque toute la journée (chez les enfants et chez les adolescents, la dépression se traduit parfois par une très grande irritabilité).

Absence d'intérêt ou de plaisir pour la quasi-totalité des activités quotidiennes.

Augmentation ou diminution notable de la prise alimentaire.

Insomnie ou sommeil excessif.

Agitation (par exemple, torsion des mains) ou lenteur des mouvements.

Fatigue ou perte d'énergie.

Sentiments d'inutilité ou de culpabilité excessifs.

Indécision ou difficulté à penser ou à se concentrer.

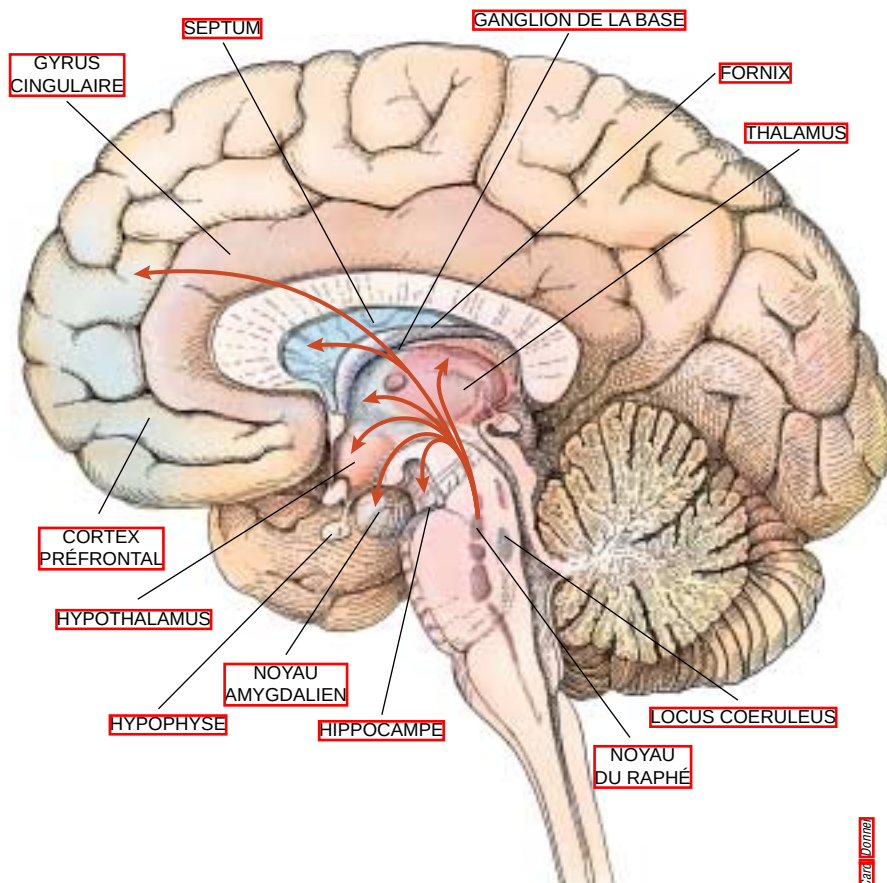
Idées récurrentes de suicide ou pensées morbides.

rones noradrénergiques, ceux qui libèrent la noradrénaline, sont localisés dans le tronc cérébral, surtout dans le locus coeruleus, et ils ont des prolongements vers de nombreuses régions du cerveau, dont le système limbique, un groupe d'aires corticales et sous-corticales, qui ont un rôle essentiel dans la régulation des émotions.

Comment agissent la noradrénaline et les autres monoamines ? À chaque connexion entre deux neurones, ou synapse, les monoamines, comme tous les neuromédiateurs, sont libérées par le neurone présynaptique ; elles diffusent dans la fente synaptique, c'est-à-dire l'espace qui sépare le neurone présynaptique du neurone postsynaptique, et viennent se lier à leurs récepteurs, à la surface du neurone postsynaptique. L'activation des récepteurs modifie l'état des neurones postsynaptiques, ce qui les active ou les inhibe. L'effet d'un neuromédiateur dépend de la nature et de la concentration de ses récepteurs sur le neurone postsynaptique. La sérotonine, par exemple, a plus de 13 récepteurs, plus ou moins sensibles, dont l'activation déclenche des effets différents.

L'influence des neurones présynaptiques sur les neurones postsynaptiques dépend aussi de la quantité de neuromédiateur libéré par le neurone présynaptique et par la durée de son séjour dans la fente synaptique, valeurs qui sont déterminées par deux types de molécules portées par le neurone présynaptique : les autorécepteurs et les transporteurs. Quand des molécules de noradrénaline libérées dans une synapse se lient à leur autorécepteur, elles l'activent, ce qui ralentit l'activité électrique du neurone présynaptique et, par conséquent, la libération du neuromédiateur. Les transporteurs recaptent les molécules de neuromédiateur libérées dans la fente synaptique et assurent leur recyclage dans le neurone présynaptique : c'est la recapture. L'enzyme intracellulaire monoamine oxydase module aussi la concentration synaptique en neuromédiateur : elle dégrade les monoamines, diminuant la quantité des molécules qui seront libérées.

Comment sait-on qu'une diminution de la concentration synaptique en noradrénaline entraîne une dépression ? Les neurobiologistes ont dosé des marqueurs indirects de la concentration cérébrale en noradrénaline, par exemple les concentrations de ses méta-



**2. PLUSIEURS AIRES CÉRÉBRALES** participant à l'humeur et à la régulation de l'appétit, du sommeil, du désir sexuel et de la mémoire sont perturbées chez les personnes dépressives. Hormis l'hypophyse, toutes ces aires font partie de ce que l'on nomme le système limbique ; elles reçoivent, normalement, des signaux en provenance des neurones qui sécrètent de la sérotonine ou de la noradrénaline. Une baisse de l'activité des circuits sérotoninergiques ou noradrénergiques favoriserait l'installation d'un état dépressif. On a indiqué certains circuits sérotoninergiques (les flèches rouges). Les corps cellulaires des neurones noradrénergiques sont localisés dans le locus coeruleus.

bolites, dans des milieux plus facilement accessibles, tels les urines ou le liquide céphalo-rachidien : ces concentrations sont souvent inférieures à la normale chez les personnes dépressives. De surcroît, l'analyse du cerveau de personnes dépressives qui se sont suicidées a révélé une densité anormalement élevée de récepteurs corticaux de la noradrénaline.

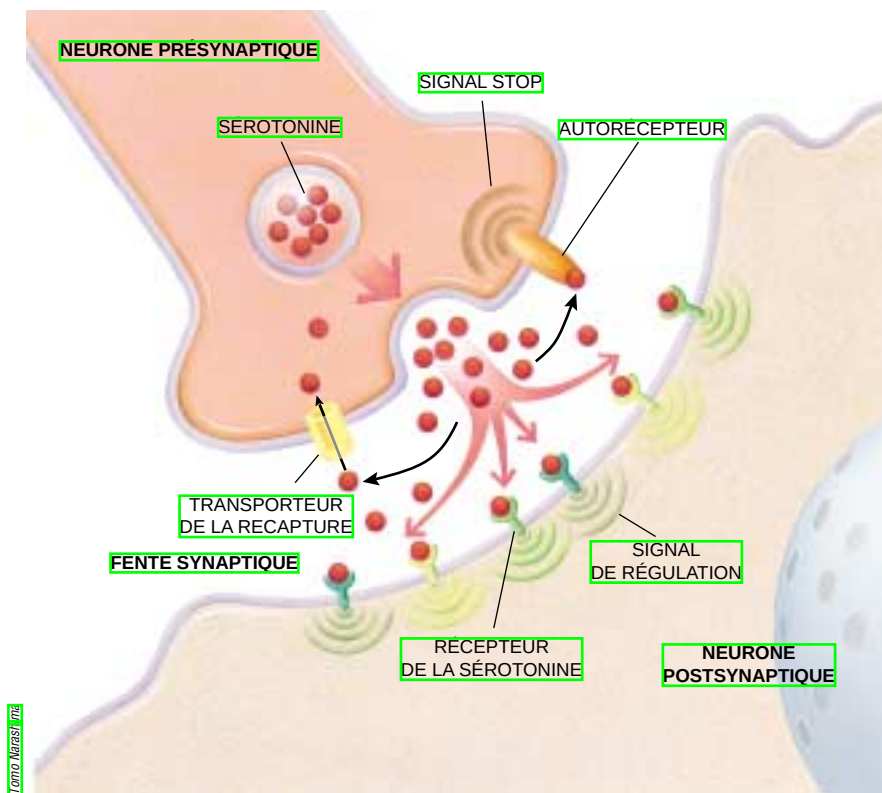
Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'activation des circuits nerveux n'est pas meilleure quand les récepteurs sont plus nombreux : lorsque les molécules de neuromédiateurs se raréfient trop dans les synapses, les neurones postsynaptiques compensent ce manque en augmentant le nombre de récepteurs, captant ainsi toute molécule de neuromédiateur disponible.

De fait, certaines substances qui bloquent sélectivement la recapture de la noradrénaline et augmentent ainsi sa concentration dans les synapses sont

de puissants antidépresseurs. Dans plusieurs pays, la reboxetine, un inhibiteur de la recapture de la noradrénaline, a reçu une autorisation de mise sur le marché et est administrée aux personnes dépressives.

## De la noradrénaline à la sérotonine

Si le rôle de la noradrénaline a été établi le premier, celui de la sérotonine s'est confirmé au cours des années 1990, quand on a mieux compris l'efficacité du Prozac (la fluoxétine) et des antidépresseurs apparentés, qui modifient la concentration en sérotonine. Les travaux sur le rôle de la sérotonine dans les troubles de l'humeur ont commencé il y a une trentaine d'années : on postula alors que la diminution de la concentration synaptique en sérotonine serait une autre cause de la dépression, car elle aboutirait à une diminution de la concentration en noradrénaline.



L'OTTO MARESI / JPL

**3. LA SÉROTONINE** (les sphères rouges) sécrétée par un neurone présynaptique se lie à ses récepteurs (en vert) sur le neurone postsynaptique, augmentant ou inhibant l'activité de ce neurone. La réaction dépend de la quantité de sérotonine présente dans la fente synaptique et du type de récepteur sur lequel se fixe la sérotonine (il en existe plus de 13). La concentration synaptique en sérotonine est contrôlée par deux types de molécules présynaptiques : les autorécepteurs (en orange), qui inhibent la production de la sérotonine par le neurone présynaptique, et les transporteurs (en jaune), qui « pompent » le neuromédiateur de la fente synaptique vers l'intérieur du neurone présynaptique. Plusieurs antidépresseurs, tel le Prozac, augmentent la concentration synaptique en sérotonine, parce qu'ils inhibent sa recapture.

Des anomalies des circuits cérébraux où le neuromédiateur utilisé est la sérotonine semblent ralentir la transmission des signaux par la noradrénaline. Les corps cellulaires des neurones sérotoninergiques (qui libèrent de la sérotonine) sont localisés dans les noyaux du raphé, dans le tronc cérébral, et ont des prolongements jusque dans diverses régions du système nerveux central, notamment dans celles qui libèrent la noradrénaline (ou commandent sa libération). Comme les neurones sérotoninergiques activent de nombreuses régions du cerveau, tels les noyaux amygdaliens (qui commandent les émotions), l'hypothalamus (qui contrôle l'appétit, la libido et le sommeil) et les aires corticales de la cognition, une diminution de la concentration en sérotonine pourrait favoriser l'apparition de la dépression.

On a vérifié cette hypothèse par diverses mesures biochimiques : on a notamment mesuré que le liquide céphalo-rachidien des personnes

dépressives et, surtout, des personnes suicidaires contient des quantités anormalement faibles d'un des principaux produits de dégradation de la sérotonine (cela signifie que la concentration cérébrale en sérotonine est aussi inférieure à la normale). De surcroît, la concentration d'un type de molécules de surface, spécifiques des neurones sérotoninergiques, est inférieure à la normale chez les personnes dépressives, ce qui montre que le nombre de neurones sérotoninergiques est anormalement bas. Enfin, la densité d'au moins un type de récepteurs de la sérotonine est supérieure dans le tissu cérébral de patients dépressifs qui se sont suicidés ; comme dans le cas des récepteurs de la noradrénaline, cette abondance est une réaction à une libération insuffisante de sérotonine dans la fente synaptique.

D'autres observations confirment le rôle de la sérotonine : les substances qui bloquent la recapture de la sérotonine par les transporteurs des neu-

rones présynaptiques, prolongeant la présence du neuromédiateur dans la fente synaptique, améliorent l'état de certaines personnes dépressives. En outre, vers la fin des années 1950, on découvrit l'action des antidépresseurs tricycliques (ainsi nommés parce qu'ils contiennent trois cycles aromatiques), mais on ignorait leur mécanisme d'action. On découvrit ultérieurement qu'ils inhibent notamment la recapture de la sérotonine, de sorte que la concentration en ce neuromédiateur augmente dans la fente synaptique.

## Les inhibiteurs de la recapture

L'effet antidépresseur des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine, soupçonné depuis longtemps, n'a été confirmé qu'à la fin des années 1980, avec la mise au point du Prozac et d'autres médicaments, tels le Zoloft (la sertraline), le Floxyfral (la fluvoxamine), le Seropram (le citalopram) et le Deroxat (la paroxétine), qui bloquent spécifiquement le transporteur de la sérotonine. Ces inhibiteurs sélectifs ont bouleversé le traitement de la dépression, car ils sont très efficaces et ont moins d'effets secondaires que les médicaments plus anciens. Les antidépresseurs les plus récents, telle la venlafaxine, bloquent à la fois la recapture de la sérotonine et de la noradrénaline.

Nos études de la sérotonine ont également révélé pourquoi les personnes dépressives ont plus de crises cardiaques et d'accidents vasculaires cérébraux que la moyenne. Toute activation anormale des plaquettes sanguines et de leur agglutination aboutit à la formation de caillots, qui risquent de boucher les vaisseaux sanguins et de bloquer l'irrigation du cœur et du cerveau. Or, nous avons observé que les plaquettes des personnes dépressives sont activées très facilement, notamment – semble-t-il – par la sérotonine, qui sensibilise les plaquettes à d'autres stimulus plus puissants. En outre, les plaquettes des personnes dépressives portent moins de transporteurs de la sérotonine que celles des personnes saines : elles sont stimulées en permanence par la sérotonine, qui stagne dans leur environnement au lieu d'être recaptée.

Si la dépression est associée à des anomalies des circuits nerveux, les malades ont également des concen-

trations en certaines hormones anormales, parce que les circuits cérébraux commandant la sécrétion de ces hormones fonctionnent mal.

## Les anomalies hormonales

L'hypothalamus est une structure cérébrale essentielle pour la régulation hormonale : il synthétise des peptides (de petites chaînes d'acides aminés) qui agissent sur l'hypophyse, à la base du cerveau, modulant la libération de diverses hormones dans le sang. Ces hormones, notamment l'hormone de croissance, l'hormone de stimulation de la thyroïde (TSH) et l'hormone corticotrope (ACTH), commandent, elles-mêmes, la libération d'autres hormones (par d'autres glandes endocrines dispersées dans l'organisme). Les hormones libérées en réaction aux hormones hypophysaires agissent en dehors du système nerveux, mais elles exercent aussi une rétroaction négative sur l'hypophyse et sur l'hypothalamus : délivrant des signaux inhibiteurs, elles évitent l'emballement du circuit hormonal.

On sait que les personnes dépressives sont souvent insensibles à diverses substances qui, normalement, stimulent la libération de l'hormone de croissance ou réagissent bizarrement à l'hormone hypothalamique qui, normalement, déclenche la sécrétion de l'hormone de stimulation de la thyroïde par l'hypophyse. Enfin, si certaines personnes ne réagissent pas aux antidépresseurs, c'est qu'elles ont une insuffisance thyroïdienne.

L'effet hormonal le mieux connu, chez les personnes dépressives, est la dérégulation de l'«axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien», c'est-à-dire le système composé de l'hypothalamus, de l'hypophyse, des glandes surrénales (localisées au-dessus des reins) et de leurs hormones ; ce système commande les réactions au stress de l'organisme. Lors d'une menace physique ou psychique, l'hypothalamus amplifie la production du facteur de libération de l'hormone corticotrope, le CRF, ce

qui provoque la libération d'ACTH par l'hypophyse. L'ACTH déclenche alors la libération de cortisol par les glandes surrénales. L'ensemble de ces réactions interrompt les activités métaboliques secondaires et prépare l'organisme à lutter ou à fuir. Ainsi, le cortisol aug-

mente l'apport énergétique aux muscles, tandis que le CRF réduit l'appétit et l'activité sexuelle, et augmente la vigilance. Toutefois, une activation chronique de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien semble favoriser la dépression.

Vers la fin des années 1960 et le début des années 1970, plusieurs équipes avaient déjà montré que la concentration en cortisol était supérieure à la normale dans les urines, dans le sang et dans le liquide céphalo-rachidien des personnes dépressives : l'axe hypothalamo-hypophysaire était hyperstimulé. Des centaines d'autres études ont confirmé cette hyperactivité chez de nombreuses personnes dépressives (surtout chez les plus gravement atteintes).

Les endocrinologues qui ont analysé cette hyperactivité ont découvert que toutes les étapes de l'axe peuvent être perturbées chez les personnes dépressives. Ainsi, l'hypophyse et les glandes surrénales sont plus grosses que la normale, et les glandes surrénales sécrètent plus de cortisol. Les neurones qui libèrent l'hormone CRF, notamment dans l'hypothalamus, semblent en grande partie responsables de l'hyperactivité de l'axe et de l'apparition des symptômes dépressifs.

On a relevé plusieurs anomalies liées à l'hormone CRF chez les personnes dépressives : sa concentration dans le liquide céphalo-rachidien est supérieure à celle des témoins ou des personnes ayant d'autres troubles psychiatriques ; les antidépresseurs et les électrochocs réduisent cette concentration ; le nombre des neurones qui libèrent l'hormone CRF dans l'hypothalamus et l'expression du gène CRF (qui commande la production de l'hormone) sont anormalement élevés dans le tissu cérébral de personnes dépressives décédées ; enfin, l'administration de CRF dans le cerveau d'animaux de laboratoire déclenche des comportements caractéristiques de la dépression chez l'homme, c'est-à-dire des insomnies, une diminution de l'appétit et du comportement sexuel, et une anxiété.

### Effets de l'administration de CRF dans le cerveau d'animaux de laboratoire

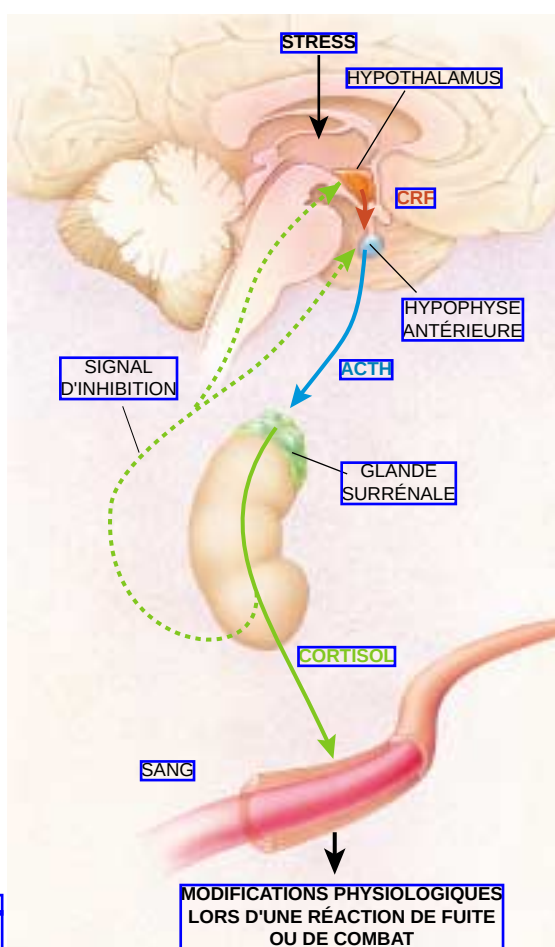
#### BAISSE

Appétit,  
Sommeil,  
Comportement sexuel

#### AUGMENTATION

Activité incessante  
dans les environnements  
familiers

Méfiance exacerbée  
dans les environnements  
nouveaux



**4. LE SYSTÈME HORMONAL** connu sous le nom d'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien est activé par un stress (les flèches continues). Or, une suractivation chronique de ce système et, notamment, la surproduction du facteur de libération de l'hormone corticotrope (CRF) favorisent l'apparition de la dépression. Ainsi, des animaux de laboratoire dans le cerveau desquels on a injecté de l'hormone CRF ont des symptômes identiques (ci-dessus) à ceux des personnes dépressives.

## Enfance et dépression

Les neurobiologistes n'ont pas encore établi un mécanisme global de la dépression, mais ils ont élaboré un scénario partiel de la maladie chez les personnes dont l'enfance a été traumatisante. Selon cette hypothèse, que je nomme le modèle stress-diathèse des troubles de l'humeur, des expériences psychologiquement traumatiques (le stress) interagissent avec les prédispositions génétiques (la diathèse).

Si la dépression touche parfois plusieurs membres d'une même famille, c'est sans doute que certains facteurs génétiques diminuent le «seuil de résistance» à la dépression. Ces facteurs génétiques diminuent sans doute directement ou indirectement les concentrations en monoamines dans les synapses, ou augmentent la réactivité au stress de l'axe hypothalamo-hypophysaire. Un stress notable, déclenché par des traumatismes de la petite enfance, abaisserait le seuil de résistance à la dépression (lequel n'aurait peut-être pas été assez bas pour déclencher la maladie en l'absence de stress).

Nous pensons que les traumatismes déclenchent des réactions de stress et provoquent une activation permanente des neurones libérant la CRF, qui réagissent au stress et sont hyperactifs chez les personnes dépressives. Quand cette hyperactivité persiste jusqu'à l'âge adulte, les neurones, trop sensibles, réagissent violemment, même à des traumatismes mineurs ; chez des personnes qui sont, en plus, génétiquement prédisposées, la dépression s'installe alors, avec ses réactions neuroendocrines et comportementales caractéristiques.

Pour tester l'hypothèse stress-diathèse, nous avons séparé des rats nouveau-nés de leur mère pendant de brèves périodes, durant les trois premières semaines qui suivent la naissance, avant de les laisser grandir dans des colonies normales de rats, après le sevrage. Devenus adultes, ces rats qui ont été privés de soins maternels ont des neurones à CRF anormaux et présentent les anomalies décelées chez les personnes dépressives : la libération d'ACTH déclenchée par le stress est supérieure à la normale, tout comme la concentration en CRF dans plusieurs zones cérébrales. Les concentrations en corticostérone (le cortisol du rat) sont aussi supérieures

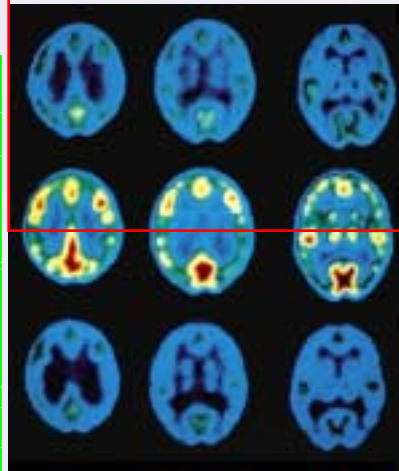
## L'apport de l'imagerie

**A**u cours des 15 dernières années, l'imagerie du cerveau a tant progressé qu'elle complète les autres méthodes d'exploration des anomalies neurobiologiques de la dépression. Ces méthodes fournissent des marqueurs anatomiques ou fonctionnels de la susceptibilité à la maladie.

L'imagerie par résonance magnétique et les autres systèmes de visualisation des structures cérébrales ont fourni de nombreuses informations. Les images de la substance blanche sous-corticale des personnes maniaque-dépressives, surtout des plus âgées, ont révélé une activité particulière dans certaines régions du cerveau qui contrôlent l'humeur (par exemple les ganglions de la base, le thalamus et le tronc cérébral). Cette activité indique généralement une perte neuronale, mais on ignore quel type de neurones est atteint.

De surcroît, le volume de diverses structures cérébrales est inférieur à la normale chez les personnes dépressives chroniques : c'est le cas de l'hippocampe, qui fait partie du système limbique (des structures cérébrales qui participent aux émotions et à la mémoire). Ainsi, d'après une étude réalisée sur des femmes âgées dépressives chroniques, leur hippocampe était plus petit que celui de femmes non dépressives du même âge. Ce résultat confirme des données obtenues sur l'animal : une sécrétion excessive et chronique de cortisol (c'est le cas chez de

nombreuses personnes dépressives) détruit des neurones de l'hippocampe. On ignore encore comment la perte de neurones de l'hippocampe (ou d'autres régions) est associée à la dépression, mais certains de ces neurones seraient des neurones sensibles à la sérotonine ou à la noradrénaline. Or, une diminution de la sérotonine ou de la noradrénaline favorise l'apparition de la dépression.



**COUPES EN TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS** du cerveau d'une personne qui passe de façon cyclique d'un état dépressif (en haut) à un état d'euphorie excessive (au milieu) et, à nouveau, à un état dépressif (en bas). L'état d'activation du cerveau diffère selon l'état. La couleur bleue indique une activité faible, puis le vert, le jaune et le rouge des activités croissantes.

à la normale : l'expression du gène du CRF et, par conséquent, la production de CRF seraient augmentées de façon permanente chez les rats privés de soins maternels.

Nous avons également observé une augmentation de la densité des récepteurs de l'hormone CRF dans certaines régions cérébrales de ces rats. Généralement, le nombre de récepteurs d'une substance augmente pour compenser la baisse de la concentration de cette substance. Toutefois, ici, le nombre des récepteurs de l'hormone CRF augmente malgré une augmentation de cette concentration, ce qui empire encore la situation : une surabondance de récepteurs potentialise l'action du CRF, augmentant ainsi les risques de déclencher une dépression.

Mon collègue Paul Plotsky a récemment montré qu'un traitement par un des inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine (Deroxate) normalise

la concentration en CRF, compense l'augmentation de la sensibilité ou du nombre des récepteurs (la production de corticostérone se normalise) et améliore le comportement (les rats sont moins peureux).

Nous ignorons encore comment ces inhibiteurs normalisent l'axe hypothalamo-hypophysaire, mais nous savons aujourd'hui qu'ils sont efficaces chez les personnes dépressives qui ont eu une enfance difficile. Toutes les anomalies de l'hormone CRF et de l'axe hypothalamo-hypophysaire réapparaissent à l'arrêt du traitement, lequel ne doit pas être interrompu chez les personnes dépressives, pour qu'elles ne rechutent pas.

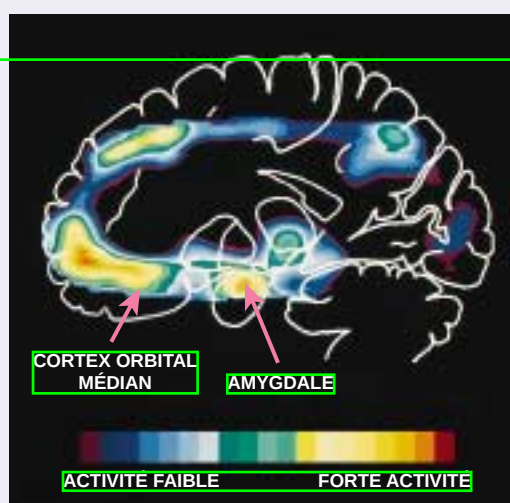
L'étude de macaques, plus proches de l'homme que les rats, a confirmé ces résultats. Pendant les trois mois qui ont suivi la naissance des jeunes, on les a placés avec leur mère dans des cages où la nourriture était soit abondante,

D'autres techniques d'imagerie analysent le fonctionnement du cerveau, révélant par exemple les zones actives lorsqu'une personne se repose ou accomplit une tâche particulière. Ainsi, la tomographie par émission de positons a montré que l'activité de plusieurs aires limbiques et corticales diffère chez les personnes gravement dépressives et chez les personnes saines. De surcroît, chez une même personne passant rapidement d'un état dépressif à un état maniaque, l'image cérébrale obtenue par tomographie par émission de positons change. Ces travaux ont révélé certaines zones cérébrales particulièrement importantes : les personnes chez qui une région du système limbique (le noyau amygdalien de l'hémisphère gauche) est particulièrement active risqueraient davantage de devenir dépressives.

Quand l'imagerie fonctionnelle indiquera aussi les concentrations en neuromédiateurs, on pourra les comparer dans les différentes aires cérébrales d'une même personne ou encore d'une personne à l'autre. Des laboratoires ont mis au point des marqueurs qui se lient au transporteur de la sérotonine (qui «pompe» la sérotonine de la fente synaptique vers l'intérieur du neurone présynaptique) et à l'un des types de récepteurs de la sérotonine ; grâce à ces marqueurs, les neurobiologistes devraient localiser précisément les aires cérébrales où, chez les personnes dépressives, la concentration en sérotonine est anormalement basse, et identifier les sites d'action des antidépresseurs dans le cerveau.

On commence tout juste à utiliser les outils de l'imagerie pour étudier les causes de la dépression et les meilleures façons de la traiter. Grâce aux progrès de cette méthode, les troubles de l'humeur devraient livrer leurs secrets.

**UNE AUGMENTATION DE L'ACTIVITÉ dans certaines régions du cortex pré-frontal et dans le noyau amygdalien de l'hémisphère gauche de patients dépressifs a été révélée par tomographie par émission de positons. Une hyperactivation du noyau amygdalien serait peut-être le signe d'une vulnérabilité accrue à la dépression.**



Walter J. Veale, University of Pittsburgh Medical Center

dépression chez les enfants prédisposés. Ils détermineront également si les adultes dépressifs, maltraités dans l'enfance, doivent prendre des antidépresseurs toute leur vie, ou bien si certains traitements normalisent l'activité des neurones producteurs de CRF.

Le modèle stress-diathèse ne s'applique pas à tous les cas de dépression ; tous les patients dépressifs n'ont pas été des enfants maltraités. Toutefois, les personnes dont certains parents plus ou moins éloignés sont dépressifs et qui ont eu une enfance traumatisante sont particulièrement sensibles à la dépression. Les personnes qui n'ont pas de prédisposition génétique pour la dépression (il n'y a pas d'autres cas de dépression dans la famille) seraient relativement protégées contre une dépression grave, même si elles ont eu une enfance difficile ou un traumatisme notable après l'enfance. Inversement, certaines personnes génétiquement prédisposées deviennent dépressives, même si elles n'ont subi aucun traumatisme durant leur enfance, ni ultérieurement.

Grâce aux progrès réalisés par les neurobiologistes, les pharmacologues explorent de nouvelles pistes pour de nouveaux médicaments antidépresseurs. Plusieurs laboratoires pharmaceutiques recherchent des antagonistes des récepteurs de l'hormone CRF et des activateurs de certains récepteurs de la sérotonine ; ces dernières substances devraient être de puissants antidépresseurs (ils ne stimuleraient pas les récepteurs de la sérotonine portés par les neurones qui n'interviennent pas dans la dépression).

D'autres traitements plus efficaces et dépourvus d'effets secondaires, fondés sur une meilleure compréhension de la biologie des troubles de l'humeur, verront le jour.

soit rare, soit aléatoirement rare ou abondante. La dernière situation rendait les mères si anxieuses qu'elles négligeaient leurs jeunes. Comme le prévoit notre modèle, les jeunes étaient peu actifs, évitaient les interactions avec d'autres singes et se figeaient dès qu'ils rencontraient une situation nouvelle. Devenus adultes, la concentration en CRF était anormalement élevée dans leur liquide céphalo-rachidien.

Les données obtenues sur le rat et sur le singe soulèvent plusieurs questions de santé publique. En 1995, en France, près de 65 000 enfants ont été déclarés comme ayant été maltraités ou négligés. Si l'on extrapole à l'homme les résultats obtenus chez l'animal, la maltraitance ou la négligence modifieraient irréversiblement le cerveau en développement, de sorte qu'à l'âge adulte la production de CRF et la sensibilité à cette hormone augmentent : les risques de dépression seraient majorés.

Dans cette hypothèse, il serait intéressant de disposer de méthodes pour évaluer l'activité des neurones producteurs de CRF ou le nombre des récepteurs spécifiques de cette hormone ; les médecins dépisteraient alors les personnes qui ont été maltraitées et qui risquent de devenir dépressives. De surcroît, ils vérifieront si les antidépresseurs ou une psychothérapie préviennent la

Charles NEMEROFF dirige le département de psychiatrie et des sciences du comportement à la Faculté de médecine d'Emory.

*Biology of Depressive Disorders*, parties A et B, sous la direction de J. John Mann et David J. Kupfer, Plenum Press, 1993.

Michael J. OWENS et Charles B. NEMEROFF, *The Role of Serotonin in the Pathophysiology of Depression : Focus on the Serotonin Transporter*, in *Clinical Chemis-*

*try*, vol. 40, n° 2, pp. 288-295, février 1994.

K.I. NATHAN, D.L. MUSSELMAN, A.F. SCHATZBERG et C.B. NEMEROFF, *Biology of Mood Disorders*, in *Textbook of Psychopharmacology*, sous la direction de A.F. Schatzberg et C.B. Nemeroff, APA Press, Washington, D.C., 1995.

C.B. NEMEROFF, *The Corticotropin-Releasing Factor (CRF) Hypothesis of Depression : New Finding and New Directions*, in *Molecular Psychiatry*, vol. 1, n° 4, pp. 336-342, septembre 1996.



# Les lasers à un seul atome

MICHAEL FIELD • KYUNGWON AN

*Ce nouveau type de laser maîtrise l'énergie des atomes et révèle comment la lumière interagit avec la matière.*

Inventé il y a 40 ans, le laser est aujourd'hui partout : dans les conférences, il sert de pointeur, en remplacement des baguettes de bois ; aux caisses des supermarchés, il lit les codes à barres placés sur les articles ; dans les lecteurs de disques compacts, il procure aux mélomanes un son purifié ; dans l'industrie du bâtiment, il supprime le fil à plomb... Si les applications sont variées, le principe est invariable : un nombre considérable d'atomes ou de molécules, excités dans une cavité, émettent simultanément des photons (les «grains» de lumière) identiques.

À partir de combien d'atomes obtient-on l'effet laser ? Nous avons récemment mis au point un laser qui fonctionne avec un seul atome. Cet appareil ne peut lire de codes à barres ni décoder des disques compacts, car sa puissance (environ un milliardième de watt) est plusieurs millions de fois inférieure à celle des lasers classiques. Toutefois il s'est révélé utile pour des expériences de physique variées. Sa lumière a notamment des propriétés qui ne s'expliquent que par la mécanique quantique, laquelle décrit les interactions aux échelles atomiques et subatomiques.

Aussi des physiciens testent les prévisions de la mécanique quantique en analysant les performances de notre laser dans différentes conditions expérimentales.

## La lumière dans une cavité

Avant d'examiner le fonctionnement des lasers à un atome, considérons celui des lasers classiques. Ces appareils sont composés de deux parties essentielles : d'une part, deux miroirs se faisant face constituent une cavité où la lumière fait de nombreux allers et retours avant de s'échapper sous forme de faisceau laser ; d'autre part, de la matière sous forme gazeuse, liquide ou solide, entre

les deux miroirs, engendre et amplifie la lumière.

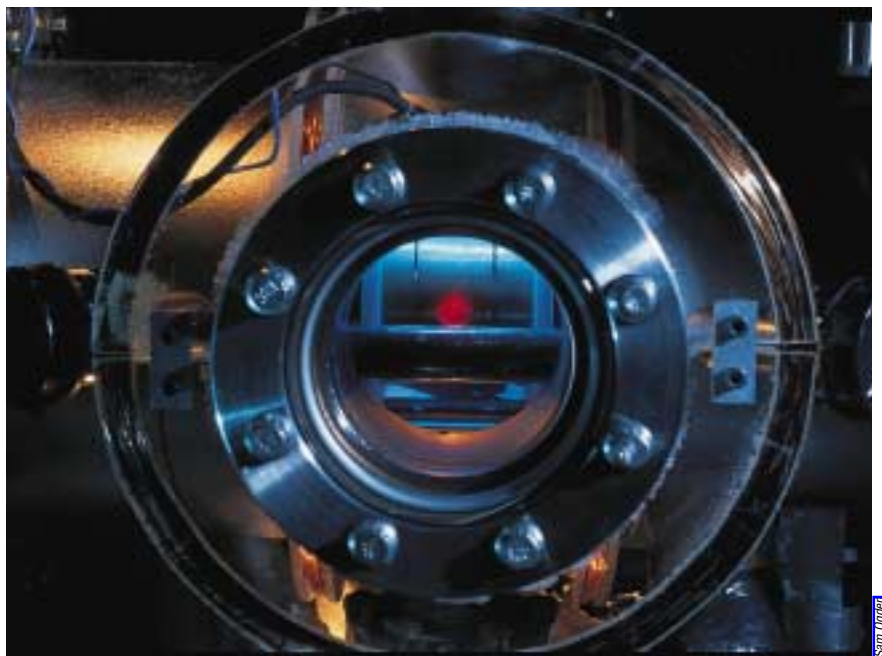
Dans les lasers à l'hélium-néon, qui émettent une lumière rouge, ce milieu est un gaz. Dans les lasers à colorant, ce milieu est une solution contenant des molécules colorantes, et la couleur du laser est réglable. Dans les lasers au néodyme, des ions néodyme sont inclus dans un grenat (un silicate cristallin) d'yttrium et d'aluminium, et le faisceau est infrarouge.

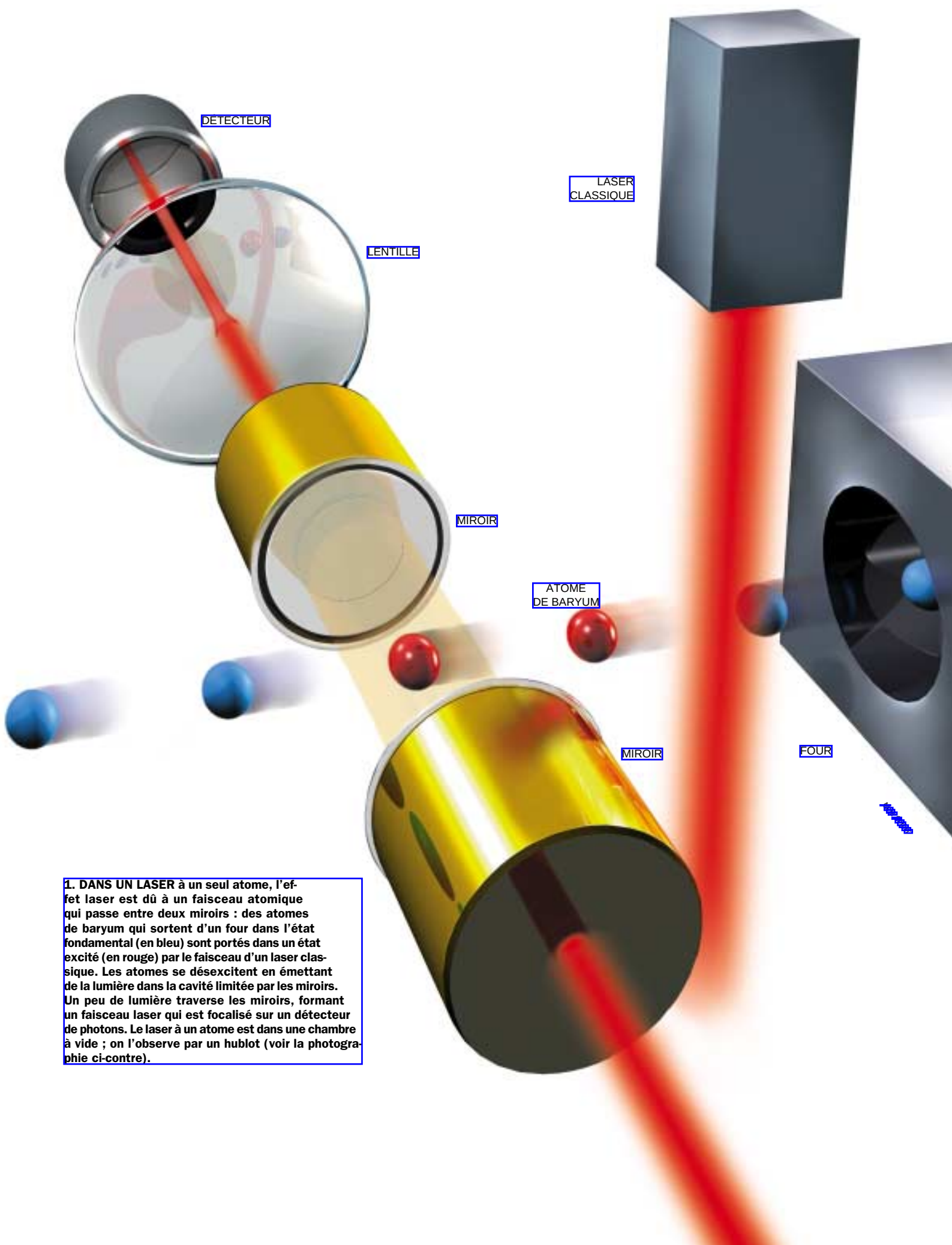
La matière qui est dans la cavité de ces lasers est composée de nombreuses molécules ou atomes, mais une faible proportion de ces molécules ou atomes émet la lumière laser. Dans de nombreux types de lasers, les atomes actifs ont deux états principaux, caractérisés par des énergies différentes. Sans stimulation particulière, les atomes du milieu actif sont moins nombreux dans l'état excité que dans l'état fondamental, d'énergie inférieure. Pour obtenir l'effet laser, on inverse les proportions d'atomes excités et

d'atomes dans l'état fondamental (dans les lasers classiques, cette «inversion de population» s'obtient à l'aide d'une source d'énergie, tel un flash).

Les atomes excités ne le restent pas indéfiniment : ils reprennent spontanément leur énergie inférieure, en émettant de la lumière ; c'est le phénomène d'émission spontanée. Une faible proportion de cette lumière (quelques millièmes) atteint un des miroirs, et se réfléchit vers le milieu actif.

Quand cette lumière réfléchie atteint des atomes qui ne se sont pas dés excités, elle leur fait émettre des photons ayant la même longueur d'onde, la même direction et la même phase que la lumière réfléchie. Cette «émission stimulée» est responsable de la plupart des propriétés remarquables de la lumière laser. La lumière ainsi amplifiée atteint le second miroir, se réfléchit, suscite à nouveau la dés excitation des atomes actifs, et ainsi de suite. Lors de ses allers et retours entre



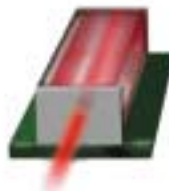


**1. DANS UN LASER à un seul atome, l'effet laser est dû à un faisceau atomique qui passe entre deux miroirs : des atomes de baryum qui sortent d'un four dans l'état fondamental (en bleu) sont portés dans un état excité (en rouge) par le faisceau d'un laser classique. Les atomes se dés excitent en émettant de la lumière dans la cavité limitée par les miroirs. Un peu de lumière traverse les miroirs, formant un faisceau laser qui est focalisé sur un détecteur de photons. Le laser à un atome est dans une chambre à vide ; on l'observe par un hublot (voir la photographie ci-contre).**

## TYPES DE LASERS



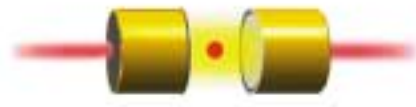
HELIUM-NEON



NEODYME



MICROCAVITE  
SEMICONDUCTRICE



UN ATOME

|                               |                          |                        |                                |                   |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| DISTANCE ENTRE<br>LES MIROIRS | 20 A 100 CENTIMETRES     | 5 A 15 CENTIMETRES     | 2 A 5 MICROMETRES              | 1 MILLIMETRE      |
| NOMBRE D'ATOMES               | $10^{16}$ ATOMES DE NEON | $10^{19}$ IONS NEODYME | $10^6$ PAIRES<br>ÉLECTRON-TROU | 1 ATOME DE BARYUM |
| PUISSANCE (WATTS)             | 0,001                    | 1,0                    | 0,0001                         | 0,000000000001    |

Mark Gellert

**2. CES QUATRE LASERS** ont des caractéristiques différentes, mais tous produisent des faisceaux de lumière monochromatiques. Le laser hélium-néon est celui qui équipe les lecteur de codes à barres de supermarché. Les lasers YAG au néodyme, plus puissants, sont utilisés en chirurgie. Les lasers à microcavité semi-

conductrice sont en cours de mise au point ; les physiciens prévoient de les utiliser dans des ordinateurs optiques. Le laser à un seul atome est avant tout un outil expérimental, mais on imagine de l'utiliser pour le traitement d'informations à faible bruit et pour de la spectroscopie de précision.

les miroirs, la lumière est continuellement amplifiée par le milieu laser. Une partie sort du laser par un des miroirs, qui n'est pas parfaitement réfléchissant : c'est le faisceau laser.

Un laser ne fonctionne que si son gain, c'est-à-dire l'amplification de la lumière lors de sa traversée du milieu actif, compense les pertes dues aux imperfections des miroirs ou à d'autres effets perturbateurs. Dans les lasers classiques, le gain n'est supérieur aux pertes que si le milieu actif contient un très grand nombre d'atomes ou de molécules. Par exemple, un laser à l'hélium-néon de puissance égale à un milliwatt contient plusieurs millions de milliards d'atomes de néon et dix fois plus d'atomes d'hélium ; l'émission de lumière se stabilise quand un milliard de photons environ circule entre les miroirs.

Comment réduire le nombre d'atomes actifs d'un laser ? Par exemple, en améliorant la réflectivité des miroirs : les photons sont alors stockés plus longtemps dans la cavité, et ils interagissent davantage avec le milieu actif, qui peut alors être moins important. Dans certains cas, on augmente le gain du laser en réduisant le nombre d'atomes inactifs, qui gênent le fonctionnement du laser par leurs collisions avec les atomes excités (ils provoquent alors une désexcitation anticipée). Cependant, même dans les lasers classiques les plus efficaces, il y a plus de 100 000 atomes actifs par photon présent dans la cavité.

## Des atomes dans des cavités

Notre laser à un seul atome fonctionne grâce à un effet différent de celui qui est à l'œuvre dans les lasers classiques : l'oscillation de Rabi. Étudiée par les spécialistes de l'électrodynamique quantique en cavité (voir *Électrodynamique quantique en cavité*, par S. Haroche et J.-M. Raimond, *Pour La Science*, juin 1993), les oscillations de Rabi sont des échanges périodiques d'énergie entre des atomes et un champ électromagnétique. Le phénomène a été découvert vers 1930 par le physicien américain Isidor Rabi (1898-1988). Ce dernier avait émis des ondes radio vers des atomes et observé que l'énergie de ces derniers augmentait quand l'énergie des photons radio était égale à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité des atomes ; jusque là, rien que de très normal. Puis le phénomène s'inversait : irradiés par les mêmes ondes radio, les atomes réemettaient leur énergie et revenaient à l'état fondamental. Ils recaptaient alors de l'énergie du champ radio, et le cycle recommençait à une fréquence aujourd'hui nommée fréquence d'oscillation de Rabi.

Rabi ne pouvait observer les comportements individuels des atomes et des photons, car les photons radio ont une énergie très faible : même une onde radio de faible puissance en contient une quantité considérable, de sorte que les échanges entre les atomes

et les photons sont excessivement nombreux ; les effets des interactions se moyennent et on ne peut pas analyser la nature quantique des échanges.

Vers 1960, Edwin Jaynes, de l'Université de Washington, et Frederic Cummings, du Laboratoire de recherches de la Société Ford, ont étudié théoriquement comment un atome à deux niveaux d'énergie interagit avec une onde composée d'un petit nombre de photons. Ils ont calculé que la fréquence des oscillations de Rabi est quantifiée : un atome à deux niveaux d'énergie émet et absorbe des photons à des fréquences particulières, qui dépendent de l'intensité du champ électromagnétique.

E. Jaynes et F. Cummings prédisaient qu'on pourrait forcer l'atome excité à émettre un photon en le plaçant dans une petite cavité résonante, c'est-à-dire dont la taille est un multiple de la longueur d'onde du photon : une cavité aux parois réfléchissantes est comme une corde de guitare, car, les extrémités étant fixes, la corde qui vibre fait un nombre entier de ventres de vibration ; de même, seuls les photons dont la longueur d'onde sont un sous-multiple de la taille de la cavité s'y accumulent. E. Jaynes et F. Cummings avaient calculé que, quand des photons émis par l'atome excité s'accumulent ainsi, un « couplage » quantique déclenche une émission de photons bien plus rapidement que si l'atome est isolé dans l'espace ; dans la cavité, l'atome peut absorber le photon qu'il

vient d'émettre, puis réémettre rapidement un photon, qu'il réabsorbe, et ainsi de suite. De telles oscillations sont dites « induites par les fluctuations électromagnétiques du vide », car elles ont lieu quand la cavité ne contient initialement pas de champ électromagnétique. Si la cavité contient un ou plusieurs photons avant que l'atome excité y pénètre, ce dernier subira en outre des oscillations de Rabi, de sorte qu'il émettra et absorbera des photons à un rythme encore supérieur.

Cet effet a été observé en laboratoire en 1984, à l'Institut Max Planck de Garching : Herbert Walther l'utilisa pour construire un « micromaser ». Dans cet appareil, des atomes de Rydberg (des atomes fortement excités, où les électrons sont très éloignés du noyau) pénètrent un à un dans une cavité métallique aux parois fortement réfléchissantes (on utilise des matériaux supraconducteurs, pour les pertes à la réflexion sont très faibles). Comme dans un laser, la cavité a des dimensions déterminées par la longueur d'onde des photons micro-ondes émis par les atomes de Rydberg lorsqu'ils se dés excitent. H. Walther observa que les atomes émettent bien plus rapidement des photons que dans le vide, conformément à la théorie de E. Jaynes et de F. Cummings. En outre, les photons s'accumulent dans le résonateur si l'on augmente la réflectivité des parois.

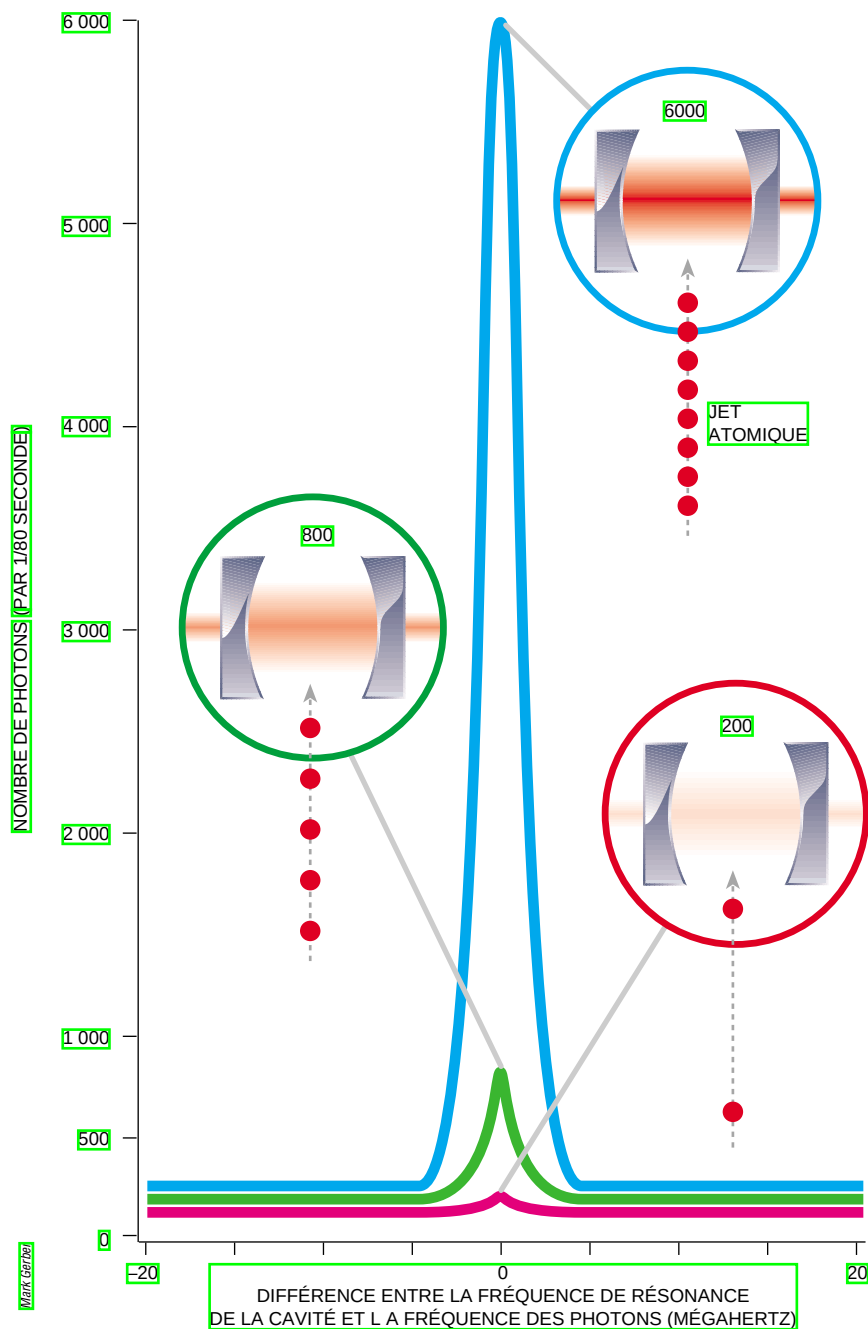
### Un micromaser optique

Le laser à un seul atome est une version optique du micromaser : des atomes excités ayant deux niveaux d'énergie pénètrent un à un dans un minuscule résonateur et émettent des photons infrarouges dont la longueur d'onde est juste inférieure à celle de la lumière rouge. Un premier photon est émis dans la cavité vide en raison du phénomène des oscillations dues aux fluctuations électromagnétiques du vide ; puis l'oscillation de Rabi assure une amplification. Plus le nombre de photons augmente dans la cavité, plus la probabilité qu'un atome traversant la cavité émette un autre photon augmente. Ce renforcement est analogue à l'émission stimulée des lasers classiques.

Comment passer du micromaser, qui émet des micro-ondes, au laser à un seul atome ? Nous devons tout d'abord fabriquer un résonateur optique capable de stocker un photon avant qu'il ne soit absorbé par l'un des miroirs ou émis

hors de la cavité. La « supercavité » que nous avons utilisée est délimitée par deux miroirs très précisément alignés et de très grande réflectivité. Vers 1960, les ingénieurs de la NASA qui travaillaient à un système de propulsion d'engin spatial par éjection d'ions observèrent que l'on obtenait des parois très réfléchissantes en déposant une mince couche d'ions sur un substrat. Entre 1970 et 1980, ils utilisèrent ces faisceaux d'ions pour recouvrir les miroirs des gyroscopes à laser.

En utilisant ces techniques de dépôt sur des surfaces de petite taille (quelques millimètres carrés), nous avons obtenu des parois de cavité très réfléchissantes : dans notre laser à un seul atome, les miroirs, espacés de un millimètre, ont une réflectivité de 99,997 pour cent (dans un laser classique, la réflectivité des miroirs est de 99 pour cent environ ; les miroirs domestiques ont une réflectivité de 90 pour cent) ; les photons y font quelque 250 000 allers et retours avant d'être absorbés ou de s'échapper.

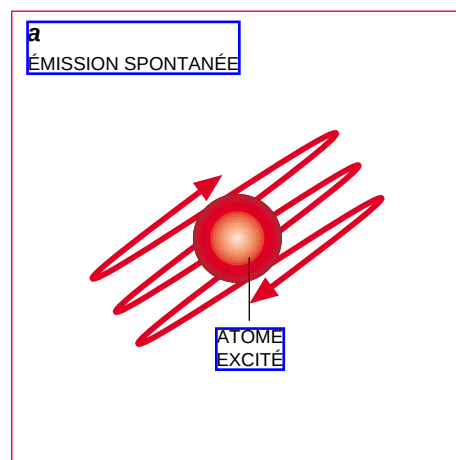


**3. L'INTENSITÉ DU FAISCEAU d'un laser à un seul atome augmente brusquement lorsque les atomes de baryum sont nombreux dans la cavité. D'autre part, le faisceau n'est intense que si la cavité est accordée : sa longueur doit être un multiple de la longueur d'onde des photons émis.**



ISIDORE RABI

**4. LES OSCILLATIONS DE RABI**, découvertes par le physicien américain Isidor Rabi (à gauche) vers 1930, induisent les émissions de photons dans le laser à un seul atome. Un atome isolé qui a été excité revient à son état fondamental en émettant spontanément un photon dans une direction quelconque (a). Dans une cavité dont la taille est un multiple de la longueur d'onde de ce photon, un atome excité émet un photon plus rapidement et en direction des miroirs qui délimitent la cavité (b). Ce phénomène est nommé oscillation due aux fluctuations électromagnétiques du vide. Quand un photon a été ainsi émis, un autre atome excité qui entre alors dans la cavité subit des oscillations de Rabi. Il émet un photon identique au photon déjà présent, dans la même direction que celui-ci, mais plus rapidement (c).



Lors des premiers tests du système, nous ne parvenions pas à maintenir la taille de la cavité à une valeur accordée à la fréquence des photons émis par les atomes, quand ils reviennent à leur état d'énergie inférieur : quand les miroirs bougeaient, la résonance était perdue, les oscillations de Rabi n'avaient plus lieu et les atomes situés dans la cavité n'émettaient pas de photons. Pour conserver la résonance, nous avons eu l'idée d'ajuster automatiquement la distance entre les deux miroirs à l'aide d'un transducteur piézo-électrique (un cristal qui transforme une tension électrique en une force mécanique) activé par le faisceau du laser : une diminution d'intensité commande un déplacement d'un miroir, ce qui corrige les variations de taille de la cavité, à un dixième de nanomètre près.

## Le choix du laser

Quels atomes faire passer dans le résonateur ? Nous savions qu'ils devraient avoir deux niveaux d'énergie appropriés et une faible probabilité d'émission spontanée, car cette émission perturberait l'interaction des atomes et de la cavité. Nous avons choisi d'utiliser des atomes de baryum, qui émettent des photons de longueur d'onde égale à 791 nanomètres lorsqu'ils passent de leur état excité à leur état fondamental.

Nous préparons ces atomes en évaporant du baryum métallique dans un four et en canalisant la vapeur produite dans l'espace situé entre les miroirs. Le four produit un faisceau étroit d'atomes de baryum qui se déplacent à la vitesse moyenne de 360 mètres par seconde. En raison de la petite taille du résonateur et du

faible débit d'atomes, il n'y a jamais plus d'un atome de baryum à la fois à l'intérieur du résonateur.

Juste avant d'entrer dans la cavité, les atomes de baryum traversent un faisceau de lumière émis par un laser classique ; ce faisceau excite les atomes dans leur état d'énergie supérieure. Dans le vide, sans interaction, ces atomes se désexciteraient en trois milliardièmes de seconde, en émettant un photon de longueur d'onde égale à 791 nanomètres, mais la cavité, précisément accordée sur cette longueur d'onde, stimule quelques atomes de baryum et provoque leur émission durant les 200 milliardièmes de seconde qu'ils séjournent entre les miroirs.

Lorsque le premier atome pénètre dans le résonateur vide, une oscillation due aux fluctuations électromagnétiques du vide se produit dans un quart des cas : l'atome émet alors un photon. Une fois ce premier photon émis, le champ électromagnétique créé dans le résonateur interagit avec le deuxième atome, quand il pénètre ensuite dans la cavité : la probabilité que cet atome émette un photon devient égale à 43 pour cent. Plus les photons sont nombreux dans la cavité, plus la probabilité d'émission des atomes augmente. Tous ces photons ont la même direction et la même phase, toutes deux définies par la géométrie de la cavité. Au total, la cavité libère un faible faisceau laser perpendiculaire à la trajectoire des atomes.

Le résonateur est si efficace que les photons restent dans la cavité pendant un milliardième de seconde : c'est considérable à l'échelle atomique. Nous estimons le nombre de photons stockés en mesurant la quantité de lumière laser transmise par les miroirs de la cavité (nous utilisons un détecteur

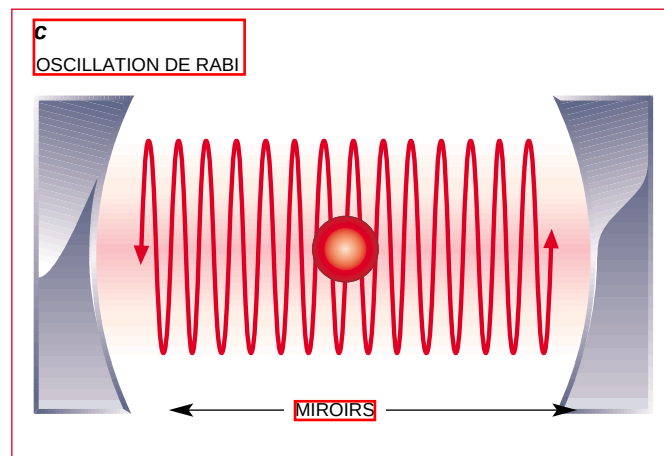
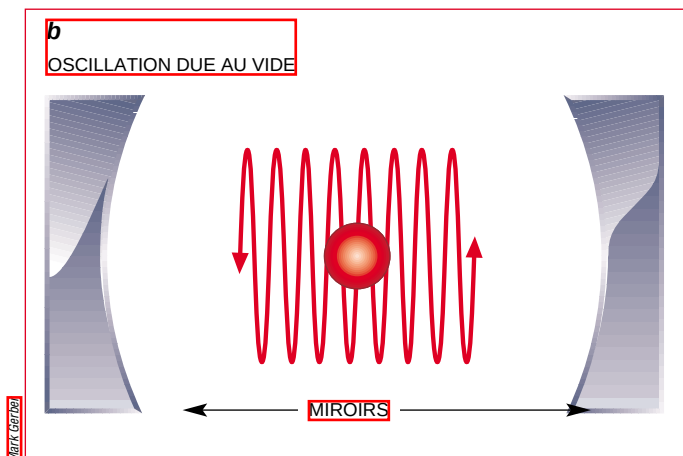
capable de compter 40 pour cent des photons qui l'atteignent).

Dans notre expérience, les photons s'accumulent jusqu'à ce que les pertes par absorption et par transmission, à travers les miroirs, soient égales aux émissions par les atomes de baryum. Nous faisons varier le débit d'atomes en modifiant la température du four où le baryum est évaporé.

Lorsque le nombre moyen d'atomes dans la cavité est égal à 0,1, c'est-à-dire lorsque la cavité est occupée par un atome de baryum pendant 10 pour cent du temps, les photons s'accumulent peu dans la cavité : la plupart des photons émis quittent la cavité avant qu'un nouvel atome de baryum y pénètre. En revanche, quand nous portons le nombre moyen d'atomes dans la cavité à 0,4, l'émission lumineuse est de un million de photons par seconde, ce qui maintient en permanence un photon dans le résonateur ; or, nous l'avons vu, la présence d'un photon dans la cavité augmente la probabilité d'émission d'un photon supplémentaire. Lorsque nous portons le nombre moyen d'atomes à 0,7, la puissance du laser est multipliée par sept.

## Les lasers du futur

En théorie, le laser à un seul atome est remarquablement efficace : quand les photons se sont accumulés dans le résonateur, la probabilité que les atomes de baryum émettent un autre photon pourrait théoriquement atteindre 100 pour cent. Dans notre prototype, cette probabilité atteint 50 pour cent : la moitié de l'énergie absorbée par les atomes de baryum est transformée en lumière laser (les lasers classiques ont une efficacité comprise entre 1 et 30 pour cent seulement).



Toutefois notre laser nous intéresse surtout parce qu'il permet l'étude des interactions de la matière et de la lumière. La création du faisceau laser résulte d'un phénomène quantique à partir duquel les physiciens testent les prévisions de la mécanique quantique. Notre premier laser à un atome convenait mal, pour de telles expériences, parce que les interactions atomiques dans le résonateur n'étaient pas uniformes : le champ électromagnétique dans la cavité formait une onde stationnaire entre les miroirs, avec une amplitude qui augmentait et diminuait de façon sinusoïdale comme les vibrations d'une corde de guitare. De ce fait, les interactions des atomes et de la cavité dépendaient du trajet suivi par les atomes : ceux qui passaient dans les régions de forte amplitude émettaient plus de photons que ceux qui passaient dans les régions de faible amplitude, et qui interagissaient peu avec le champ électromagnétique.

Nous avons résolu ce problème en inclinant le faisceau d'atomes par rapport à l'axe de la cavité. De ce fait, la vitesse relative des photons qui proviennent des deux miroirs est différente ; nous réglons la cavité de sorte qu'une seule des ondes soit accordée. Les atomes traversent alors tous des régions de même amplitude, et ils ont la même probabilité d'émission.

Dans notre premier laser à un atome, les atomes de baryum éjectés par le four n'avaient pas tous la même vitesse. Or ceux qui traversaient rapidement la cavité interagissaient moins avec le champ électromagnétique, de sorte que la probabilité d'émission de photons était inférieure. Nous avons donc modifié le système d'excitation des atomes de baryum : avec deux lasers classiques, nous parve-

nons à ne placer dans l'état d'énergie supérieur que les atomes de vitesse déterminée.

Nous cherchons maintenant à analyser le spectre d'émission du laser à un seul atome. Les premières expériences ont montré comment un atome placé dans une cavité résonante interagit avec la lumière issue d'un laser classique. Lorsque la cavité est vide, l'intensité de lumière qui la traverse augmente brusquement quand la fréquence du laser est voisine de la fréquence de résonance de la cavité. Autrement dit, la «courbe d'accord» de la cavité comporte un pic unique. En revanche, quand un atome est dans la cavité, l'intensité de la lumière du laser croît brusquement, à deux fréquences respectivement inférieure et supérieure à la fréquence de résonance. La courbe d'accord de la cavité possède alors deux modes.

Le spectre d'émission du laser à un seul atome est également une courbe à deux pics lorsque le débit d'atomes est faible et que tous les photons ont quitté le résonateur avant qu'un autre atome ne rentre. Lorsque le débit d'atomes est notable et que les photons emplissent en permanence le résonateur, le spectre d'émission évolue vers la courbe à un seul pic caractéristique du laser. Pourquoi cette évolution ? La théorie reste à faire.

Nous avons aussi prévu d'utiliser ce dispositif pour étudier les «états piégés», un phénomène quantique qui se produit quand un atome pénètre dans la cavité et subit une ou plusieurs oscillations de Rabi. Lors d'une oscillation complète, l'atome émet un photon dans la cavité, puis absorbe un photon provenant du champ et quitte le résonateur dans un état excité. Le nombre de photons n'augmente pas, car les atomes entrent et sortent de la

cavité dans le même état. Dans nos premières expériences, nous n'avons pas observé d'oscillations complètes, parce que les atomes de baryum se déplaçaient trop rapidement : ils n'effectuaient qu'un sixième d'oscillation dans la cavité. Nous ne pourrions étudier les états piégés que si nous ralentissons les atomes.

Ces études présentent aussi un autre avantage, pratique celui-là : la faible incertitude sur l'amplitude du champ des états piégés permettra peut-être d'utiliser le laser à un seul atome fonctionnant dans ce mode pour des traitements de l'information précis ou pour la spectroscopie de précision. Et si l'on parvient à construire des lasers à un atome sur des matériaux semiconducteurs, on pourra les intégrer dans des ordinateurs optiques, beaucoup plus rapides que les ordinateurs actuels.

Michael S. FELD est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts et directeur du Centre de spectroscopie George Harrison. Kyungwom AN est professeur de l'Institut coréen des sciences et des techniques de Taejon.

Serge HAROCHE et Daniel KLEPPNER, *Cavity Quantum Electrodynamics*, in *Physics Today*, Vol. 42, n° 1, pp. 24-30, janvier 1989.

G. RAITHEL et al., *The micromaser : A Proving Ground for Quantum Physics*, in *Cavity Quantum Electrodynamics*, sous la direction de Paul R. Berman, Academic Press, 1994.

Kyungwom AN, Ramachandra R. Dasari Michael S. FELD, *The Microlaser : A Fundamental Quantum Generator of light*, in *Atomic and Quantum Optics : High-Precision Measurements*, SPIE Proceedings Series, Vol. 2799, pp. 14-21, 1996.



# Un regard nouveau sur les quasars

MICHAEL DISNEY

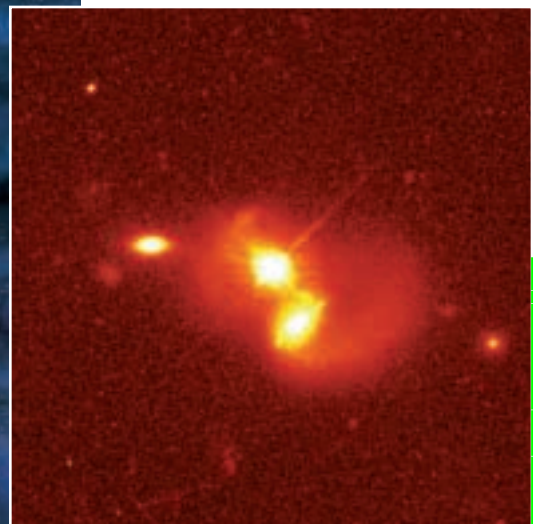
*Des observations du télescope spatial Hubble explorent la nature et l'origine des quasars, ces mystérieuses centrales d'énergie cosmiques.*



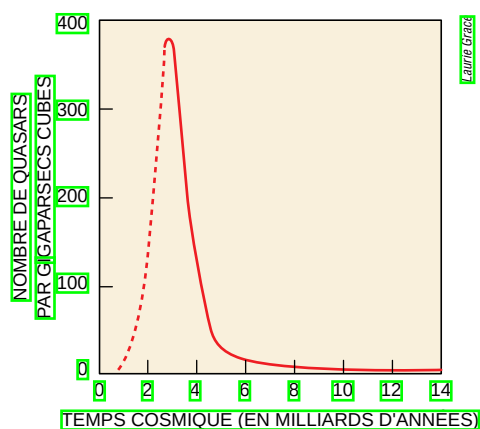
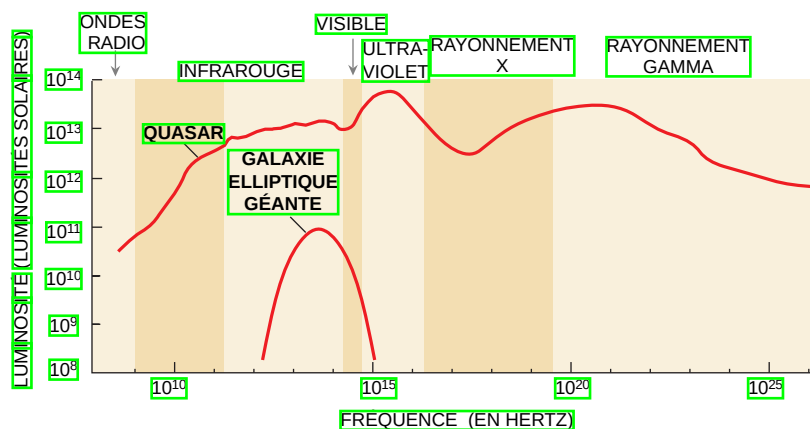
Les quasars sont les objets les plus lumineux de l'Univers. Ils rayonnent des centaines de fois plus qu'une galaxie comme notre Voie lactée, qui brille elle-même comme dix milliards de soleils. Néanmoins, à l'échelle de l'Univers, les quasars sont des objets minuscules. Leur diamètre, de quelques jours-lumière à peine, est bien inférieur à celui d'une galaxie comme la nôtre. Comment produisent-ils tant d'énergie dans un volume aussi restreint? Quels sont leur structure et leur fonctionnement? Pour répondre à ces questions, les astronomes braquent leurs instruments les plus performants – tel le télescope spatial *Hubble* – sur ces vedettes célestes.

Le premier quasar fut découvert en 1962 par Cyril Hazard, de l'Université de Sydney : il étudiait une puissante source d'ondes radio de la constellation de la Vierge, mais le radiotélescope qu'il utilisait était trop imprécis pour qu'il en identifie la source. Le jeune astronome remarqua alors que la Lune occulterait la région du ciel d'où provenait la source lors de son passage devant la constellation de la Vierge. Avec John Bolton, le directeur du tout nouveau radiotélescope construit à Parkes, en Australie, il imagina de pointer l'antenne géante vers la radiosource et d'attendre que la Lune l'occulte : en surveillant le moment de la disparition et celui de la réapparition du signal radio, ils espéraient attribuer la source du signal à un objet visible qui disparaîtrait et réapparaîtrait simultanément. L'expérience faillit rater : au début de l'occultation, la grande antenne était si inclinée qu'elle butait contre ses cales de sécurité. Sans se soucier des risques, J. Bolton arra-

**1. LA COLLISION DE GALAXIES** engendre parfois un quasar. Un trou noir massif, au centre de l'une des galaxies, aspire les étoiles et le gaz de l'autre galaxie : le maelström de matière qui en résulte engendre un intense rayonnement. Ce mécanisme semble se dérouler dans le quasar PG 1012+008 (*médaille*), observé par le télescope spatial *Hubble*. Ce quasar se trouve à 1,6 milliard d'années-lumière de la Terre.



VOIE LACTÉE / INSTITUT FOR ADVANCED STUDY @ NASA



**2. LE SPECTRE DU QUASAR 3C273** – l'un des quasars les plus brillants – est bien plus étendu et plus intense que le spectre d'une galaxie elliptique géante (à gauche). Dans le domaine visible, le quasar est des centaines de fois plus lumineux qu'une galaxie typique. Les quasars étaient plus nombreux lorsque l'Univers

était âgé de deux à quatre milliards d'années (à droite). Aujourd'hui, ils sont 1 000 fois moins nombreux. Au début de l'Univers, les quasars étaient également rares, mais les nombres exacts sont incertains (un gigaparsec est égal à 3,26 milliards d'années-lumière).

cha les cales, afin que le télescope suive l'occultation jusqu'à ce que le bord de l'antenne touche presque le sol.

Cette audace fut récompensée : C. Hazard localisa la radiosource et observa, à la position calculée, un objet brillant d'apparence stellaire. Il communiqua la position de cet objet – nommé 3C273 – à Maarten Schmidt, de l'Observatoire du mont Palomar, en Californie, qui enregistra son spectre dans le domaine visible. Après un moment de perplexité, M. Schmidt comprit que le spectre qu'il avait obtenu était celui de l'hydrogène, mais considérablement décalé vers le rouge. En raison de l'expansion de l'Univers, les objets cosmiques s'éloignent de la Terre d'autant plus rapidement qu'ils sont loin ; la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent est allongée par l'effet Doppler cosmologique, analogue à l'effet Doppler sonore qui fait entendre plus grave la sirène d'une ambulance qui s'éloigne. Le rougissement de 16 pour cent (les longueurs d'onde sont multipliées par 1,16) de 3C273 indiquait que l'objet se trouvait à une distance de près de deux milliards d'années-lumière de la Terre. Compte tenu de la distance et de la luminosité apparente de l'objet, M. Schmidt calcula qu'il émettait autant de lumière que plusieurs centaines de galaxies. La première radiosource quasi stellaire – ou quasar – était découverte.

Par la suite, les astronomes identifièrent de nombreux autres quasars. La luminosité dans le domaine des X de certains d'entre eux varie brusquement : ils deviennent dix fois plus brillants en quelques jours seulement. Comme aucune fluctuation ne se propage plus

vite que la lumière, il en découlait que la région qui émet ce rayonnement très énergétique mesurait seulement quelques semaines-lumière de diamètre. Comment des objets si lumineux étaient-ils si petits ? Des astronomes réputés refusèrent initialement de croire aux quasars, mais maintenant des milliers de quasars ont été catalogués ; pour certains, le rougissement atteint 500 pour cent (la longueur d'onde est multipliée par cinq).

### Un problème récurrent

Les astronomes qui étudient les quasars examinent quatre grandes questions. D'abord, quel lien existe-t-il entre les quasars, les galaxies et les étoiles ? Ensuite, pendant combien de temps les quasars déversent-ils leurs torrents d'énergie ? Troisièmement, on compte un quasar par million de galaxies dans notre voisinage cosmique immédiat (à moins d'un milliard d'années-lumière de la Terre), mais cela ne signifie pas que les quasars sont plus rares que les galaxies : ils pourraient être aussi nombreux, et briller moins longtemps. À une distance d'environ dix milliards d'années-lumière, les quasars sont 1 000 fois plus nombreux qu'aujourd'hui. D'où la question : pourquoi les quasars furent-ils beaucoup plus nombreux dans le passé ? Enfin, comment les quasars engendrent-ils leur prodigieuse énergie ?

Les recherches sont difficiles, parce que les quasars sont si loin de la Terre que leur image, dans les plus grands télescopes, est 100 millions de fois trop petite pour être résolue. Depuis la découverte du premier quasar, une partie des astronomes suppose que les quasars résident au sein des galaxies,

probablement dans leurs noyaux. Ils ont cherché à montrer que tous les phénomènes observés dans les quasars se manifestent, sous une forme atténuée, dans les noyaux d'environ un pour cent des galaxies géantes proches de la Voie lactée. Lors de cette recherche, ils ont découvert une grande variété de noyaux actifs de galaxies : radiogalaxies, galaxies de Seyfert, blasars, etc. Toutefois, on n'a pas su établir (et on ne sait toujours pas) si ces objets constituaient des classes distinctes de noyaux galactiques ou s'ils étaient des manifestations du même phénomène, vu sous des angles différents ou à divers stades de son développement. D'autres astronomes opposaient aux partisans du rapprochement entre les quasars et les noyaux actifs de galaxies que leur caractéristique principale – la puissance rayonnée – différait trop : la luminosité des noyaux actifs est considérablement inférieure à celle des quasars.

En 1973, à l'Observatoire du mont Palomar, Jerry Kristian pensa que, si des quasars logeaient dans des galaxies hôtes géantes, les images des quasars les plus proches comporteraient un halo diffus de lumière, en raison de la présence d'étoiles de la galaxie hôte. L'observation de ce halo était difficile, parce que la lumière du quasar brillant, diffusée par l'atmosphère terrestre, occultait la lumière plus faible de la galaxie, mais il le détecta. Sa démonstration restait toutefois peu probante, parce qu'on ne pouvait pratiquement rien discerner des galaxies hôtes, pas même s'il s'agissait de galaxies spirales ou elliptiques.

Lorsque le télescope spatial *Hubble* fut proposé, au milieu des années 1970, la plupart des observateurs de quasars

espérèrent qu'il fournirait enfin des images claires des galaxies hôtes, si elles existaient vraiment. La recherche des galaxies hôtes devint l'un des objectifs primordiaux du télescope. Avec mes collègues de l'équipe européenne du télescope spatial, nous avons conçu la caméra pour objets faibles afin de détecter ces objets lointains : elle comprenait un coronographe pour occulter la lumière brillante des quasars et rendre ainsi les hôtes environnants plus visibles.

## Trous noirs dévoreurs de matière

Dès cette époque, les astronomes soupçonnaient que les quasars émettaient tant d'énergie dans un volume si petit parce qu'ils contenaient un trou noir supermassif. Un tel monstre, pesant un milliard de masses solaires, engloutissait le gaz et les étoiles de son voisinage. Le gaz serait projeté vers le trou noir à une vitesse voisine de celle de la lumière, créant d'intenses champs magnétiques et un rayonnement colossal. À l'Institut de technologie de Californie, Donald Lynden-Bell calcula qu'un trou noir massif pouvait convertir en rayonnement jusqu'à 40 pour cent de la masse de matière aspirée (selon la formule d'Einstein, l'énergie émise serait alors égale à  $0,4mc^2$ , où  $m$  est la masse aspirée, et  $c$  la vitesse de la lumière). Ce mécanisme serait 100 fois plus efficace que la production d'énergie thermonucléaire dans les étoiles. Pour cette raison, les trous noirs massifs sont devenus le modèle théorique privilégié pour expliquer la production d'énergie des quasars.

Cette hypothèse avait toutefois une grave faiblesse : un trou noir massif aspirerait rapidement toutes les étoiles et le gaz du voisinage, et disparaîtrait par manque de combustible. Afin d'élucider ce mystère, l'équipe européenne du télescope spatial a aussi implanté un spectrographe à longue fente dans la caméra pour objets faibles : cet instrument mesure la vitesse de rotation de la matière dans les noyaux actifs de galaxies, d'où l'on déduit la masse des trous noirs potentiels en leur sein.

Après le lancement du télescope spatial *Hubble* en 1990, la déconvenue fut grande : en raison d'un défaut du miroir principal, les images étaient si mauvaises que les spécialistes des quasars ne pouvaient rien en tirer. Comme bien d'autres, j'eus l'impression que les dix années les plus productives de ma carrière d'as-

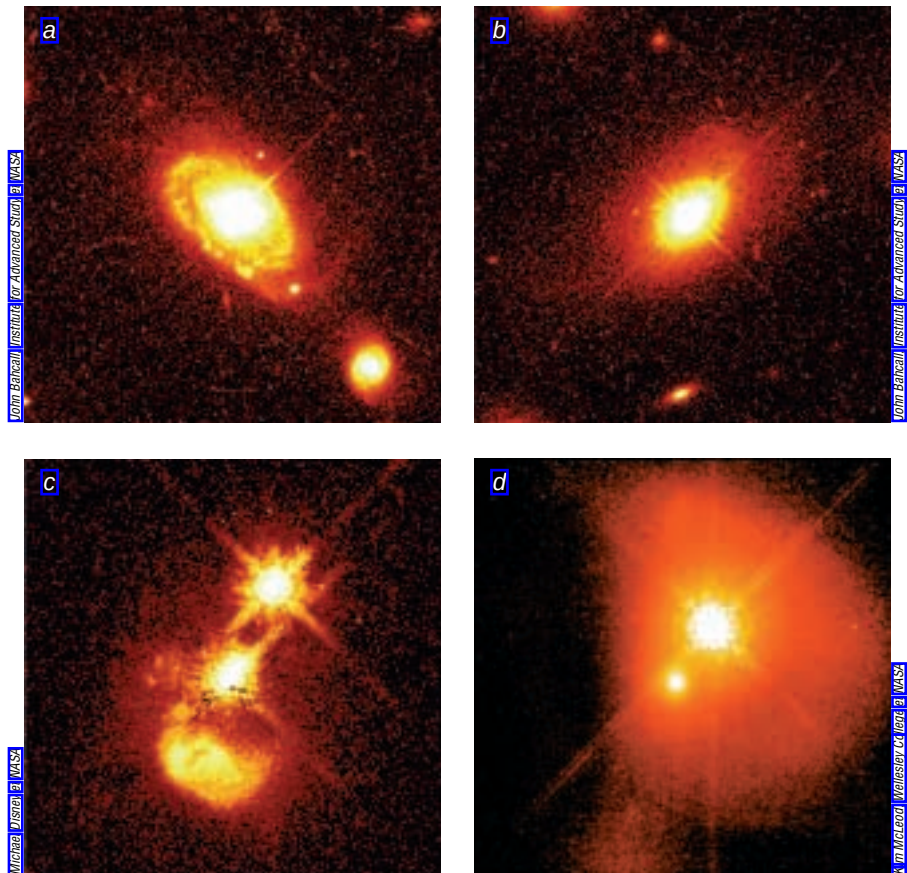
tronyme avaient été gâchées par l'incompétence impardonnable des fabricants du miroir. Heureusement, la NASA avait prévu que l'on puisse réparer *Hubble*, et, en 1993, les astronautes installèrent de nouvelles caméras et une optique correctrice. Malheureusement, aucun des instruments spéciaux pour l'observation des quasars qui équipaient les caméras originelles ne put être récupéré. Si nous voulions continuer à chercher les galaxies hôtes des quasars, nous devions utiliser la nouvelle caméra planétaire à grand champ, qui n'était pas conçue pour cette recherche. Néanmoins, deux équipes se mirent au travail : une équipe européenne, que je dirigeai, et une équipe américaine conduite par John Bahcall, de Princeton.

Chercher les galaxies hôtes des quasars à l'aide de la nouvelle caméra de *Hubble* était aussi difficile qu'identifier la marque d'une voiture qui approche dans une tempête de neige en regardant ses phares : nous devions prendre

plusieurs clichés de chaque objet, soustraire le faisceau brillant – la lumière du quasar – et traiter les images résultantes sur nos ordinateurs. Dans la plupart des cas, le résultat final contenait suffisamment de détails pour reconnaître une structure galactique.

Qu'avons-nous ainsi découvert ? Sur 34 quasars observés, 75 pour cent comportent un halo diffus et faible, qui indique la présence d'une galaxie hôte. Les 25 pour cent restants n'ont pas de halo décelable, mais l'aveuglante lumière du quasar sature peut-être l'image dans ces cas. La moitié des galaxies hôtes observées sont elliptiques, les autres sont spirales. Les quasars dont l'émission dans le domaine radio est la plus intense appartiennent principalement à des galaxies elliptiques, mais on ne discerne aucune autre tendance. Enfin trois quarts des galaxies hôtes semblent en interaction avec d'autres galaxies.

Le fait que tant de quasars se trouvent au sein de galaxies en interactions



**3. DES GALAXIES** abritent la plupart des quasars observés par le télescope spatial *Hubble*. La galaxie spirale autour du quasar PG 0052+251 (a) et la galaxie elliptique autour du quasar PHL 909 (b) ne semblent pas perturbées par des collisions. En revanche, une collision galactique semble alimenter le quasar IRAS 04505-2958 (c). Un anneau spiral arraché à l'une des galaxies se trouve sous le quasar ; l'objet qui le surmonte est une étoile presque alignée avec le quasar et la Terre, et située entre ces deux objets. La nouvelle caméra infrarouge du télescope spatial *Hubble* a observé un autre écrasement galactique (d) : les points autour du quasar PG 1613+658 résultent de la diffraction ; la galaxie compagnon apparaît à gauche sous le quasar.

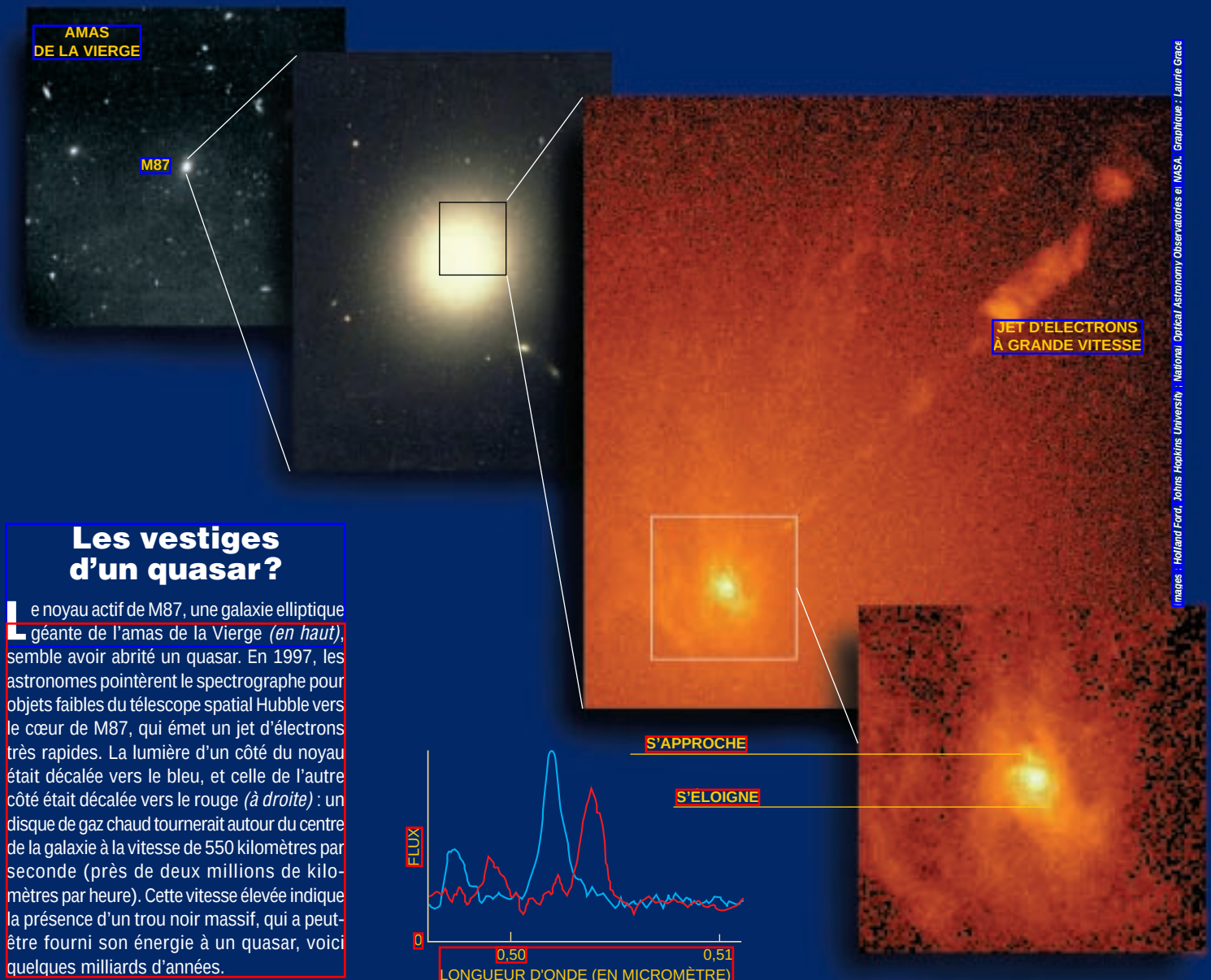
avait déjà été rapporté par des astronomes canadiens, qui avaient utilisé un télescope au sol avec une optique adaptative. Cependant, grâce à sa meilleure résolution, le télescope *Hubble* a montré l'importance des interactions galactiques dans les quasars. Les images indiquent que des galaxies en collision (en fait en interaction proche) alimentent la production d'énergie du quasar : les étoiles et le gaz brassés par les effets de marées peuvent être canalisés dans un trou noir massif, au centre de l'une des galaxies. Ainsi, l'émission des quasars est amplifiée.

Ce mécanisme expliquerait les variations du nombre des quasars, au

cours de l'histoire de l'Univers. Immédiatement après le Big Bang, il n'y avait pas de galaxies, donc pas de collisions galactiques. Si les trous noirs existaient alors, aucun mécanisme ne canalisait la matière. Par conséquent, peu de quasars ont un très grand décalage vers le rouge, qui correspond à une distance de 11 milliards d'années-lumière. De surcroît, à ces distances, l'Univers est obscurci par les poussières, de sorte que l'échantillon observé est biaisé. Lorsque les galaxies se formèrent, le nombre d'interactions entre galaxies augmenta, ainsi que le nombre de quasars. Finalement, l'expansion de l'Univers éloigna la plupart des galaxies, ce qui

réduisit le nombre de collisions galactiques, et donc le nombre de quasars.

Pourquoi un quart des galaxies hôtes observées par *Hubble* – telle la galaxie spirale autour du quasar PG 0052+251 – ne montrent-elles aucun signe de collision avec une autre galaxie? Les autres galaxies sont-elles trop peu lumineuses, de sorte qu'elles sont occultées par le quasar? Ou bien le mécanisme d'amorçage des quasars n'est pas celui qui a été supposé? Nous savons en tout cas que la grande majorité des galaxies qui interagissent ne semblent pas produire de quasars ; dans le cas contraire, les quasars seraient beaucoup plus nombreux que ce que nous observons.



La rareté des quasars semble indiquer que les trous noirs supermassifs (de masse supérieure à  $10^7$  fois la masse du Soleil) sont absents de la plupart des galaxies classiques. Pourtant en combinant des observations de *Hubble* avec des mesures de spectres réalisées par des télescopes au sol, des astronomes ont montré que, sur 27 galaxies proches de la Voie lactée, 11 abritent des corps massifs sombres, probablement des trous noirs.

En outre, certains de ces trous noirs massifs furent peut-être des quasars. En 1994, un groupe d'astronomes examina le cœur de M87, une galaxie elliptique géante de l'amas de la Vierge, à environ 50 millions d'années-lumière de la Terre. Le noyau actif de M87 a le même type d'émission, dans une large gamme de longueurs d'onde, que les quasars, mais d'intensité 1 000 fois inférieure. Les astronomes ont découvert que la lumière émanant d'un côté du noyau était décalée vers le bleu (indiquant que la source se rapproche de la Terre), tandis que la lumière de l'autre côté était décalée vers le rouge (indiquant une récession de la source) : les astronomes interprètent cette observation comme un disque de gaz chaud en rotation. De surcroît, le disque tournait si vite que sa cohésion ne pouvait être assurée que par un trou noir de masse au moins égale à trois milliards de masses solaires : le même genre d'objet que l'on pense être la source de l'énergie des quasars. Autrement dit, le noyau de M87 fut peut-être un quasar il y a quelques milliards d'années.

## La quête des quasars

L'ensemble des observations récentes conduit à une théorie qui stipule que la plupart des galaxies contiennent des trous noirs massifs ; dans des circonstances très particulières, ces trous noirs libéreraient des quantités d'énergie considérables. Dans le quasar, les étoiles tombent sur le trou noir à un débit supérieur à une masse solaire par an. Ce débit résulte le plus souvent, mais pas toujours, de collisions galactiques ou d'interactions avec des galaxies proches. À l'époque où la densité en galaxies était supérieure, les quasars étaient plus nombreux.

Quelle est la durée de vie de ces objets ? Les observations révèlent que les galaxies hôtes n'ont pas été endommagées par les quasars, car ces derniers n'ont pas rayonné suffisamment longtemps. Le grand nombre de galaxies

hôtes en interaction et la durée des interactions indique une longévité des quasars inférieure à 100 millions d'années.

L'existence de trous noirs massifs dans la plupart des galaxies suggère que des quasars étaient déjà actifs il y a très longtemps. Le petit nombre de quasars observés – un pour 1 000 galaxies pendant leur ère la plus abondante – montre alors qu'un quasar vit au plus dix millions d'années. Si ce nombre est correct, le phénomène du quasar représente une brève phase transitoire dans les dix milliards d'années de la vie d'une galaxie et, bien que la puissance d'un quasar soit considérable, ce dernier émet une énergie totale qui ne représente que dix pour cent de l'énergie émise par une galaxie au cours de son existence.

Nous l'avons vu, les galaxies hôtes lointaines échappent pour le moment à l'observation, de sorte que l'échantillon observé est biaisé. Manifestement, des observations supplémentaires sont nécessaires pour tester la théorie. Les astronomes espèrent faire de nouvelles découvertes à l'aide de deux dispositifs récemment installés sur le télescope spatial *Hubble* : la caméra infrarouge proche et spectromètre multi-objet (NICMOS), qui permettra l'observation de noyaux galactiques obscurcis par des nuages de poussières, et le spectrographe imageur du télescope spatial (STIS). En 1999, la NASA installera une nouvelle caméra munie d'un coronographe de haute résolution qui pourra détecter les galaxies hôtes des quasars.

Sur le plan théorique, nous devons comprendre comment et quand les trous noirs massifs se sont formés. Ont-ils précédé ou suivi la formation de leurs galaxies hôtes ? Pour l'instant, aucun modèle physique convaincant n'explique comment les trous noirs transforment la matière incidente en un rayonnement qui s'étend des rayons gamma aux ondes radio. Ces études théoriques sont difficiles : l'étude des quasars ressemble à l'observation du gaz d'échappement d'une voiture éloignée ; à partir du gaz analysé, on doit déduire ce qui se passe dans la voiture.

Michael DISNEY enseigne l'astronomie à l'Université de Cardiff, en Grande-Bretagne.

*Les trous noirs*, Dossier Pour la Science, juillet 1997.

S. VEILLEUX, G. CECIL et J. BLAND-HAWTHORN, *Des explosions au cœur des galaxies*, in *Pour la Science*, avril 1996.

## PRIX DE THESE SPECIF

**S**pecif, l'association des universitaires et chercheurs en informatique de France, crée un prix scientifique récompensant chaque année une excellente thèse en informatique. Un jury d'universitaires et chercheurs, présidé par Gilles Kahn, membre de l'Académie des Sciences, sélectionnera parmi les thèses soutenues au cours de l'année universitaire, celle qui recevra ce prix.

En outre, le jury pourra également distinguer, s'il le souhaite, d'autres thèses en plus de celle à laquelle le prix sera décerné.

La remise officielle du prix se fera au cours de l'Assemblée Générale de SPECIF le 10 décembre 1998 à Paris. À cette occasion, le récipiendaire se verra remettre un chèque de 10 000 FF. Il sera également invité, ainsi que les éventuels autres lauréats, à présenter ses travaux à l'ensemble de la communauté informatique.

## CALENDRIER 1998

### Recevabilité des candidatures :

Peut candidater tout étudiant ayant soutenu son doctorat d'informatique entre le 01/09/1997 et le 31/08/1998.

### Dates clés :

15/09/1998 : date limite de dépôt des candidatures.  
16/11/1998 : Notification des résultats.  
10/12/1998 : Remise officielle du prix lors de l'Assemblée Générale de Specif.

### Dossier de candidature :

Renseignements disponibles sur <http://www.lsv.ens-cachan.fr/~petit/specif/prix-these-specif.html>  
<http://www.lsv.ens-cachan.fr/~petit/specif/prix-these-specif.ps>



# Le Yémen désertique : une ancienne région humide

ANNE-MARIE LEZINE

*Il y a 8 500 ans, grâce à des pluies de mousson particulièrement abondantes, de grands lacs se sont formés dans ce qui est aujourd'hui le désert intérieur du Yémen. Des populations néolithiques, à l'origine des grandes civilisations Sud-arabiques, s'y sont alors installées.*

*Elle donne au roi cent vingt talents d'or, des aromates en multitude, beaucoup, et des pierres précieuses. Il n'était pas venu encore autant d'aromates que la reine de Saba donna au roi Salomon.*

*Extrait du premier livre des Rois*

**A**insi sont contées dans la Bible la visite de la reine de Saba à Salomon, roi d'Israël, et la magnificence de ses présents. Cette opulence témoigne de la richesse d'une région, aujourd'hui très aride, que l'on situe au pied des hauts plateaux du Yémen et du Hadramawt, en bordure du vaste désert intérieur du Ramlat As-Sab'atayn. De Ma'in à Shabwa se sont épanouis, dès le VIII<sup>e</sup> siècle avant notre ère, de grands royaumes Sud-arabiques, tels ceux de Saba, de Qataban et d'Hadramawt, dont la richesse était issue de la culture de l'arbre à encens et du balsamier : les habitants faisaient commerce de l'encens et de la myrrhe qui en étaient respectivement issus.

Ces royaumes ont laissé l'empreinte de leur grandeur, sous la forme de cités qui jalonnent les pistes caravanières de la route de l'encens (Shibâm, Shabwa, Ma'rib, etc.) et de temples, tel celui de Bâhrân, à Ma'rib. L'homme a sans doute habité cette région depuis le Néolithique, il y a quelque 8 500 ans : le plus ancien foyer retrouvé dans le wâdî Markha (un wâdî est un cours d'eau temporaire, où l'eau ne coule qu'après les grosses averses) date de cette période. Des outils préhistoriques d'un type plus ancien encore, retrouvés dans l'Hadramawt, témoignent même d'une

présence antérieure (remontant, selon certaines estimations, à 700 000 ans). Pourquoi cette région, aujourd'hui sub-désertique, a-t-elle été le foyer d'une riche civilisation ? Notamment parce que des pluies de la mousson indienne ont favorisé l'extension de grands lacs et le développement d'un réseau fluvial qui les alimentait ; quand les pluies se raréfièrent, l'homme a construit des systèmes d'irrigation élaborés. La mousson indienne, particulièrement forte pendant environ 8 000 ans, a apporté suffisamment d'eau pour favoriser l'implantation de l'homme pendant plusieurs millénaires en Arabie méridionale.

Tout ce réseau fluvial et lacustre est aujourd'hui asséché, mais il a été révélé par des observations de terrain, par des photographies aériennes, par les images obtenues grâce aux satellites et, enfin, par l'analyse des sédiments et des grains de pollen fossiles qui y sont préservés. Avec les équipes qui travaillent sous la direction de Marie-Louise Inizan, au Yémen, dans le cadre des programmes archéologiques du CNRS et du ministère des Affaires étrangères, avec le soutien du Centre français d'études yéménites et de l'Organisme général des antiquités, des musées et des manuscrits, à Sana'a, nous avons retrouvé la trace d'anciens lacs, aujourd'hui asséchés, et avons reconstitué le réseau de fleuves issus des montagnes environnantes qui les alimentaient.

La végétation était dense autour des lacs, comme en témoignent les grains

de pollen et les spores contenus dans les sédiments déposés au fond des lacs. Les grains de pollen et les spores émis par les végétaux sont protégés par une enveloppe externe très résistante, qui se conserve sans s'altérer, à l'abri de l'air, au fond des lacs, des tourbières ou des océans, pendant des millions d'années.

## Des pollens pour comprendre le climat

Les caractères morphologiques de chaque grain de pollen forment la carte d'identité de la plante qui l'a produite. Ainsi, les palynologues utilisent les grains de pollen et les spores contenus dans les sédiments anciens pour reconstituer la composition du couvert végétal et les conditions climatiques locales au moment où ils se sont déposés.

Aujourd'hui, la zone des anciens lacs est un désert, et les sédiments

**1. LE YEMEN, au Sud de la péninsule arabe, est séparé de la mer par une barrière montagneuse. Le désert du Ramlat as-Sab'atayn fut jadis une région humide : des accumulations de sédiments prouvent que des lacs (les amas de calcaire, en haut à droite) parsemaient la région et qu'un fleuve (les sédiments, au milieu) la traversait. Des traces de paléolacs ont été retrouvées notamment à al-Hawa et à Mundafan. Lorsque le climat est devenu plus aride, les habitants ont construit des digues qui recueillaient les rares pluies tombant sur les montagnes du Sud Yémen. La digue de Ma'rib aurait été construite il y a environ 4 000 ans et utilisée jusque vers 580. Elle irriguait une vaste oasis et retenait des limons (en bas), qui fertilisaient le sol.**

affleurent au fond des dépressions qui séparent les dunes modelées par le vent. On prélève des carottes de sédiments, et l'on reconstitue la végétation grâce aux grains de pollen que l'on y retrouve. On connaît alors le climat qui régnait sur cette région de la végétation reconstituée : les précipitations, les températures ou encore l'évaporation.

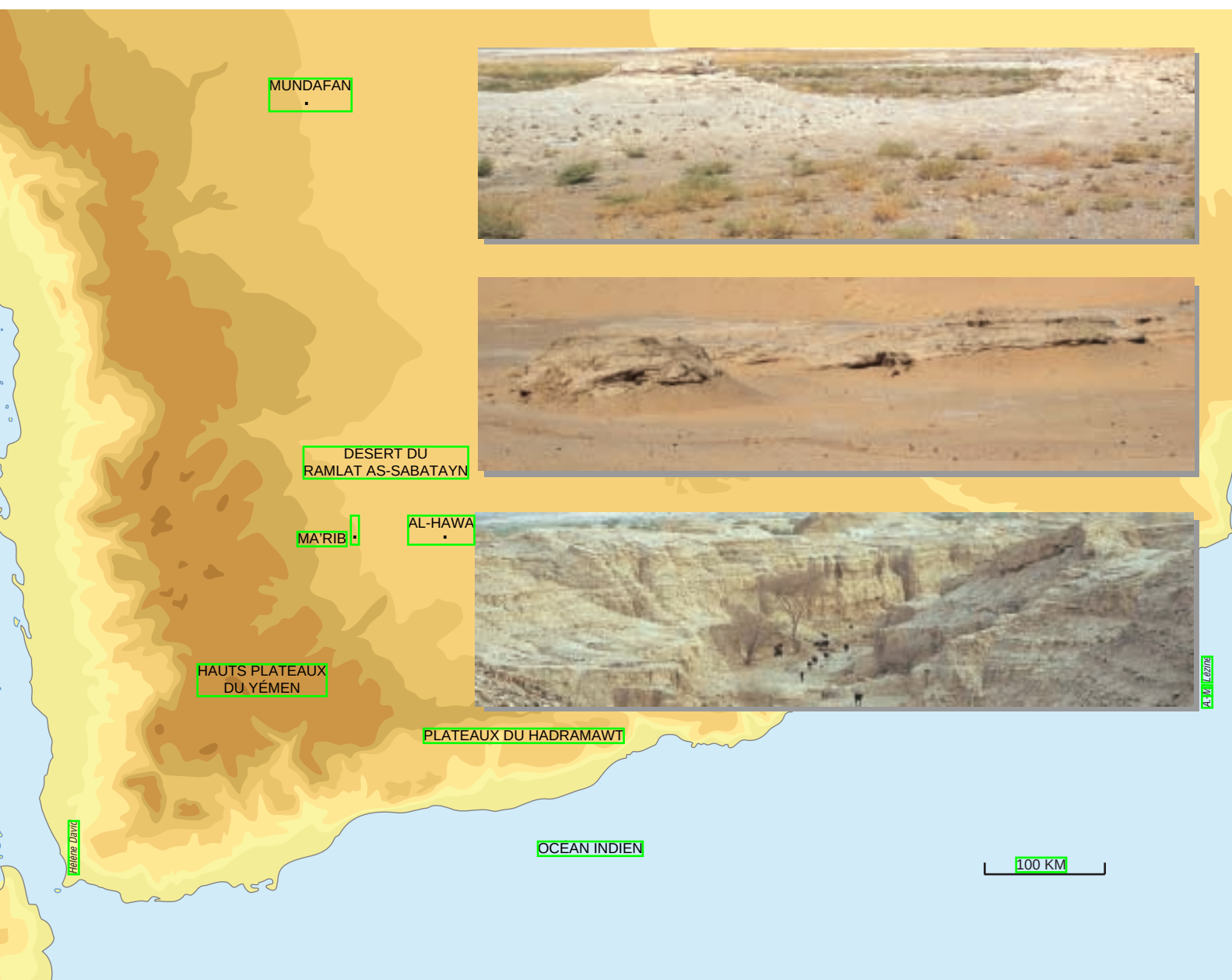
Les pluies que reçoit aujourd'hui le Yémen tombent au cours de deux saisons : en mars-avril, puis en juillet-août. Elles atteignent, en moyenne annuelle, 800 à 1 000 millimètres à 2 200 mètres d'altitude sur les hauts plateaux yéménites, mais ne dépassent pas 100 millimètres dans le désert du Ramlat as-Sab'atayn, au pied des hauts plateaux qui bordent la côte. Dans ce secteur, les températures élevées, responsables d'une très forte évaporation, rendent plus difficiles encore les conditions de vie. Les plantes qui

y poussent aujourd'hui sont des arbres et des arbustes épineux, tels l'acacia et des tamaris, dont les rares représentants se concentrent en bordure des wâdîs ou au pied des escarpements, où ils recueillent les eaux de ruissellement des hauts plateaux environnants. Quant à l'arbre à encens, *Boswellia sacra*, quelques pieds isolés subsistent en bordure du plateau du Jawl. Les plantes herbacées forment une steppe semi-désertique ; certaines colonisent les dunes, d'autres les sols salés des sebkas.

### Les témoins lacustres de l'Arabie heureuse

Les phases humides résultant de l'accentuation des flux de la mousson indienne au-dessus de l'Arabie méridionale ont abouti à la mise en place d'un réseau hydrographique. À partir de 8 700 ans avant le présent (cer-

taines dates seront données par rapport au «présent», c'est-à-dire en utilisant la convention qui pose 1950 comme date de référence) et pendant près de 1 000 ans, des vents de mousson particulièrement violents ont poussé, chaque été, de l'air humide jusqu'aux montagnes qui bordent le Yémen, une partie de cette masse d'air humide franchissant même la barrière montagneuse (voir l'encadré de la page 56). Les pluies étaient abondantes, non seulement sur les montagnes, mais aussi sur les espaces aujourd'hui désertiques du Yémen et de l'Arabie saoudite, jusqu'à proximité du tropique du Cancer. On le sait grâce à l'examen topographique de la région, où l'on observe, notamment, des amas de sédiments riches en matière végétale décomposée dans les wâdîs, des sédiments calcaires, ou travertins, et des terrasses fluviales, qui représentent les restes du lit d'anciens cours d'eau.



## La mousson indienne

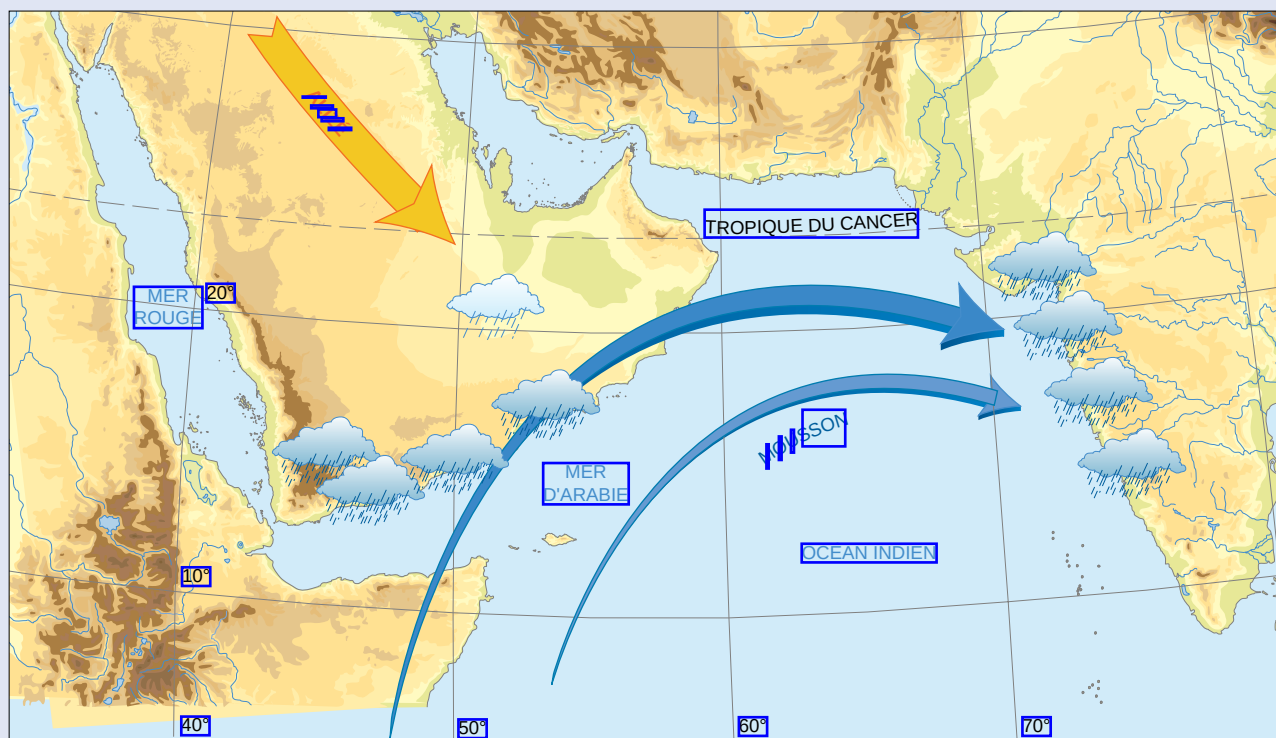
**E**n été, sur l'hémisphère Nord, une masse d'air chaud de terre (l'alizé) circule du Nord-Ouest vers le Sud-Est et se heurte à une masse d'air froid ayant balayé les océans (la mousson). À la rencontre de ces deux masses d'air, vers 30 degrés de latitude Sud, un important flux d'air humide de surface se forme : il traverse l'Océan Indien du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Ce flux, chargé de précipitations se heurte aux hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt (jusqu'à 3 700 mètres), qui bordent à l'Ouest et au Sud la péninsule arabique. Il est dévié vers le sous-continent indien, où il pénètre. Cette masse d'air humide franchit rarement les hauts reliefs, de sorte que l'intérieur de la péninsule arabique est généralement soumis aux vents secs et chauds de l'alizé du Nord-Ouest. En hiver, le renversement de gradient des températures et des pressions entre la mer et la terre modifie la direction des vents : c'est alors la mousson sèche de Nord-Est qui domine.

Depuis environ trois millions d'années, l'intensité des pluies de la mousson indienne d'été a varié notablement selon qu'il s'agissait d'une période glaciaire ou interglaciaire. Les cycles glaciaires-interglaciaires ont été reliés, dès 1924, par le mathématicien serbe Milutin Milankovitch, aux variations de l'insolation, c'est-à-dire de la quantité de chaleur reçue au sommet de l'atmosphère terrestre. L'insolation dépend de trois paramètres : l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite, la position des équinoxes et des solstices sur l'orbite elliptique de la Terre (la précession des équinoxes), enfin, la longueur

de l'ellipse que la Terre décrit autour du Soleil (l'excentricité de l'orbite) ; chacun de ces paramètres varie selon une périodicité propre, respectivement égale à 41 000 ans, de 19 000 à 23 000 ans et de 100 000 à 400 000 ans.

D'après la composition des foraminifères contenus dans les sédiments de la mer d'Arabie, la période de la mousson indienne varie de 19 000 à 23 000 ans, comme la précession des équinoxes : l'insolation dans l'hémisphère Nord est maximale quand la Terre passe au plus près du Soleil au moment du solstice d'été ; dans ces conditions, les différences de température et de pression entre les continents et les océans sont maximales, et la circulation de mousson est renforcée. D'autres facteurs, tels que la couverture de glace aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, la température de surface des océans ou l'agencement des reliefs montagneux, notamment du plateau tibétain, modifient la périodicité des moussons, entraînant des fluctuations mineures.

Ainsi, au cours des périodes interglaciaires, la mousson indienne a été particulièrement active : pour les périodes les plus proches, de fortes moussons ont eu lieu il y a environ 125 000, 103 000 et 80 000 ans, puis au début de l'Holocène, avec un maximum il y a 8 500 ans. Lors de ces moussons exceptionnelles, les puissants vents de mousson franchissaient la barrière montagneuse des hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt : les pluies étaient importantes sur la montagne. De surcroît, les nuages élevés franchissaient les cimes, apportant des pluies sur le désert d'Arabie.



Les pluies de la mousson indienne sont apportées par les vents du Sud-Ouest, chargés d'eau. Ils sont repoussés vers l'Est par les vents alizés de terre qui soufflent du Nord-Ouest. En période de mousson normale, les vents de mousson se heurtent aux reliefs de la côte Sud du Yémen et ne les franchissent pas. Les pluies tombent sur la côte Ouest de l'Inde. En période de moussons exceptionnelles,

les vents de mousson sont plus puissants, de sorte qu'ils franchissent les reliefs du Sud du Yémen : les pluies sont abondantes sur le relief. Qui plus est, la fraction supérieure de la masse d'air humide franchit le relief apportant des pluies à l'intérieur du Yémen. Les lacs aujourd'hui asséchés étaient alimentés par l'eau de pluie et par l'eau de ruissellement venant des montagnes.

Des lacs d'eau douce se sont également formés, alimentés par les rivières ou par les nappes souterraines. Lorsque la période de moussons exceptionnelles s'est achevée, les lacs se sont asséchés, et les sédiments qui s'étaient déposés sur leur fond ont été dégagés par l'érosion : seules des buttes témoins subsistent. Des échantillons qui y ont été prélevés ont été étudiés en laboratoire : on a analysé les sédiments, leur composition géochimique et leur contenu en grains de pollen.

Il y a environ 8 500 ans, pendant l'Holocène, les pluies de mousson étaient très fortes. Les sédiments lacustres découverts très récemment sur le site d'al-Hawa, dans le désert du Ramlat as-Sab'atayn, datent de cette période. Ce site était inaccessible avant la réunification du Yémen du Nord et du Yémen du Sud, qui eut lieu en 1990 ; en outre, on ne disposait d'aucune carte précise, ce qui rendait l'étude du site d'al-Hawa particulièrement difficile.

Les photographies satellitaires et aériennes analysées par Bruno Marcolongo, à l'Université de Padoue, ont permis aux archéologues d'identifier le site, ainsi qu'un important réseau hydrographique aujourd'hui disparu. Le désert du Ramlat as-Sab'atayn est aujourd'hui un vaste bassin formé de grandes dunes allongées d'environ 60 kilomètres de long et de 500 mètres de large, orientées en arc de cercle du Sud-Ouest au Nord-Est et séparées les unes des autres par de vastes couloirs atteignant jusqu'à trois kilomètres de large. Ce bassin recueille les rares eaux des wādîs alimentés par l'eau de ruissellement des montagnes, tels Jawf, Markha, Bayhan ou Dhana, qui viennent des hauts plateaux environnants, convergent vers le centre du bassin et finissent par se perdre dans le massif des dunes.

Étant donné toutes les informations tirées de la répartition et de l'analyse des sédiments, ainsi que de l'examen des relevés satellitaires, nous pensons qu'à l'époque des moussons exceptionnelles, le débit des wādîs était suffisant pour former un fleuve rejoignant le cours du wādî Hadramawt, en direction de l'océan Indien. L'épaisseur de certains dépôts alluviaux, dans les couloirs qui séparent les dunes, confirme une notable activité fluviale passée, dont il nous faudra confirmer l'âge. Nous avons également retrouvé des dépôts qui indiquent la présence d'un grand lac asséché, le paléolac d'al-Hawa, et d'autres vestiges de lacs disparus. Les



**2. LA PREMIÈRE DIGUE DE MA'RIB** a été construite, il y a plus de 4 000 ans, à la sortie d'un défilé de montagne. Progressivement perfectionnée par des écluses et des canaux, elle a été entretenue, voire régulièrement reconstruite (*en haut*), jusqu'à la fin du VI<sup>e</sup> siècle ; elle assurait l'alimentation en eau d'une vaste oasis (environ 22 kilomètres de long et 8 de large). À son apogée, la ville de Ma'rib comptait près de 50 000 habitants. Le temple de Bar'an (*en bas*) a été construit à proximité. Les fouilles sont dirigées par Burkhard Vogt, du Centre archéologique allemand de Sana'a.

vestiges de ces lacs sont des dépôts de calcaires lacustres blancs et de sédiments indurés où abondent les diatomées et les coquilles du mollusque d'eau douce *Melania tuberculata* ; aujourd'hui, ces témoins des paléolacs se présentent sous la forme de quelques affleurements disséminés, de quelques mètres d'épaisseur. À al-Hawa, ils surmontent une couche meuble de sédiments riches en matière organique.

Par la méthode de datation par le carbone 14, on a déterminé que ces sédiments ont été déposés entre 8 700 et 7 200 avant le présent, l'épisode lacustre ne commençant qu'après 7780. Entre 8 700 et 7 800 avant le présent, la composition minéralogique des sédiments témoigne d'une alternance de phases d'humidité et d'assèchement, ce qui est confirmé par l'extrême altération des grains de pollen exposés à l'air. Après 7780 avant le présent, le lac d'al-Hawa s'est formé, et les grains de pollen amassés indiquent la présence

d'une végétation riveraine dense de fougères et de roseaux de type *Typha*.

### La végétation passée

En reliant les variations de l'extension des roseaux et celles des mesures du rapport isotopique de l'oxygène et du carbone réalisées sur les carbonates, on suit les oscillations du niveau des paléolacs. Lorsque l'évaporation est intense, le niveau du lac s'abaisse, et l'eau s'enrichit en isotope lourd de l'oxygène (oxygène 18). Les roseaux qui poussent sur les vastes zones marécageuses dégagées sur les bords du lac provoquent alors une augmentation du dioxyde de carbone (celui-ci est libéré par la respiration des végétaux et par la décomposition de la matière organique) : la concentration en carbone 13 dans les sédiments diminue. Les valeurs des concentrations en oxygène 18 et en carbone 13 dans les carbonates s'inversent lorsque le niveau du lac est haut.

La végétation des environs du paléolac al-Hawa était celle d'écosystèmes steppiques semi-désertiques, tout à fait semblables à ceux qui caractérisent aujourd'hui le désert du Ramlat as-Sab'atayn. Les dunes étaient fixées par la végétation herbacée ; en revanche, les arbres, tel l'acacia, étaient rares. Ce résultat est surprenant, car, à la même époque, en Afrique du Nord, on observe une extension quasi générale des savanes de type tropical jusqu'à proximité du tropique, en Mauritanie, au Niger et au Soudan.

En Arabie, si l'augmentation des pluies de la mousson indienne a permis la recharge des nappes phréatiques

et l'extension de grands lacs, elle n'a pas eu d'influence notable sur la couverture végétale, qui est restée la même qu'aujourd'hui. Les hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt ont vraisemblablement fonctionné comme une barrière écologique, interdisant la migration des espèces végétales tropicales. Celles-ci sont restées cantonnées sur l'étroit littoral de l'océan Indien et de la mer Rouge. L'importance de l'évaporation liée à la permanence de vents du Nord peut aussi expliquer en partie la persistance de ces écosystèmes subdésertiques.

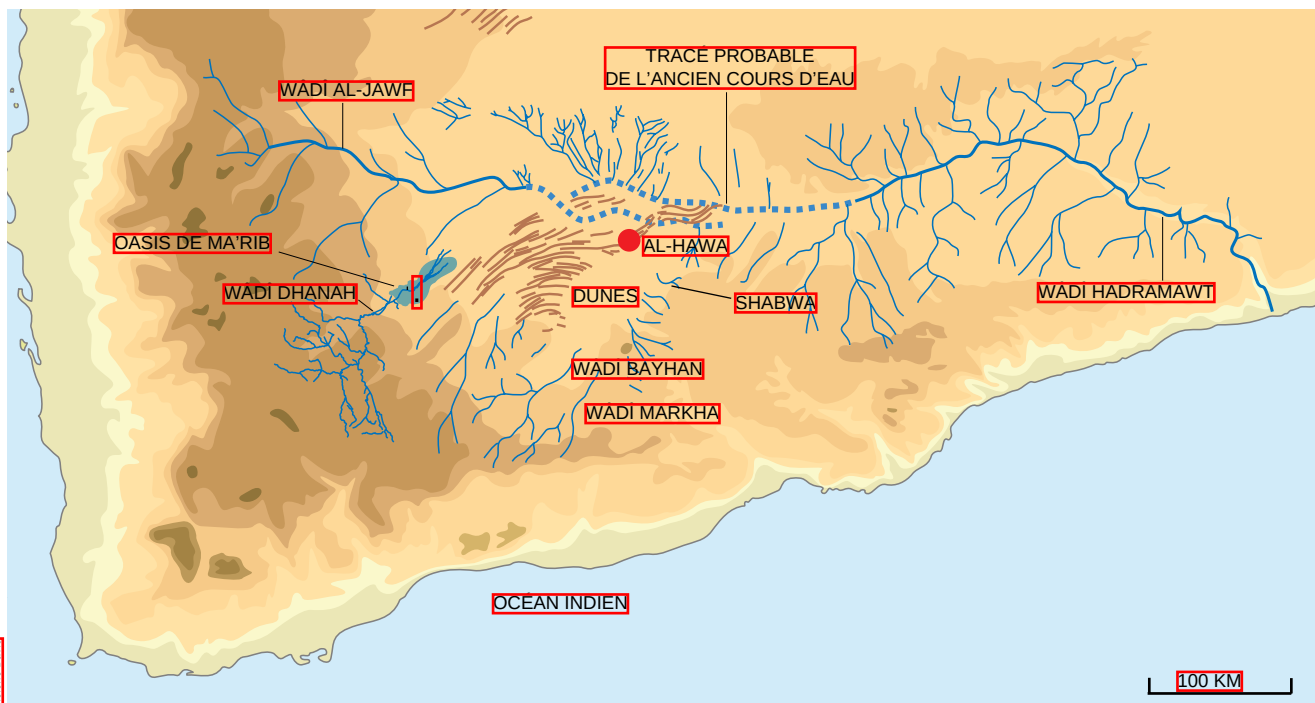
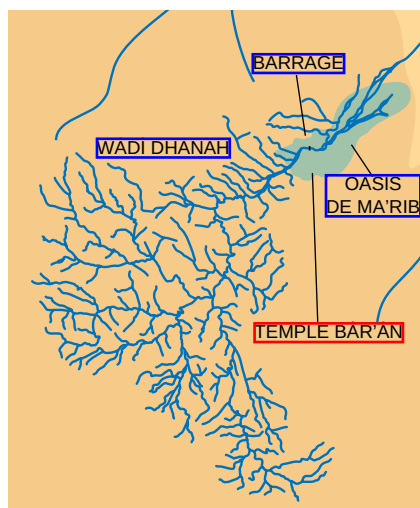
Certains grains de pollen contenus dans les sédiments du paléolac d'al-Hawa proviennent de plantes qui appartiennent aux écosystèmes tempérés ou d'altitude localisés au Nord ou à l'Est de la péninsule arabique, au Moyen Orient ou dans les monts Zagros : c'est le cas du cèdre, du chêne, du hêtre, du bouleau et du charme. Ces essences n'ont jamais poussé au Yémen, mais les vents du Nord étaient suffisamment violents pour les transporter sur plusieurs milliers de kilomètres.

### Un paléoréseau

D'autres paléolacs ont été trouvés, plus au Nord, notamment sur le site lacustre de Mundafan, dans le désert du Rub al-Khali, en Arabie saoudite. Ce site a

été étudié par Harold McClure, de l'Université de Londres, et par Ann El Moslimany, de l'Université de Washington. Malheureusement, les grains de pollen y ont été très mal conservés. En revanche, la datation des sédiments de ce site par le carbone 14 a révélé que l'épisode lacustre holocène a duré près de 3 000 ans. Ainsi, à al-Hawa, les vestiges que nous avons recueillis ne représentent qu'un épisode incomplet de cette longue période humide. Les travaux en cours sur ce site et ceux que l'on prévoit dans le secteur de Shabwa, un autre site lacustre situé à quelques dizaines de kilomètres au Sud-Est d'al-Hawa, devraient nous permettre de combler cette lacune, mais aussi de rechercher les traces de fortes moussons antérieures. Selon Franck Sirocko et ses collègues de l'Université de Kiel et du CNRS, qui ont étudié des sédiments en mer d'Arabie, les pluies de mousson ont commencé à augmenter il y a 14 000 ans. Nous espérons retrouver la trace de cette augmentation sur le continent, sous la forme de paléolacs ou d'apports de sédiments par les rivières venant des hauts plateaux.

Quelle était la configuration du réseau hydrographique qui, 3 000 ans durant, alimentait ces étendues lacustres ? Un grand système hydrographique semble avoir existé dans cette région. Il aurait sillonné la péninsule



**3. UN PALEOFLEUVE** traversait sans doute le désert du Ramlat as-Sab'atayn : les cours actuels des deux wadis Jawf et Hadramawt auraient été reliés par un bras aujourd'hui asséché (la zone en pointillés). Le tracé de ce paléofleuve a été reconstruit par B. Marcolongo, de l'Uni-

versité de Padoue, d'après les amas de sédiments, témoins d'écoulements fluviaux passés. Tous ces wadis sont secs la plupart du temps et ne sont en eau qu'au moment des moussons. Le réseau des wadis qui alimentaient la retenue de Ma'rib est détaillé dans l'image supérieure.

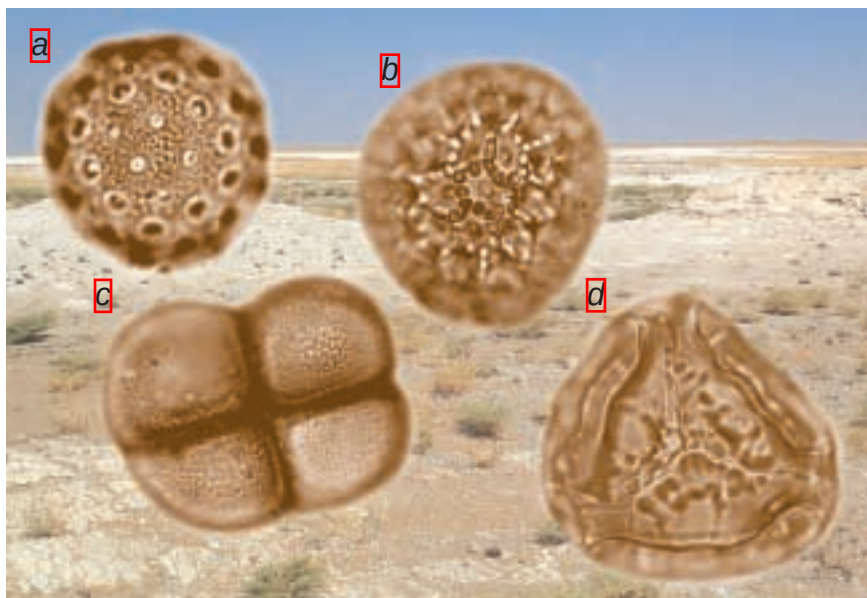
arabique d'Ouest en Est. Prenant naissance à l'Ouest du désert du Ramlat as-Sab'atayn, le Al-Jawf aurait formé un long fleuve unique avec l'Hadramawt, se jetant dans le golfe d'Aden. Aujourd'hui, ces deux fleuves sont séparés par le désert, mais des dépôts sédimentaires semblent indiquer qu'un tronçon de fleuve disparu les aurait reliés. Ce grand fleuve aurait été alimenté par tout le réseau des wâdîs venant des hauts plateaux voisins. La datation des sédiments fluviaux est difficile, car le fleuve entraîne des particules arrachées aux montagnes, dont on ne sait évaluer ni l'origine ni l'âge.

D'après les vestiges que nous avons retrouvés, les lacs semblent disparaître d'Arabie méridionale il y a environ 6 000 ans. Après cette date, l'aridité domine, interrompue seulement par quelques épisodes humides mineurs ou par de fortes pluies saisonnières. Pour repousser l'environnement désertique qui progressait, les habitants des royaumes Sud-arabiques ont élaboré d'importants dispositifs d'irrigation. Ils collectaient les eaux de ruissellement issues des pluies de mousson qui s'abattaient sur les hauts plateaux. La digue de Ma'rib illustre cet effort d'une société très élaborée, tournée vers l'agriculture et les échanges commerciaux.

### La digue de Ma'rib

Cette digue de terre fut construite il y a environ 4 000 ans à la sortie d'un défilé ; elle était longue de 680 mètres. La retenue était alimentée par le wâdî Dhana et collectait les pluies d'un bassin versant d'environ 10 000 kilomètres carrés. Elle assurait l'irrigation d'une oasis, au Nord, de 4 300 hectares, et d'une autre, au Sud, de 5 300 hectares. L'eau s'élevait jusqu'au niveau du champ supérieur et irriguait d'un coup toute l'oasis ; le champ inférieur recevait l'excès d'eau du champ supérieur. Les champs étaient submergés d'une lame d'eau qui s'infiltrait lentement dans le sol. Un système d'écluses, de déversoirs et de canaux réglait les débits. De surcroît, la digue retenait les limons, de sorte que le sol était enrichi, et la production agricole améliorée. L'oasis de Ma'rib aurait nourri jusqu'à 50 000 personnes.

Ce système a fonctionné pendant plusieurs millénaires, avant d'être progressivement abandonné. Une des principales raisons de cet abandon



**4. LES GRAINS DE POLLEN** et les spores contenus dans les sédiments déposés au fond des lacs disparus du Yémen informent sur la flore passée. On y retrouve des grains de pollen de plantes herbacées poussant en milieu sec et salé, tels *Amaranthaceae* (a) et *Tribullus* (b), en milieu humide *Chenopodiaceae*/*Amaranthaceae* (près des étendues d'eau douce), tel le roseau *Typha* (c). On trouve également des spores de fougères (d).

est l'accumulation des limons : en 1 000 ans, le niveau des champs s'était élevé de 10 mètres. La pression des limons faisait régulièrement céder la digue, qui fut reconstruite sans relâche jusqu'à la fin du VI<sup>e</sup> siècle. Le Coran relate ainsi la destruction définitive du barrage, vers 580 : « Certes, les Sabâ' dans leur habitat, avaient un signe. [C'était] deux jardins à dextre et senestre. "Mangez de l'attribution de votre Seigneur et soyez-lui reconnaissants ! [Ce pays est] un pays délicieux. [Allah] est un seigneur absolu." Les Sabâ' se détournèrent [cependant de nous]... Nous déchaînâmes contre eux l'inondation d'al-'Arim et, au lieu de leurs deux jardins, Nous leur donnâmes deux jardins poussant [des végétaux aux] fruits amers, des tamaris et de rares baies de jujubier. Cela, Nous leur avons donné en prix de ce qu'ils furent incrédules » (Sourate 34, 15-17).

Peu d'équipes multidisciplinaires regroupant archéologues, géologues spécialistes des milieux lacustres, de l'environnement et du climat du passé travaillent au Yémen, surtout dans son désert intérieur, le Ramlat as-Sab'atayn. Les études menées sur le site d'al-Hawa montrent à quelles difficultés les habitants ont été – et sont encore – confrontés pour pratiquer l'agriculture et l'élevage dans un écosystème aride. Différentes civilisations se sont succédées et ont évolué en fonction de leur capacité à maîtriser et à gérer les pluies et l'irrigation.

L'histoire de la civilisation disparue du Yémen soulève la question de l'adaptation de l'homme aux changements du climat et nous permettra de déterminer dans quelle mesure ces changements ont influé sur la prospérité, puis sur la décadence des civilisations. Enfin, les recherches menées sur les écosystèmes d'Arabie, parce qu'elles nous permettent de reconstituer les climats et les écosystèmes du passé, nous seront utiles pour valider les modèles du climat global de demain.

Anne-Marie LEZINE est directeur de recherche au CNRS, dans le Laboratoire de paléontologie et stratigraphie de l'Université Paris VI.

A.-M. LEZINE, *West African Paleoclimats during the Last Climatic Cycle from Atlantic Deep Sea Pollen Record*, in *Quaternary Research*, vol. 35, pp. 456-463, 1991.

A.-M. LEZINE, J. CASANOVA, *Correlated Oceanic and Continental Records Demonstrate the Past Climate and Hydrology of North Africa (0-140Kyr)*, in *Geology*, vol 19, pp. 307-310, 1991.

A.-M. LEZINE et al., *Holocene Lakes from Ramlat As-Sab'atayn (Yemen) Illustrate the Impact of Monsoon Activity in Southern Arabia*, in *Quaternary Research*, sous presse.

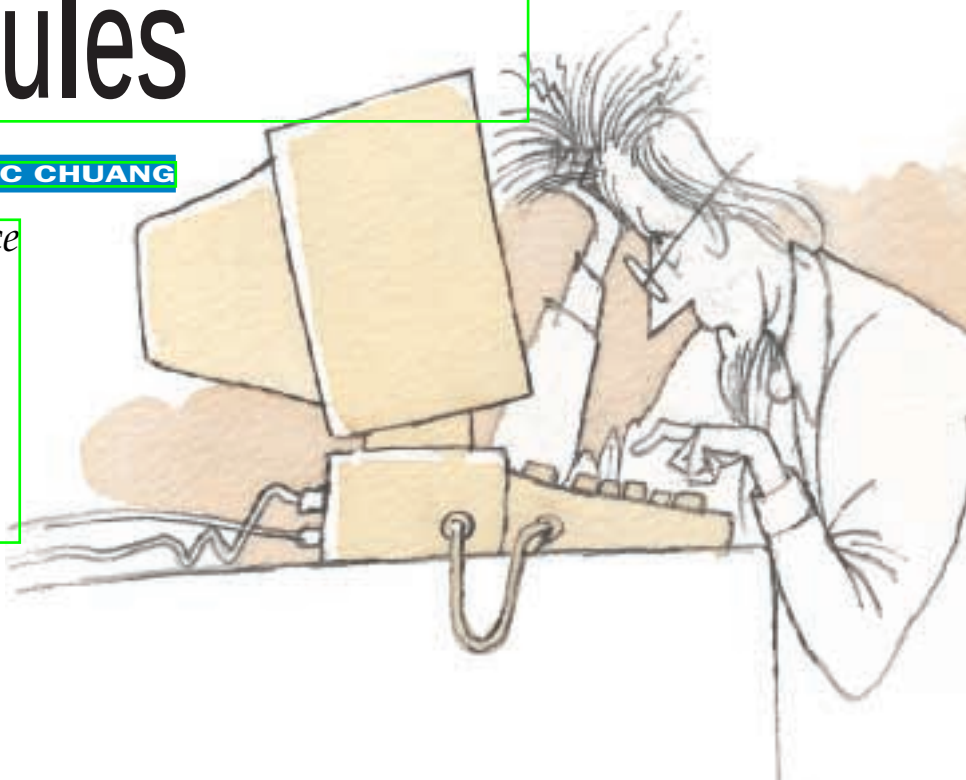
M.-L. INIZAN et al., *Paléolacs et peuplements holocènes du Yémen : le Ramlat as-Sabatayn*, in *Paléorient*, sous presse.



# Calcul quantique avec des molécules

NEIL GERSHENFELD • ISAAC CHUANG

*Les techniques de résonance magnétique nucléaire transforment les molécules des liquides en ordinateurs aux performances hors du commun.*



**P**our trouver les diviseurs d'un nombre de 400 chiffres, exploiter le matériel nécessaire pour percer certains codes secrets, il faudrait, au plus vite, le pouvoir de calcul des ordinateurs actuels, des milliards d'années de calcul. En revanche, un nouveau type d'ordinateurs, utilisant des interactions quantiques, accomplirait cette décomposition en une année environ et mettrait en échec nombre de procédures cryptographiques. Aujourd'hui, les informations protégées sont encore en sécurité, car personne n'a réussi à construire un ordinateur quantique, mais la faisabilité d'un tel dispositif est établie. Loin de ressembler à la machine qui trône sur votre bureau, un tel ordinateur ressemblerait plutôt à la tasse de café posée à côté.

Des ordinateurs quantiques utilisant les molécules d'un liquide pourraient surpasser les limites des ordinateurs classiques. La miniaturisation de ces derniers finira inéluctablement par buter sur ses limites physiques fondamentales (notamment, la taille des transistors ou des connexions électriques ne peut être inférieure au diamètre d'un atome). Le perfectionnement des ordinateurs risque aussi d'être stoppé si la fabrication de microprocesseurs toujours plus puissants se révèle trop coûteuse.

La magie de la mécanique quantique pourrait résoudre ces deux problèmes.

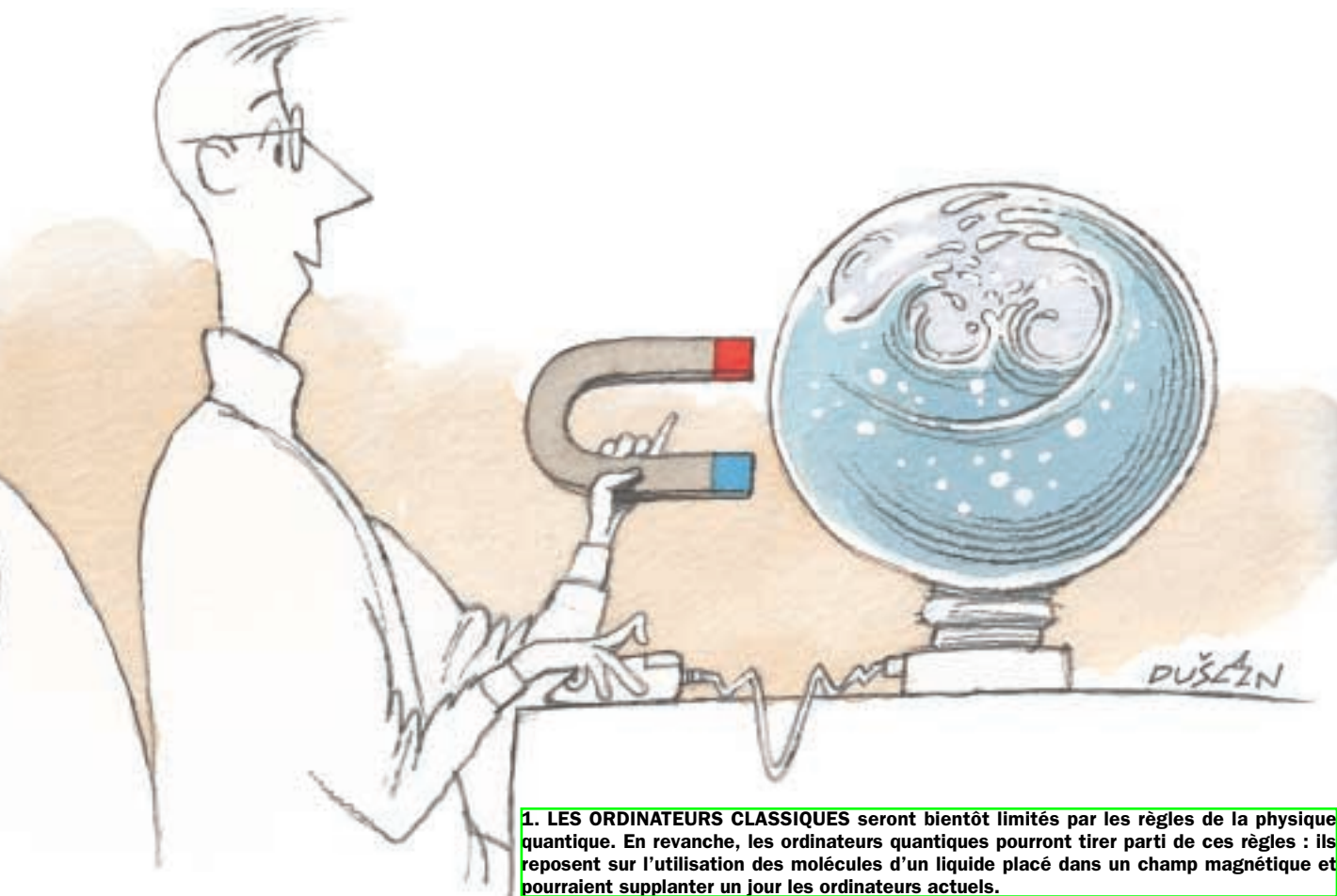
La supériorité des ordinateurs quantiques réside dans leur mode de codage du bit, l'unité fondamentale d'information. Dans les ordinateurs, les données sont codées par des mots binaires, c'est-à-dire des groupes de chiffres binaires, ou bits, 0 ou 1. Dans les ordinateurs classiques, ces valeurs 0 ou 1 sont associées à des tensions électriques des transistors. Un bit quantique, ou «qubit», peut être codé par un atome occupant l'un de deux états différents que l'on peut également désigner par 0 et 1. À l'instar de deux bits classiques, deux qubits peuvent occuper quatre états différents et bien définis (0 et 0, 0 et 1, 1 et 0, ou 1 et 1).

Mais, contrairement aux bits classiques, les qubits peuvent occuper simultanément les états 0 et 1, avec une probabilité d'occupation déterminée. La description d'un ordinateur quantique à deux qubits exige donc quatre coefficients : deux probabilités pour chaque qubit ; plus généralement, la description de  $n$  qubits néces-

site  $2^n$  nombres, ce qui devient rapidement considérable. Par exemple, si  $n$  est égal à 50, la description des probabilités de tous les états accessibles exige environ  $10^{15}$  nombres, ce qui dépasse la capacité du plus gros des ordinateurs classiques. Un ordinateur quantique offre des perspectives de puissance fantastiques : non seulement il occupera au même instant de multiples états (phénomène de «superposition»), mais il agira simultanément sur tous ces états. Autrement dit, une seule unité de traitement effectuera des myriades d'opérations en parallèle.

## Une action à distance

Les qubits possèdent une autre propriété bien plus étrange et bien plus utile. Imaginons qu'un processus physique émette deux photons (des particules de lumière), l'un vers la droite, l'autre vers la gauche, et que les champs électriques oscillants associés à ces deux photons aient des orientations (nommées polarisations)



**1. LES ORDINATEURS CLASSIQUES** seront bientôt limités par les règles de la physique quantique. En revanche, les ordinateurs quantiques pourront tirer parti de ces règles : ils reposent sur l'utilisation des molécules d'un liquide placé dans un champ magnétique et pourraient supplanter un jour les ordinateurs actuels.

opposées. Tant qu'on ne les mesure pas, ces polarisations restent indéterminées ; mais, comme l'ont souligné Albert Einstein et quelques autres physiciens au début du siècle, la mesure de la polarisation d'un des deux photons détermine instantanément l'état de polarisation de l'autre, quelle que soit la distance entre les deux particules. Cette forte corrélation, aux allures surnaturelles, entre les particules connecte les qubits d'un ordinateur quantique.

En 1994, tirant profit de la corrélation et de la superposition quantiques, Peter Shor, des laboratoires AT&T, a conçu un algorithme grâce auquel, en théorie, un ordinateur quantique factoriserait un nombre bien plus rapidement que le plus puissant des ordinateurs classiques. Cette découverte eut un impact considérable : la sûreté des systèmes de cryptage, fondée sur la difficulté à factoriser les grands nombres, était soudain menacée. La découverte de P. Shor émut les milieux financiers, qui utilisent ce mode de cryptage pour

protéger le secret d'un grand nombre de transactions.

Personne n'avait imaginé qu'une telle percée viendrait d'une discipline étrangère à l'informatique ou à la théorie des nombres. Les informaticiens commencèrent à s'intéresser à la mécanique quantique, et certains physiciens à fureter du côté de l'informatique.

### Manipuler les spins

Les chercheurs qui se penchèrent sur l'algorithme de P. Shor conclurent que la construction d'un ordinateur quantique opérationnel serait d'une difficulté diabolique : quasiment toute interaction d'un système quantique avec son environnement (par exemple, un atome qui percute soit un autre atome, soit un photon égaré) constitue une mesure. La superposition des états quantiques du système se transforme alors en un état unique bien défini, celui détecté par l'observateur. Cet effet de «décohérence» empêche de poursuivre les calculs quantiques. Si l'on veut maintenir la cohérence

d'un ordinateur quantique, il faut isoler ses mécanismes internes de l'environnement. Cependant, ces mécanismes doivent rester accessibles, car on doit charger les programmes, les exécuter et extraire les résultats.

Par d'élégantes expériences, Christopher Monroe et David Wineland, de l'Institut américain des standards et de la technologie, et Jeff Kimble, de l'Institut de technologie de Californie, avaient tenté de résoudre ce problème en isolant soigneusement le cœur quantique de leurs ordinateurs : quelques particules chargées peuvent être piégées dans des champs électromagnétiques, puis refroidies en états purement quantiques. Toutefois, ces dispositifs n'effectuent que des opérations quantiques rudimentaires, car ils ne comportent que quelques bits et ils perdent très rapidement leur cohérence.

Comment exploiter un jour un ordinateur quantique s'il faut l'isoler à ce point de son environnement ? L'année dernière, nous avons compris qu'un liquide ordinaire pouvait effec-

tuer toutes les étapes d'un calcul quantique, à savoir enregistrer les conditions initiales, effectuer des opérations logiques sur l'ensemble des superpositions d'états quantiques (qui sont corrélées), et restituer le résultat final. Avec un autre groupe de l'Université Harvard et de l'Institut de technologie du Massachusetts, nous avons découvert comment utiliser les techniques de la résonance magnétique nucléaire (ou RMN, plus connue pour son application à l'imagerie médicale nommée IRM) pour manipuler des informations

quantiques dans des fluides. Les chimistes, qui utilisent la RMN depuis des décennies pour étudier des molécules complexes, font de l'informatique quantique sans le savoir!

Un tube à essai rempli d'un liquide composé de molécules appropriées contient non plus un seul, mais un nombre fantastique d'ordinateurs quantiques individuels et résout le problème de la perte de cohérence : puisque chaque qubit résulte d'un vaste ensemble de molécules, la perte de cohérence de certaines molécules, lorsqu'on

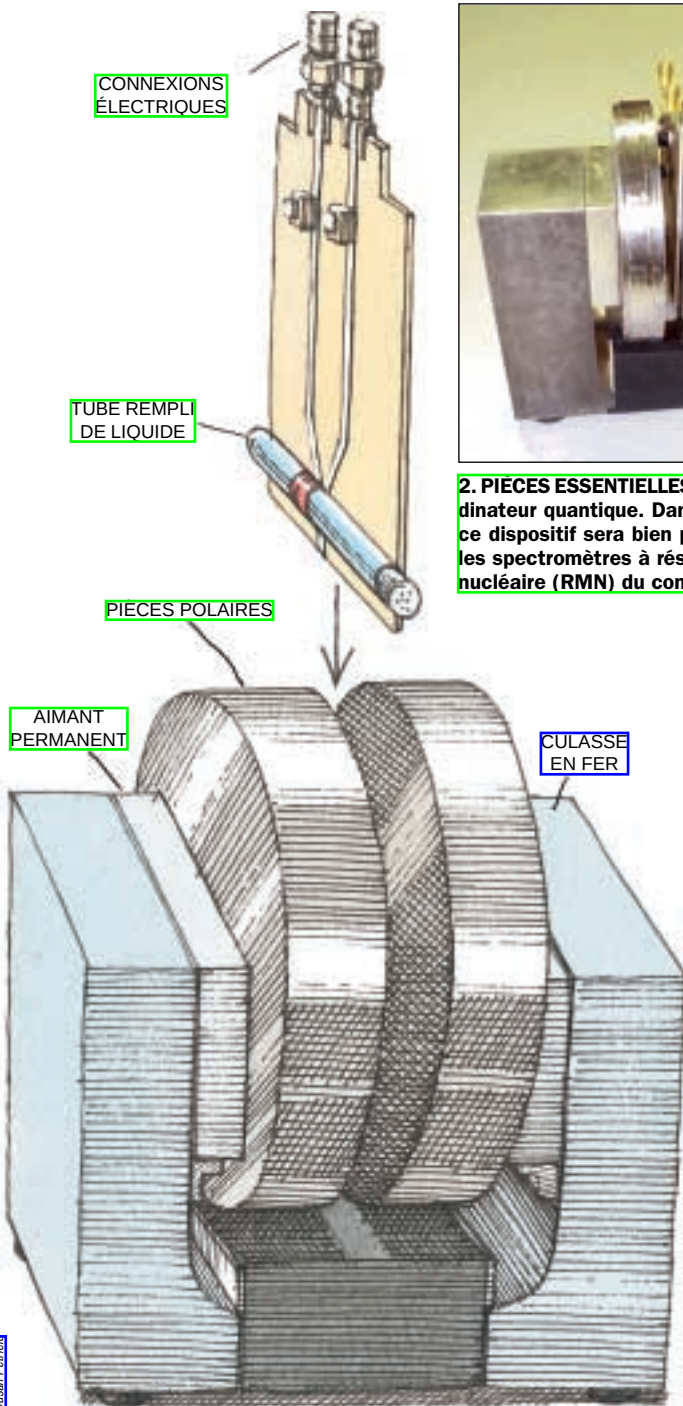
manipule le système ou que l'on mesure son état, n'a guère d'importance.

La résonance magnétique nucléaire agit sur les particules des noyaux atomiques composant les molécules du fluide. Les particules possédant un spin (le moment cinétique lié à leur rotation intrinsèque) se comportent, selon une analogie classique, comme de minuscules aimants. Placés dans un champ magnétique externe, ces «aimants» s'orientent dans la direction du champ. Quand on mesure la projection du spin dans cette direction, deux valeurs opposées sont possibles : dans le sens du champ (parallèle) ou dans le sens opposé (antiparallèle). Ces deux valeurs correspondent à deux états quantiques d'énergies différentes et constituent naturellement un qubit. On peut associer, par exemple, au spin parallèle le nombre 1 et au spin antiparallèle le nombre 0.

L'état de spin parallèle possède une énergie inférieure à celle de l'état antiparallèle (la différence entre ces deux énergies est proportionnelle à l'intensité du champ extérieur). Dans un champ magnétique nul, on mesurerait autant de spins dans un état que dans l'autre. Le champ appliqué favorise l'état parallèle, ce qui crée un léger déséquilibre entre les nombres de spins parallèles et antiparallèles : cette infime différence, de l'ordre de un millionième pour un champ de l'ordre de un tesla, est détectable par RMN.

La RMN fait intervenir, outre le champ magnétique constant, des champs électromagnétiques variables : l'application, pendant une courte durée, d'un champ magnétique tournant autour de l'axe du champ magnétique constant, à la bonne fréquence (déterminée par l'intensité du champ constant et par les propriétés intrinsèques de la particule mise en jeu), fait basculer une partie des spins entre les états parallèle et antiparallèle. On peut ainsi réorienter à volonté les spins des noyaux.

Par exemple, on modifie l'orientation de protons (qui, avec les neutrons, constituent les noyaux atomiques), placés dans un champ magnétique constant de 10 teslas, en appliquant un champ magnétique oscillant à 400 mégahertz (autrement dit, aux fréquences radio). Pendant la durée d'application du champ oscillant (typiquement quelques millièmes de seconde), les spins des noyaux tournent autour de la direc-



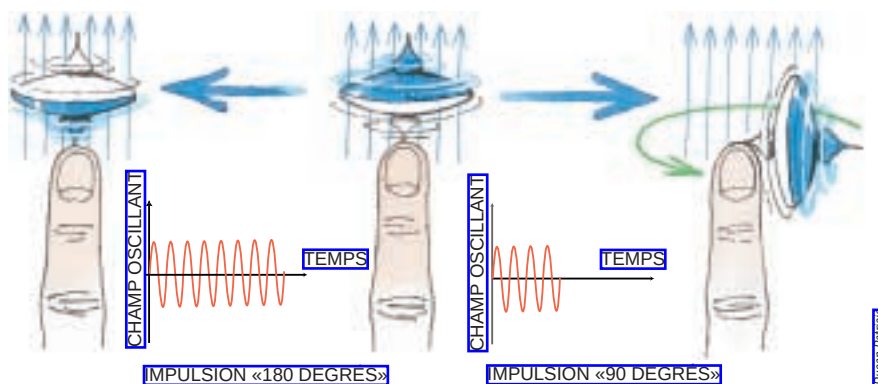
**2. PIÈCES ESSENTIELLES d'un prototype d'ordinateur quantique. Dans quelques années, ce dispositif sera bien plus performant que les spectromètres à résonance magnétique nucléaire (RMN) du commerce.**

tion du champ variable, lequel est habituellement perpendiculaire au champ magnétique constant. En moyenne, le spin bascule d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'axe du champ constant, angle qui dépend de la durée d'application du champ tournant. Si cette durée correspond à un angle  $\alpha$  de 180 degrés, l'excès de noyaux magnétiques antérieurement parallèles au champ fixe pointe alors dans la direction opposée, antiparallèle au champ fixe. Une impulsion deux fois plus brève laisse les particules avec une probabilité égale d'être parallèles ou antiparallèles au champ fixe ; le spin a alors basculé en moyenne de 90 degrés, et pointe perpendiculairement au champ fixe. Puis, comme une toupie d'enfant très inclinée par rapport à l'axe vertical de la gravitation, le spin effectue un mouvement de rotation, ou précession, autour du champ fixe, avec une fréquence caractéristique. Les particules effectuant une telle précession émettent un faible signal radio, détectable par le dispositif de RMN.

En fait, lors d'une expérience de RMN, les particules ne subissent pas uniquement l'action des champs extérieurs appliqués, car chaque noyau atomique modifie le champ magnétique dans son voisinage. Dans un liquide, l'agitation constante des molécules neutralise la plupart de ces perturbations magnétiques locales. En revanche, dans une même molécule, un noyau magnétique peut influencer ses voisins en perturbant les électrons qui sont en orbite autour d'eux.

Plutôt qu'une gêne, cette interaction au sein d'une molécule est un atout. On construit facilement, grâce à elle, une «porte» logique (l'unité de base d'un calcul) à l'aide de deux spins nucléaires. Pour nos expériences à deux spins, nous avons utilisé du chloroforme ( $\text{CHCl}_3$ ) afin de tirer profit de l'interaction des spins des noyaux d'hydrogène et de carbone. Le noyau du carbone ordinaire, le carbone 12, ayant un spin nul, nous avons utilisé du chloroforme enrichi en atomes de carbone pourvus d'un neutron supplémentaire, qui possèdent ainsi un spin nucléaire non nul.

Supposons que le spin de l'hydrogène soit dirigé, soit vers le haut, soit vers le bas, parallèlement ou antiparallèlement à un champ magnétique vertical, tandis que le spin du carbone pointe uniquement vers le



**3. ANALOGIE ENTRE UN NOYAU MAGNETIQUE (objet quantique) et une toupie (classique).** En présence d'un champ magnétique constant, le spin nucléaire s'aligne dans la direction du champ (au centre). Si on applique ensuite un champ oscillant à la fréquence appropriée, ce spin prend une autre orientation. Les courbes en rouge représentent la composante de ce champ tournant selon une direction perpendiculaire à celle du champ magnétique constant, en fonction du temps. Par exemple, une impulsion «180 degrés» (à gauche) inverse totalement le spin ; une impulsion «90 degrés» le bascule perpendiculairement à la direction du champ magnétique (flèches verticales). Après avoir basculé, le spin tourne autour de la direction du champ magnétique, comme le fait une toupie d'enfant.

haut, parallèlement à ce champ magnétique fixe. Une impulsion radio bien choisie réoriente le spin du carbone dans un plan horizontal (perpendiculaire au champ fixe). Le noyau de carbone commence alors un mouvement de précession autour du champ magnétique constant, avec une vitesse de rotation qui dépend de l'orientation, parallèle ou antiparallèle au champ magnétique constant, du noyau d'hydrogène de la molécule. Après un certain temps, le spin du carbone pointe selon une certaine direction, soit dans un sens, soit dans le sens opposé, selon que le spin de l'hydrogène voisin pointe vers le haut ou vers le bas. À cet instant, l'application d'une autre impulsion radio fait tourner le noyau de carbone de 90 degrés supplémentaires. Il s'oriente alors soit vers le bas, soit vers le haut, selon que l'hydrogène adjacent pointe, respectivement, vers le haut ou vers le bas.

Ces opérations correspondent à ce que les ingénieurs électroniciens nomment une porte logique «OU exclusif», qui serait mieux désignée sous le nom de porte «NON contrôlé» (car l'état d'une entrée détermine si le signal présenté à l'autre entrée est inversé à la sortie). Tandis que les ordinateurs classiques nécessitent des portes similaires à deux entrées et des portes NON à une entrée, un groupe de chercheurs a montré, en 1995, que l'on peut réaliser des calculs quantiques à l'aide de rotations opérant sur des spins individuels et de portes «NON contrôlé». En fait, les

portes logiques quantiques de ce type offrent plus de possibilités que leurs équivalents classiques, car les spins sur lesquels elles reposent peuvent être dans une superposition d'états parallèles et antiparallèles. Le calcul quantique peut donc opérer simultanément sur une combinaison d'entrées apparemment incompatibles.

## Deux choses à la fois

En 1996, avec Mark Kubinec, de l'Université de Berkeley, nous avons entrepris la construction d'un ordinateur quantique à deux bits, à partir d'un dé à coudre de chloroforme. Même pour un ordinateur aussi modeste, la préparation de l'état initial exige un travail considérable. Une succession d'impulsions radio agit sur les noyaux contenus dans le fluide expérimental, faisant basculer une partie des spins parallèles en excès, ce qui donne les proportions voulues de spins parallèles et antiparallèles. Puis on modifie séquentiellement ces qubits. Contrairement aux bits d'un ordinateur électronique classique, qui traversent en bon ordre des rangées de portes logiques à mesure que se déroulent les calculs, ces qubits ne vont nulle part : les portes logiques viennent à eux grâce à diverses manipulations utilisant la RMN. En somme, le programme à exécuter est traduit en une série d'impulsions radio.

Notre premier test du calcul quantique porta sur un ingénieux algorithme de recherche élaboré par Lov

Grover, des Laboratoires Bell. Avec un algorithme classique, la recherche d'un élément dans un ensemble de  $n$  objets exige en moyenne  $n/2$  tentatives. Étonnamment, l'algorithme de L. Grover localise l'objet en  $\sqrt{n}$  tentatives environ. Nous avons illustré ce gain de temps avec notre ordinateur quantique à deux bits, qui retrouve en une seule étape un objet, dans une liste de quatre objets. L'approche classique revient à ouvrir un cadenas à deux bits (à deux chiffres, chacun étant 0 ou 1) : on trouve très rarement la bonne combinaison du premier coup ; en moyenne il faut deux à trois tentatives.

Une limitation fondamentale de l'ordinateur à chloroforme est son petit

nombre de qubits. On pourrait augmenter ce nombre, mais  $n$  ne peut être plus grand que le nombre d'atomes de la molécule utilisée. Avec les dispositifs de RMN actuels, les plus gros ordinateurs quantiques manipuleraient seulement une dizaine de qubits (parce que, à température ambiante, l'intensité du signal désiré décroît rapidement à mesure que le nombre de noyaux magnétiques de la molécule augmente). Un équipement de RMN particulier, construit pour une molécule bien adaptée, multiplierait probablement ce nombre par trois ou par quatre.

Pour créer des ordinateurs encore plus gros, il faudrait recourir à d'autres techniques, comme le pompage optique, pour «refroidir» les spins : la

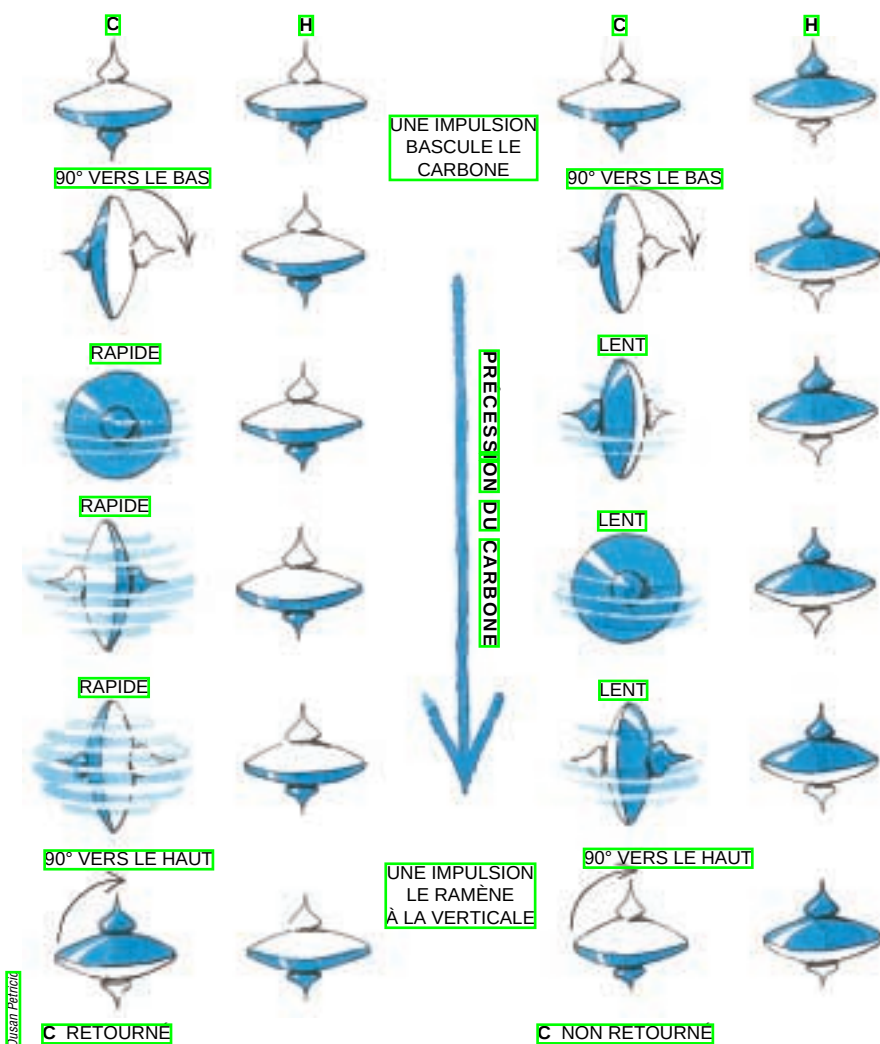
lumière émise par un laser orienterait presque tous les noyaux dans un même sens, sans qu'on ait besoin de geler le liquide (ce qui détruirait les grands temps de cohérence entre molécules).

La construction d'ordinateurs quantiques plus gros ne semble donc pas insurmontable. Quelle serait leur rapidité ? La durée d'un cycle dans un ordinateur quantique est déterminée par la plus petite vitesse d'inversion des spins. Celle-ci dépend à son tour des interactions entre les spins ; elle est généralement comprise entre quelques hertz et quelques centaines de hertz. Cela paraît très lent par rapport aux mégahertz (millions de cycles par seconde) atteints par les ordinateurs classiques. Pourtant, un ordinateur quantique disposant de suffisamment de qubits présenterait un tel parallélisme qu'il factoriserait un nombre de 400 chiffres en une année environ.

## Perspectives

Comment le construire, concrètement ? Trouver des molécules contenant suffisamment d'atomes ne pose pas de difficultés, mais, lorsque la taille des molécules augmente, les interactions entre les spins les plus distants deviennent trop faibles pour être utilisées comme portes logiques. Pourtant, tout n'est pas perdu : Seth Lloyd, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a montré que l'on pouvait en théorie construire de puissants ordinateurs quantiques, même si chaque atome n'interagit qu'avec ses plus proches voisins, à la manière des ordinateurs parallèles actuels. Ces ordinateurs quantiques pourraient utiliser de longues molécules hydrocarbonées et les techniques de la RMN. Les spins des nombreux noyaux atomiques, liés entre eux en longues chaînes, serviraient de qubits.

Un autre obstacle au calcul par RMN est la cohérence. Comme des nageurs synchronisés qui évolueraient sans repères, les noyaux d'un liquide perdent leur cohérence au bout de quelques secondes à quelques minutes, et les signaux de RMN qu'ils émettent se brouillent. Les plus grands temps de cohérence connus pour les fluides, comparés aux temps de cycle caractéristiques, suggèrent que les ordinateurs quantiques pourraient effectuer environ un millier d'opérations avant de perdre leur cohérence. Par chance, on peut repousser cette limite par l'ajout de



**4. UNE PORTE LOGIQUE «NON CONTRÔLÉ»** inverse l'une des deux entrées en fonction de l'état de la seconde entrée. Les auteurs ont fabriqué une porte «NON contrôlé» quantique en utilisant l'interaction entre les spins nucléaires de l'hydrogène et du carbone des molécules de chloroforme. Premièrement, une impulsion oscillante fait pivoter le noyau de carbone de 90 degrés. Ce noyau s'anime alors d'un mouvement de précession, qui est un peu plus rapide si l'hydrogène adjacent est dans un état que s'il est dans l'état opposé (sur la figure, on a noté «rapide» et «lent» pour simplifier). Après un laps de temps précis, une autre impulsion «90 degrés» provoque l'inversion du carbone (à gauche) ou le ramène dans sa position initiale (à droite), selon l'état de l'hydrogène voisin.

## CADENAS CLASSIQUE



CONDITIONS INITIALES ALÉATOIRES



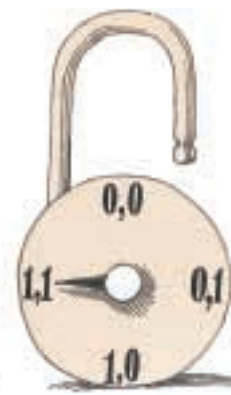
ON SE PLACE SUR LA PREMIÈRE COMBINAISON



PUIS ON ESSAIE LA SUIVANTE

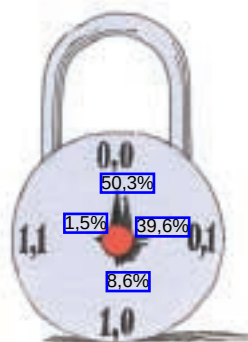


ET AINSI DE SUITE ...

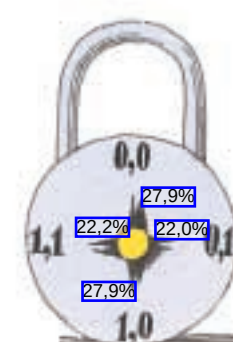


JUSQU'À CE QUE LE CADENAS S'OUVRE

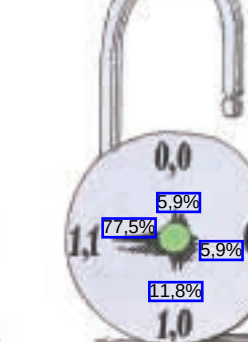
## CADENAS QUANTIQUE



CONDITIONS INITIALES ALÉATOIRES



ON PRÉPARE LE CADENAS DANS LES QUATRE ÉTATS À LA FOIS



L'ALGORITHME DE GROVER DISTINGUE LE BON ÉTAT

← PHASE DE PRÉPARATION →

**5. AVEC UN PEU DE MAGIE QUANTIQUE, on ouvre plus rapidement un cadenas. Par exemple, ouvrir un cadenas classique à deux bits peut demander jusqu'à quatre tentatives (en haut). En moyenne, un cadenas à  $n$  bits, qui a  $N = 2^n$  combinaisons possibles, exige  $N/2$  tentatives. Un cadenas quantique, en revanche, peut être placé simultanément dans de multiples états ; l'algorithme de Grover réduit alors le nombre de tentatives à environ  $\sqrt{N}$ . L'expérience réalisée par les auteurs (illustrée en bas) correspond à l'ouverture d'un cadenas quantique à deux bits. Après avoir été convenablement préparé, le cadenas livre sa combinaison dès la première tentative. Les pourcentages inscrits sur le cadenas indiquent les populations relatives mesurées pour chacun des quatre états quantiques.**

qubits qui corrigeraient les erreurs quantiques.

Bien que les ordinateurs classiques utilisent des bits supplémentaires pour détecter et corriger les erreurs, nombre de spécialistes ont été surpris lorsque P. Shor et d'autres chercheurs montrèrent que l'on pouvait faire de même avec les ordinateurs quantiques. Ils pensaient que la correction d'erreurs quantiques imposerait de mesurer l'état du système et donc de détruire sa cohérence quantique. Il apparaît que l'on peut corriger les erreurs quantiques à l'intérieur de l'ordinateur sans que l'opérateur ait à lire les états responsables (voir l'article de Jean-Paul Delahaye, page 66, pour plus de détails).

La construction d'ordinateurs quantiques suffisamment gros pour rivaliser avec les plus rapides des ordinateurs classiques sera particulièrement difficile, mais les enjeux sont considérables : même les plus modestes ordinateurs quantiques constitueront de superbes laboratoires

d'analyse des principes de la théorie quantique.

Paradoxalement, ces ordinateurs quantiques pourraient résoudre les problèmes inhérents aux puces électroniques, dont les minuscules transistors se comportent de manière quantique lorsqu'on réduit leur taille jusqu'aux échelles atomiques.

Les ordinateurs classiques ne résolvent que très péniblement ces problèmes, qui seraient probablement très

simples pour les ordinateurs quantiques, comme l'envisageait Richard Feynman dès 1982.

Un point très encourageant est que ces ordinateurs n'exigeront pas de minuscules circuits à l'échelle atomique : la nature a déjà fait le plus gros du travail en assemblant les composants de base. Les molécules effectuent elles-mêmes des calculs remarquables. Seulement, on ne leur avait jamais posé les bonnes questions.

Neil GERSHENFELD est professeur à l'Institut de technologie du Massachusetts. Isaac CHUANG travaille au Centre de recherche d'IBM à San Jose (Californie).

Charles SLICHTER, *Principles of Magnetic Resonance*, troisième édition, Springer-Verlag, 1992.

Charles BENNETT, *Quantum Information and Computation*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 10, pp. 24-30, octobre 1995.

Seth LLOYD, *Les ordinateurs quantiques*,

*Pour la Science*, n° 218, pp. 44-50, déc. 1995.

Neil GERSHENFELD et Isaac CHUANG, *Bulk Spin-Resonance Quantum Computation*, in *Science*, vol. 275, pp. 350-356, 17 janvier 1997.

Lov GROVER, *Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack*, in *Physical Review Letters*, vol. 79, n° 2, pp. 325-328, 14 juillet 1997.

Jean-Paul DELAHAYE, *Les ordinateurs quantiques*, *Pour la Science*, vol. 209, pp. 100-104, mars 1995.



# Les lois nouvelles de l'information quantique

JEAN-PAUL DELAHAYE

*Principe de non-duplication, téléportation, cryptographie inviolable, codes correcteurs, parallélisme illimité : l'informatique quantique est née.*

Quand, en 1937, George Stibitz fabrique dans sa cuisine un additionneur binaire à relais qui fonctionne avec deux chiffres (et qui ne fait donc que 4 additions différentes, 0+0, 0+1, 1+0 et 1+1), il ne suscite aucun enthousiasme. Quelques années plus tard, les descendants de sa machine, les ordinateurs, ont envahi le monde.

Les physiciens quantiques viennent de fabriquer l'équivalent quantique de l'additionneur de Stibitz et la théorie du calcul quantique prouve que, si l'on progresse normalement, les ordinateurs quantiques seront plus puissants que ne pourrait l'être un ordinateur classique de la taille du système solaire fonctionnant à la vitesse de la lumière avec des unités de mémoire de la taille de l'atome : nous vivons la naissance d'une technologie fondée sur les miracles théoriques du monde quantique, et qui projette ceux-ci dans notre réalité quotidienne.

Parallèlement à nos premiers pas vers ces calculateurs de rêve, une révolution modifie notre conception de l'information. Naïvement, nous avons trop longtemps adopté une vue préquantique de l'information. Pourtant ce qui «va de soi» concernant l'information est erroné si le monde est régi par la mécanique quantique. Le traitement de l'information dans un monde quantique est différent de sa manipulation dans un monde classique : il nous faut découvrir et pratiquer de nouvelles règles pour acquérir de l'information, la copier, la cacher, la mémoriser, la combiner, etc. En conséquence, la définition et la pratique du calcul changent et

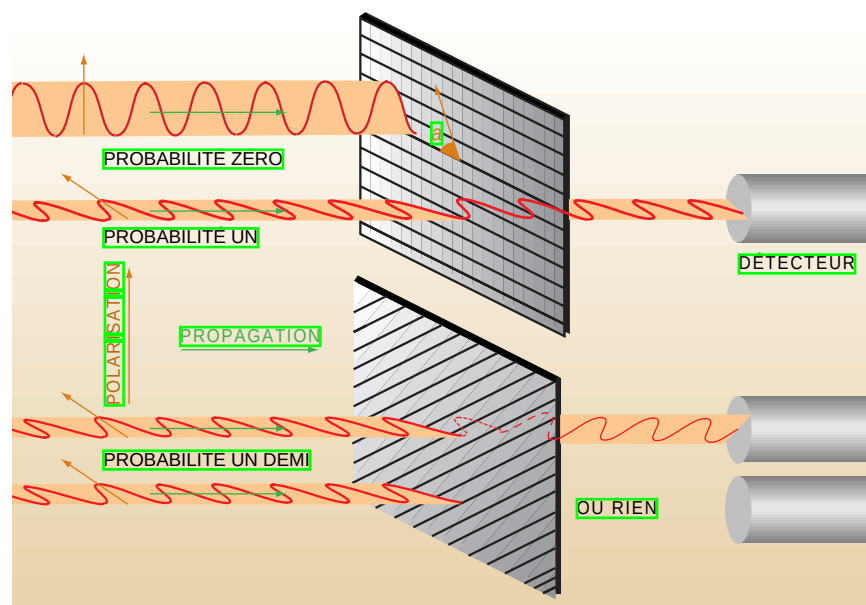
remettent en cause les fondements de l'informatique théorique.

Nous allons passer en revue dans cet article, en complément du précédent, quelques unes des différences entre information classique et information quantique. Précisons, avant cet examen, que nous adopterons une vue «physicienne» de l'information et que nous ne traitons évidemment pas d'information sémantique (le sens d'un mot, d'un texte, d'une musique, etc.) ou d'autres notions d'informa-

tion destinées à cerner des contenus non symboliques.

## Le lecteur quantique modifie le livre

Dans le monde classique, la consultation de l'information n'en modifie pas la teneur : lire un livre n'en change pas le texte, consulter un site Internet le laisse inchangé. Dans le monde classique, un objet est le même, qu'il soit connu ou pas. En revanche, l'ac-



**1. INFORMATION ALÉATOIRE ET DUPLICATION INTERDITE.** Un photon se propage selon une direction de polarisation perpendiculaire à son axe de propagation. Cette direction de polarisation est caractérisée par un angle  $a$ , qu'aucune mesure ne peut déterminer entièrement. Si, pour tenter de connaître cet angle, on place sur le trajet du photon un filtre polarisant d'angle 0, suivi d'un détecteur, alors le photon passera certainement si  $a$  est égal à 0, sera intercepté si  $a$  est égal à 90°, et passera avec une probabilité  $\cos^2 a$  pour les angles intermédiaires. La détection ou non du photon est donc insuffisante pour connaître l'angle  $a$ . Dans une suite de photons ayant chacun un angle de polarisation égal à 45 degrés, la probabilité que chaque photon soit détecté après passage par le filtre est 1/2. En passant par le filtre polarisant, le photon perd son orientation primitive, ce qui rend l'angle  $a$  définitivement inconnaisable et le photon impossible à dupliquer.

quisition de l'information sur certains systèmes quantiques les perturbe irrémédiablement. C'est une conséquence du principe d'incertitude d'Heisenberg : mesurer une grandeur associée à un objet interdit d'en connaître d'autres ; plus grave, elle en fait un autre objet. L'information quantique a une réalité physique différente de l'abstraction de l'information classique.

Cette propriété quantique selon laquelle la mesure modifie l'objet mesuré trouble depuis longtemps ceux qui tentent de comprendre la mécanique quantique. Un exemple de cette difficulté, la détermination de la direction de polarisation d'un photon, est détaillée sur la figure 1.

## Informations aléatoires et indéterminisme

Cet exemple du photon montre aussi que l'information quantique est parfois authentiquement aléatoire : si, après avoir polarisé un photon selon une direction  $a$ , on le fait passer dans un filtre polarisant dont l'axe fait un angle de  $45^\circ$  avec  $a$ , on le détectera exactement une fois sur deux. En envoyant dans le dispositif une série de photons identiques, on obtient une

suite de détections symbolisée par une suite de 1 et de 0 (1 pour une détection ; 0 pour une absence de détection) qui possède toutes les propriétés attendues d'une suite de 0 et de 1 parfaitement aléatoire. De telles suites sont intéressantes pour des méthodes de calcul comme la méthode de Monte-Carlo ou le cryptage des informations. Aussi cette propriété a-t-elle conduit à proposer des générateurs de bits aléatoires fondés sur des mécanismes quantiques (voir la rubrique Logique et calcul du mois de mars 1998, qui traite des suites aléatoires en informatique).

## Copier l'information

Les moines du Moyen Âge, nos photocopieuses et les lecteurs de disquette de nos ordinateurs copient des informations sans rencontrer d'obstacles fondamentaux. Dupliquer l'information classique et en faire de multiples versions est facile et ne coûte presque rien. Comme cette information n'est pas de nature physique, elle n'est pas liée à son support, et elle est donc copiable. Dans le monde quantique, la copie n'est pas toujours possible. Le principe de non-duplication («no-

cloning principle») énoncé par W. Wootters, W. Zurek et D. Dieks en 1982 exprime cette impossibilité : un état quantique inconnu ne peut pas être dupliqué.

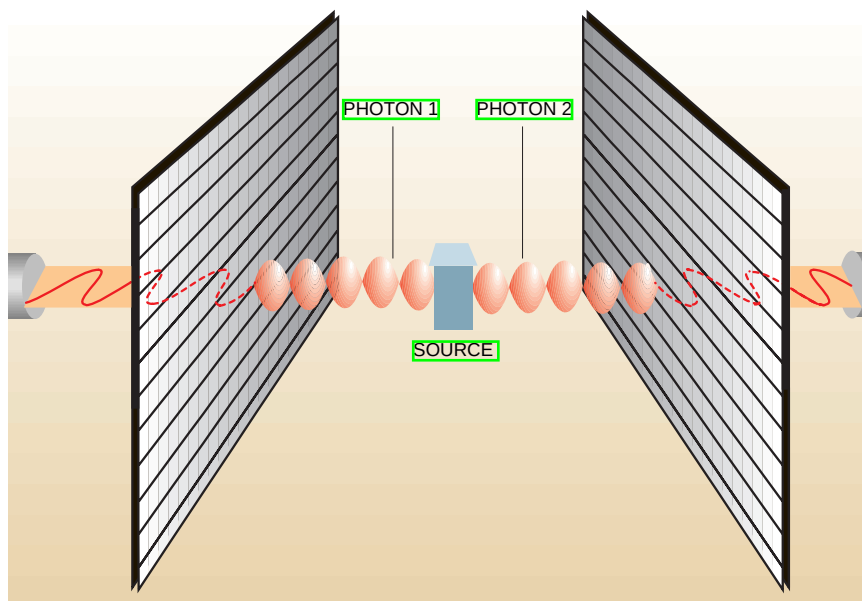
Reprenons l'exemple du photon : vous ne réussirez jamais à dupliquer un photon dont vous ne savez rien, car vous ne pourrez jamais connaître complètement son état quantique. Si vous essayez, dès que vous commencez à mesurer certaines quantités observables (la polarisation selon une direction par exemple), vous détruisez l'état quantique du photon et vous ne pouvez mesurer d'autres observables. Cette impossibilité interdit la duplication. Notons quand même que le principe de non-duplication n'empêche pas la création de plusieurs objets identiques (par exemple, plusieurs photons de même polarisation) lorsque l'information liée aux objets est connue, car elle résulte du moyen de fabrication.

## Cacher l'information, et distribuer des clefs secrètes

Cacher de l'information classique – ce qui est le but de la cryptographie – est théoriquement difficile : la plus grande partie des méthodes de cryptographie mathématique utilisées aujourd'hui se fonde sur des conjectures non démontrées et sont donc incertaines. Cet état de fait arrange les agences de renseignements, qui laissent croire que les codes légalement autorisés sont inviolables, alors qu'elles savent déchiffrer certains d'entre eux.

En revanche, la cryptographie quantique, qui utilise le principe de non-duplication des photons quantiques, propose des méthodes de distribution de clefs secrètes sûres et sans équivalent classique. Ces méthodes garantissent absolument le secret des échanges.

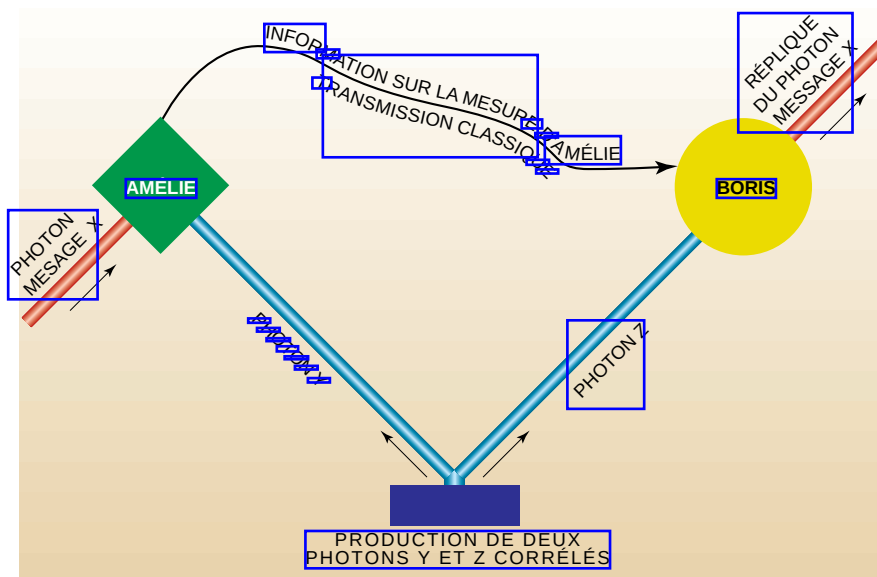
La cryptographie quantique est aujourd'hui suffisamment développée pour qu'avec des fibres optiques on sache distribuer des clefs secrètes entre des points distants de plusieurs dizaines de kilomètres. L'utilisation commerciale ou militaire de ces méthodes est sur le point de se faire (et a peut-être déjà eu lieu... de manière secrète).



**2. PHOTONS CORRELÉS ET INFORMATION ÉTALÉE.** On sait produire des paires de photons corrélés, c'est-à-dire dont les directions de polarisation sont inconnues, mais identiques. Une telle paire contient une information non locale, possibilité exclue dans le monde classique. Cette non-localité de l'information se manifeste de la manière suivante : si l'on dispose sur le trajet des photons des filtres polarisants de même orientation, les deux photons corrélés émis par une source seront tous les deux interceptés ou tous les deux transmis, quelle que soit la distance qui sépare les photons au moment de la mesure (on a mené des expériences où les photons sont séparés l'un de l'autre de 10 kilomètres). Tout se passe comme si le premier photon savait comment l'autre se comporte : aussi faut-il admettre que deux photons corrélés forment un objet physique unique qui contient une information étalée dans tout l'espace.

## Isoler l'information : la non-localité

Une autre propriété singulière de l'information quantique, étrange et difficile à comprendre, est la non-localité :



**3. LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE** est un moyen de faire voyager de l'information inconnue (un état quantique) à la vitesse de la lumière. Amélie veut transmettre l'état quantique d'un photon X à Boris. Elle ne peut prendre totalement connaissance de cet état quantique et doit quand même le communiquer par radio à Boris. Pour réaliser la téléportation de l'état quantique de X, Amélie et Boris créent une paire de photons corrélés Y et Z ; Amélie garde Y et Boris garde Z. (Les photons Y et Z pourront, peut être, un jour être créés et stockés avant qu'Amélie et Boris ne s'éloignent l'un de l'autre ; aujourd'hui, les photons corrélés sont créés entre Amélie et Boris et leur sont envoyés.) Amélie fait interagir X avec Y, ce qui lui fournit une information classique, qu'elle envoie par radio à Boris. Grâce à celle-ci, Boris peut opérer une transformation de Z qui place Z dans l'état quantique de X, lequel a donc été recréé. Dans une telle opération, en théorie applicable à des systèmes quantiques plus complexes, l'information quantique a été séparée en deux composantes, l'une classique qui voyage à la vitesse de la lumière par le signal radio, l'autre quantique qui voyage en quelque sorte instantanément par utilisation de la corrélation entre Y et Z. Le principe d'inconnaissabilité n'est pas violé, car ni Amélie ni Boris n'ont eu connaissance de l'état quantique téléporté X. Le principe de non-duplication est respecté lui aussi, car X, lors de la combinaison de X avec Y, a été détruit par Amélie.

une information quantique peut ne pas être localisée en un endroit précis, mais être diffuse dans l'espace entier comme si on l'avait parfaitement étalée. John Bell a en effet établi en 1964 que les prévisions de la mécanique quantique ne peuvent être reproduites par aucune théorie où chaque information est située en un point précis de l'espace.

Les conclusions de Bell ont été vérifiées par Alain Aspect, Jean Dalibard, Philippe Grangier et Gérard Roger en 1982 (voir la figure 2) : l'information n'est ni dans l'un des composants du système ni dans un autre, mais dans l'ensemble. J. Bell a ainsi montré que l'on pouvait coder l'information dans les corrélations entre diverses parties éloignées d'un système physique (possibilité qui est, par définition, exclue du modèle général des ordinateurs classiques où, à chaque instant, chaque information est localisée) et que l'on peut manipuler cette information non locale. Cette propriété confère une puissance supérieure au calcul quantique,

et les expériences de calcul quantique de ces derniers mois ont confirmé les prévisions des modèles théoriques.

La transmission d'une information dans le monde classique (relativiste) peut se faire à la vitesse de la lumière : il suffit d'envoyer un signal lumineux ou radio qui contient l'information que l'on veut faire voyager.

On ne peut, en principe, pas transmettre l'information d'un état quantique par codage d'un signal lumineux, car cette information est inconnue ; on pourrait alors envisager de transmettre le système quantique lui-même, mais, s'il possède une masse, il est impossible de le faire à la vitesse de la lumière. L'information quantique voyagerait-elle moins bien que l'information classique ?

### La téléportation

Il n'en est rien : la technique de téléportation, proposée en 1993 par C. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau,

R. Jozsa, A. Perez et W. Wootters fait voyager à la vitesse de la lumière un état quantique inconnu (voir la figure 3). Grâce à cette méthode étonnante (dont on se demande pourquoi elle n'a pas été découverte plus tôt), l'information quantique voyage aussi vite que l'information classique. En revanche, la non-localité de l'information quantique n'autorise pas la transmission de l'information à une vitesse supérieure à celle de la lumière : dans l'expérience avec les deux photons corrélés, je peux, en mesurant la polarisation de mon photon, certes connaître instantanément celle de mon partenaire éloigné, mais ce n'est pas un échange : celui-ci ne peut me transmettre instantanément une information choisie par lui.

Soulignons une particularité : la méthode de téléportation quantique, qui utilise des paires de photons corrélés (de l'information non locale), oblige que l'on détruise à son point de départ l'état quantique qu'on veut déplacer (si cela n'était pas le cas on pourrait le dupliquer, ce qui est interdit). De surcroît, ni l'émetteur ni le récepteur ne peuvent connaître complètement l'information qu'on fait ainsi voyager, car lire l'information, c'est la détruire.

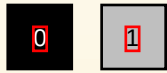
Ainsi, dans le monde quantique, la situation est nette : on peut transférer à la vitesse de la lumière l'information décrivant un système quantique, mais à la condition incontournable que le système complexe soit détruit en son point de départ et qu'on n'en prenne pas connaissance. Les auteurs de science-fiction semblent avoir deviné cette règle : dans *Star Trek*, par exemple, la téléportation qu'utilise l'équipage du vaisseau *Enterprise* pour de petites distances s'accompagne – sauf accident – de l'annihilation au point de départ du voyageur.

Les méthodes quantiques de téléportation ne sont pas seulement de la science-fiction, et si l'on est très loin de téléporter un être humain une équipe autrichienne a réussi, il y a quelques mois, à appliquer la méthode à l'état quantique d'un photon (voir *La téléportation quantique*, in *Pour La Science*, février 1998, page 30).

La téléportation quantique pourrait devenir utile, car elle est en mesure de régler le problème qui fait que la cryptographie quantique ne peut fonctionner que sur des distances limitées

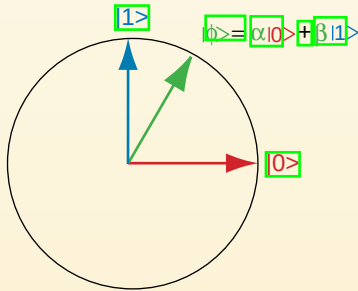
## PROPRIÉTÉS DE L'INFORMATION QUANTIQUE

a)



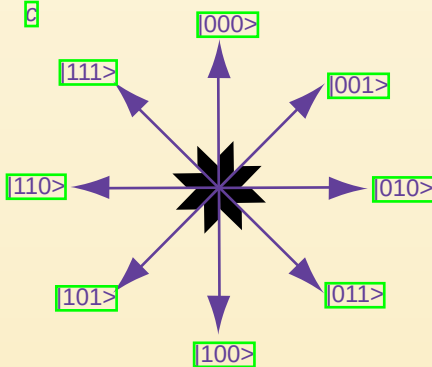
a) L'information unitaire classique est le bit : un objet qui vaut 0 ou 1.

b)



b) L'information unitaire quantique est le qubit (quantum bit). C'est un vecteur dans un espace complexe de dimension 2 muni d'un produit scalaire (deux vecteurs dont le produit est nul sont orthogonaux). Les éléments d'une base orthogonale sont fixés et notés  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . Un qubit  $|\phi\rangle$  se représente sous la forme  $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$  avec  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des nombres complexes (ainsi le qubit est déterminé par quatre nombres réels). Une mesure amène le qubit  $|\phi\rangle$  sur l'un des vecteurs de la base  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ . Les règles de la mécanique quantique indiquent qu'on obtient, lors d'une mesure physique,  $|0\rangle$  avec la probabilité  $|\alpha|^2$  et  $|1\rangle$  avec la probabilité  $|\beta|^2$ .

c)



c) L'état quantique d'un N-qubit est un vecteur dans un espace analogue à celui du qubit, mais de dimension  $2^N$ . On choisit une base orthogonale de cet espace. Pour un 3-qubit on choisit une base orthogonale dont les vecteurs sont :  $|000\rangle$ ,  $|001\rangle$ ,  $|010\rangle$ ,  $|011\rangle$ ,  $|100\rangle$ ,  $|101\rangle$ ,  $|110\rangle$ ,  $|111\rangle$ .

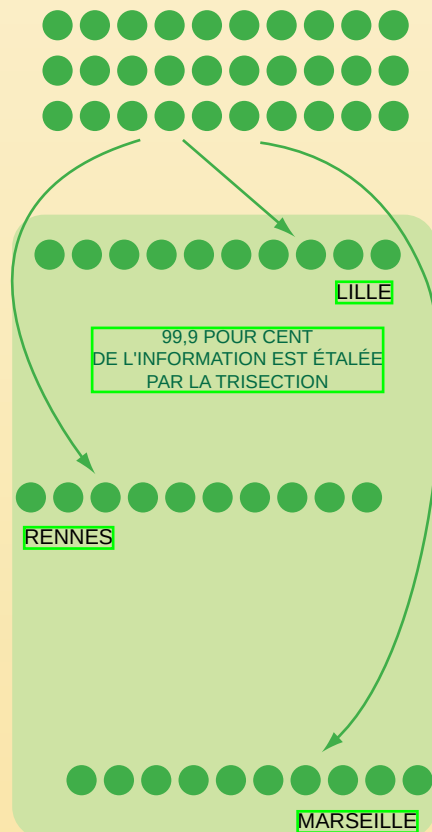
Un état général du 3-qubit est de la forme :

$$a_{000} |000\rangle + a_{001} |001\rangle + a_{010} |010\rangle + a_{011} |011\rangle + a_{100} |100\rangle + a_{101} |101\rangle + a_{110} |110\rangle + a_{111} |111\rangle,$$

où la somme des carrés des  $|a_{ijk}|$  est égale à 1.

La lecture du 3-qubit donne un vecteur de la base, chaque vecteur de la base étant obtenu avec une probabilité proportionnelle à  $|a_{ijk}|$ .

d)



d) Réaliser un calcul quantique consiste à préparer un N-qubit dans un état initial standard, par exemple  $|00\dots 0\rangle$  puis à appliquer à cet état une série de transformations unitaires (ce sont des opérations analogues en dimension quelconque aux rotations d'un vecteur). À la fin de cette suite de transformations, on mesure le N-qubit par une expérience qui l'amène dans un état correspondant à un vecteur de la base orthogonale, ce qui donne par exemple  $|001\rangle$ . Le résultat de cette mesure est probabiliste : on ne sait jamais ce que l'on va trouver. Tout l'art de la programmation quantique réside dans le choix des opérateurs qu'on applique de façon à ce qu'il se produise quelque chose d'intéressant (par exemple, la factorisation d'un entier). Le plus souvent, un calcul quantique commence par la création d'une superposition homogène de tous les états de la base. Pour un 3-qubit, par exemple, on commence par créer :  $[|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle] / \sqrt{8}$ . Un N-qubit est un objet difficile à décrire : il faut, pour le spécifier complètement, indiquer  $2^N$  nombres complexes.

Il n'était pas évident que les règles délicates du calcul quantique par transformations unitaires produisent des résultats intéressants. C'est pourtant ce qu'ont montré Peter Shor, Lov Grover et les algorithmiciens quantiques.

e) La non-localité : un résultat de Don Page

La possibilité de coder des informations globalement dans un N-qubit est mise en évidence par l'exemple suivant : un de vos amis choisit un 30-qubit et en prépare un très grand nombre d'exemplaires (comme il l'a choisi lui-même, cela ne contredit pas le principe de non-duplication). En faisant une série assez longue de mesures sur les divers exemplaires du 30-qubit on peut en reconstituer l'état avec exactitude. Mais, au lieu de cela, on divise chaque 30-qubit en trois sous-ensembles de 10-qubit qu'on envoie à Rennes, Lille et Marseille. En faisant des mesures localement et indépendamment dans ces trois villes (c'est-à-dire sans coordonner ni corrélérer les mesures), on ne peut, d'après un résultat de Don Page, tirer en moyenne que moins d'un millième de l'information contenue dans le 30-qubit, et cela quel que soit le nombre de copies dont on dispose. L'information contenue dans le 30-qubit est intrinsèquement non locale, les composantes sont corrélées, et seules des mesures collectives peuvent la révéler.

## CODE CORRECTEUR D'ERREUR DE PETER SHOR

Dans le code correcteur d'erreur classique le plus simple, on triple chaque information : on remplace 0 par (0, 0, 0) et 1 par (1, 1, 1). Quand on le juge nécessaire, on teste si les trois bits d'un tel triplet sont égaux et si ce n'est pas le cas on inverse le bit en exemplaire unique : si on lit (0,0,1) on rétablit (0,0,0), si on lit (1,0,1), on rétablit (1,1,1). Une telle méthode corrige toutes les erreurs simples. Si la probabilité d'une erreur simple est petite alors celle d'une erreur double ou triple (non-corrigée par la méthode) sera très petite et on la néglige. L'adaptation par Peter Shor de ce code correcteur commence par remplacer chaque qubit  $|0\rangle$  par le 3-qubit  $|000\rangle$  et chaque qbit  $|1\rangle$  par le 3-qubit  $|111\rangle$ .

La méthode classique de correction est inapplicable car il faudrait lire chacune des composantes des 3-qubit, ce qui est impossible sans perturber fatalement les 3-qubits. En revanche une mesure collective non destructive de deux composantes est possible par la méthode de Shor.

Si on a le qubit  $|x,y,z\rangle$  on peut par exemple connaître  $x \text{ XOR } y$  ( $x \text{ XOR } y$  désigne le OU exclusif, aussi dénommé NON contrôlé, entre  $x$  et  $y$  qui vaut 0 si  $x$  et  $y$  sont égaux et 1 sinon). L'idée de Shor est de calculer la paire  $[y \text{ XOR } z, x \text{ XOR } z]$ .

Un petit calcul montre que si une seule des composantes a basculé (0 devenu 1, ou 1 devenu 0) dans un 3-qubit composé de trois fois la même composante, alors la paire de Shor donne l'écriture en binaire du numéro du bit qui a changé. On peut alors effectuer la correction.

Exemple : Pour (0,1,0)  $y \text{ XOR } z$  vaut 1,  $x \text{ XOR } z$  vaut 0, donc la paire de Shor est [1,0], qui donne 10, l'écriture binaire de 2, le numéro de la composante à corriger.

Le secret de la méthode de correction (sans contradiction avec le principe de non-duplication) réside dans le fait (a) qu'on ne lit aucune composante individuellement, (b) qu'on trouve le numéro de la composante à corriger, et (c) qu'on la corrige sans même savoir si on change un 0 en 1 ou l'inverse.

(moins de 100 kilomètres). En cryptographie quantique, on utilise des photons qu'on fait circuler dans des fibres optiques, où ils sont inévitablement atténués par absorption. L'idée d'utiliser des répéteurs classiques qui lisent le signal et l'amplifient est inapplicable, car les photons qui circulent sont dans des états quantiques inconnus et, encore une fois, pour les amplifier, il faudrait les lire. La technique de téléportation résout en principe le problème et autorise la conception de nouveaux répéteurs qui «ré-émettent» sans lire les photons envoyés.

## Mémoriser l'information : la superposition et le qubit

Après ces considérations générales sur les propriétés de la transmission quantique, examinons le support de cette information. Le support élémentaire classique est le bit : un 0 ou un 1 ; son analogue quantique est le qubit, le *quantum bit*. Classiquement ou quantiquement, le bit est l'état de n'importe quel système matériel pouvant prendre un parmi deux états différents, par exemple un curseur tourné vers le haut ou vers le bas, un carré noir ou blanc sur un papier, un accumulateur électrique chargé ou non, le spin d'un noyau

d'atome orienté vers le haut ou vers le bas, etc. Quelle est alors la différence entre un bit et un qubit?

Les principes de la mécanique quantique autorisent qu'un chat soit à la fois mort et vivant – ce que l'on appelle la superposition d'états. Aussi le qubit décrit, avec deux nombres  $a$  et  $b$ , un état  $a|0\rangle + b|1\rangle$  ( $a$  et  $b$  sont des nombres complexes). Il mémorise ainsi plus d'informations qu'un bit classique. Le  $N$ -bit, de la forme 00101011... est décrit complètement par  $n$  choix de chiffres 0 ou 1, le  $N$ -qubit est spécifié par  $2^N$  choix de nombres complexes (voir *Les propriétés de l'information quantique*, page précédente).

Ainsi, avec un 2-qubit, on mémorise simultanément 4 nombres complexes  $a, b, c, d$ , avec un 10-qubit, on mémorise un millier de nombres, avec un 30-qubit, on atteint le milliard, et avec un 40-qubit, on pourrait en principe stocker tout le contenu disponible actuellement sur le réseau Internet (qu'on évalue à 8 000 milliards de caractères, ce qui équivaut à une bibliothèque de 8 millions de livres).

Calculer avec des qubits revient finalement à faire simultanément plusieurs calculs à la fois : avec un 3-qubit par exemple on calculera la valeur d'une fonction en même temps pour

les huit jeux de données (0,0,0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0), (1,1,1), car calculer avec des états superposés, c'est faire des calculs simultanés. Bien sûr, la maîtrise de ces superpositions ne va pas de soi, mais on comprend l'intérêt d'y parvenir.

Il y a trois ans, certains théoriciens de la mécanique quantique pensaient que les phénomènes d'instabilité rendraient à jamais impossibles les calculs quantiques qui nécessitent la création de  $N$ -qubits, leur préservation durant des intervalles de temps significatifs, leur manipulation et leur lecture.

L'obstacle fondamental invoqué était la décohérence, c'est-à-dire la propension qu'un état quantique complexe (un  $N$ -qubit, par exemple) a d'interagir spontanément avec l'environnement, ce qui, en projetant son état sur l'un des états de base, détruit une partie de son contenu en information. Cette interaction agit comme une lecture conduisant à un état non superposé, par exemple celui codant (0,0,0), ce qui évidemment fait perdre tout son intérêt au  $N$ -qubit.

Tout a changé en 1996 et 1997, quand on a compris qu'on pouvait limiter toutes ces sources d'instabilité par des techniques de correction d'erreurs.

## Les codes correcteurs d'erreurs

La théorie classique de la correction d'erreur conduit, même avec des composants imparfaits, à mener des calculs justes. Son adaptation au cas quantique est une avancée remarquable (voir l'encadré *Code correcteur d'erreur de Peter Shor*), qui offre la perspective d'une préservation parfaite d'états quantiques complexes, préservation jugée impossible à cause de processus irréversibles comme la relaxation par émission spontanée.

Dans un calcul utilisant des méthodes de correction, chaque élément d'un qubit pourrait être perdu et reconstitué. Peter Shor (inventeur de l'algorithme de factorisation quantique mentionné plus loin) et Andrew Steane remarquèrent, en 1995, que les méthodes classiques de correction d'erreurs s'adaptaient. Cela paraissait à première vue difficile, car le principe de non-duplication empêche la copie redondante d'une même information à préserver, copie qui est à la base de la correction d'erreur clas-

sique. Peter Shor remarqua qu'on peut détecter une erreur et la corriger sans avoir à en prendre connaissance en détail.

La méthode de Peter Shor a été généralisée et étendue aux diverses sources d'erreurs qu'on rencontre lors du déroulement d'un calcul quantique. Après trois ans de travaux, les chercheurs en sont arrivés à la conclusion ferme que, non seulement on peut corriger les erreurs, mais qu'on peut préserver un état quantique complexe et le manipuler pendant des intervalles de temps aussi longs qu'on le souhaite, avec un risque global d'erreur aussi petit qu'on le désire. Précisons toutefois qu'il s'agit d'une avancée théorique qui n'a pas aujourd'hui été expérimentalement mise en œuvre, ce qui demandera sans doute de nombreuses années.

L'intérêt de la superposition quantique et du calcul quantique est soumis à une objection grave fondée sur l'impossibilité de connaître complètement certains états quantiques : à quoi peut bien servir d'engendrer un état quantique contenant la superposition de  $f(0,0,0)$ ,  $f(0,0,1)$ ,  $f(0,1,0)$ ,  $f(0,1,1)$ ,  $f(1,0,0)$ ,  $f(1,0,1)$ ,  $f(1,1,0)$ ,  $f(1,1,1)$ , si l'on ne peut pas en extraire – ce qui est le cas – la connaissance de  $f(0,0,0)$ ?

## L'algorithme quantique

Cette question est très gênante. La réponse n'est devenue claire que progressivement, par le développement d'algorithmes quantiques délicats qui exploitent astucieusement les superpositions d'états et les opérations que la théorie quantique autorise sur eux pour extraire des superpositions des informations utiles. Le premier résultat important (dû à Peter Shor en avril 1994) est un algorithme rapide pour la factorisation des nombres entiers. Comme aucun algorithme rapide classique n'existe, cette découverte créa un certain émoi chez les spécialistes et suscita une vague d'intérêt pour les ordinateurs quantiques (sauf en France, où l'on préféra se spécialiser dans l'explication de l'impossibilité à surmonter la décohérence).

Le second problème algorithmique important traité fut celui du repérage d'une donnée dans une liste non organisée par Lov Grover (voir l'article de N. Gershenfeld et I. Chuang dans ce numéro). Cet algorithme est

plus important encore que le premier car ses applications potentielles touchent cette fois non seulement la cryptographie, mais aussi le traitement général des données, quelle qu'en soit la nature.

Des résultats récents montrent aussi – comme on pouvait le présumer – qu'un ordinateur quantique n'aurait pas d'équivalent pour étudier les systèmes quantiques quelconques et qu'il permettrait de les simuler avec efficacité, ce qui est impossible avec un ordinateur classique.

D'autres algorithmes plus spécialisés sont proposés régulièrement et on commence à comprendre ce nouvel art de programmer que nécessiteront les ordinateurs quantiques. Cet ensemble de résultats a une incidence sur les fondements de la théorie du calcul, car il remet en cause une de ses bases : l'acceptation que tous les mécanismes de calcul sont sensiblement équivalents en puissance (en langage précis : que chacun est simulable en temps polynomial par chaque autre). La première victime de ce bouleversement est dès

## LA TÉLÉPORTATION SERA-T-ELLE QUANTIQUE?

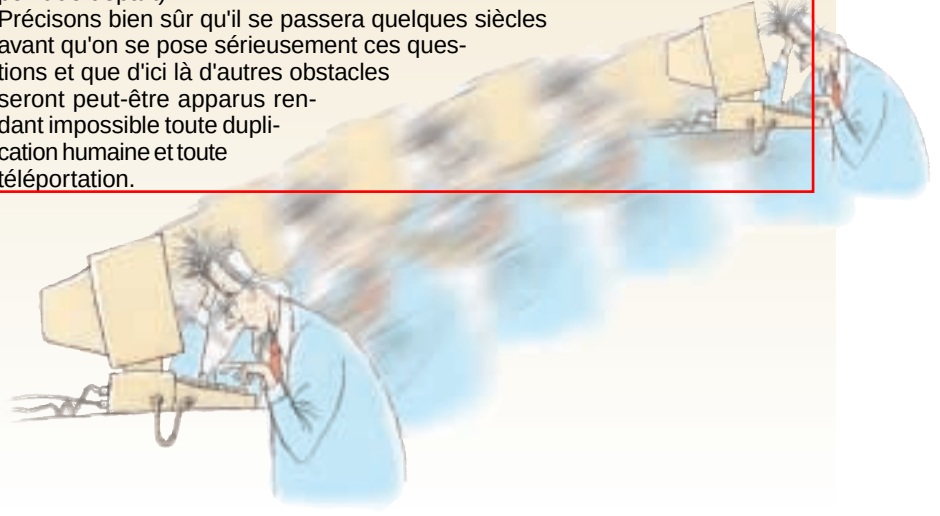
Si l'on pense qu'une personne humaine n'est pas seulement définie par l'état physique de son corps et de son cerveau (question philosophique) alors aucune discussion n'est possible. Supposons donc que l'intégrité d'une personne humaine n'est qu'une question physique. Deux cas apparaissent.

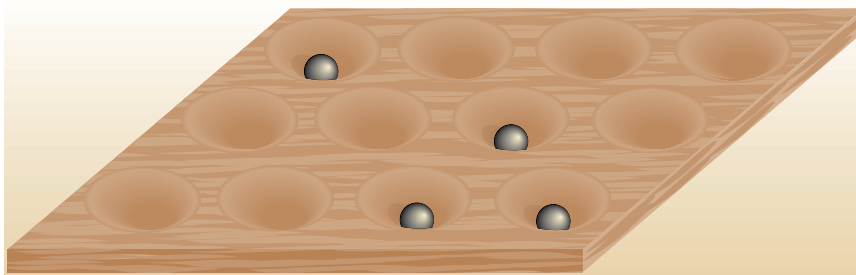
**Cas 1.** La mécanique quantique ne joue pas de rôle essentiel dans le fonctionnement du corps et du cerveau. En prenant connaissance à un niveau de détail assez fin de la position des atomes qui composent le voyageur (chose peut-être impossible mais qu'aujourd'hui aucun principe n'interdit) on pourrait transmettre cette information d'un point à un autre (par radio) et mener au point d'arrivée une reconstruction du voyageur. Dans un tel cas la téléportation fait voyager à la vitesse de la lumière. Les hypothèses mises en œuvre ici permettent en théorie de dupliquer une personne humaine (après avoir pris connaissance de sa définition on en reconstitue plusieurs copies), comme dans certains épisodes de Star Trek lorsque l'appareil de téléportation fonctionne mal.

La quantité d'information impliquée dans ces opérations est parfois évoquée pour dire qu'aucun canal d'information n'aura jamais assez de puissance pour transmettre l'information nécessaire qui serait au moins de  $10^{30}$  bits. Cet argument néglige les possibilités de compression d'information : pour transmettre l'information décrivant un corps humain il n'est pas nécessaire par exemple de transmettre la description des chromosomes de chaque cellule puisque dans chacune des milliards de cellules d'un organisme vivant ce sont les mêmes chromosomes qu'on trouve.

**Cas 2.** La mécanique quantique joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du corps et du cerveau qui utilise peut-être des atomes corrélés et des superpositions complexes d'états quantiques pour fonctionner. Aucune mesure complète de l'état instantané du voyageur ne sera possible et donc sa duplication sera impossible. En revanche, la technique de téléportation quantique s'appliquerait et produirait le déplacement à la vitesse de la lumière (mais pas plus, là encore) d'un voyageur (qui serait alors nécessairement détruit à son point de départ).

Précisons bien sûr qu'il se passera quelques siècles avant qu'on se pose sérieusement ces questions et que d'ici là d'autres obstacles seront peut-être apparus rendant impossible toute duplication humaine et toute téléportation.





**4. LA DISCRETISATION.** Quiconque calcule avec des billes pour se repérer (comme on le faisait autrefois quand on calculait avec des jetons) n'a pas besoin, à chaque déplacement de bille, de la poser au centre du trou visé. De légères erreurs lors des déplacements se corrigent automatiquement du seul fait de la forme de la surface, qui rectifie les écarts modérés. Ce passage du plan continu à une surface autocorrectrice à trous est analogue à l'introduction des codes correcteurs d'erreur dans les ordinateurs. Ces codes transforment un ensemble de positions infini (difficile à contrôler lors de longues séquences d'opérations), en un ensemble fini de positions. C'est la discrétisation de l'espace d'états. Ces codes correcteurs qui réduisent l'espace d'états de l'ordinateur, correspondent physiquement à un refroidissement du système et produisent donc une dissipation de chaleur. Dans le cas des ordinateurs quantiques — qui en théorie fonctionnent de manière réversible, donc sans dissipation — les codes correcteurs d'erreur seraient le dispositif consommateur d'énergie.

aujourd'hui la cryptographie mathématique, qui se voit mise en concurrence avec la cryptographie quantique et qui, si l'on progresse dans la réalisation concrète des ordinateurs quantiques, devra être revue de fond en comble à cause des algorithmes de P. Shor et de L. Grover.

La théorie de la transmission d'informations de Claude Shannon, qui est essentiellement classique, a été ajustée au cas quantique ; des résultats particuliers concernant la compression de l'information quantique ont été proposés. Tout cela, ajouté à la nouvelle algorithmique, constitue maintenant un ensemble théorique puissant, une nouvelle discipline à l'intersection de l'informatique et de la physique. Cette nouvelle discipline est la véritable informatique

théorique et s'oppose à l'informatique théorique classique, fondée sur une conception en partie erronée de l'information et du calcul qui néglige la réalité physique de notre Univers. Pour Andrew Steane, «Le fait que la théorie classique de l'information s'adapte à la mécanique quantique comme une main dans un gant et la surprenante cohérence générale de la nouvelle discipline donnent l'impression que nous accédons à des vérités profondes de la nature.»

Concernant l'informatique quantique le scepticisme est une attitude raisonnable, mais il semble non moins raisonnable de proclamer, avec J. Preskill, que «la construction d'ordinateurs quantiques est un rêve qui pourrait changer le monde, aussi laissez-nous rêver.»

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille.

J. PRESKILL, *Course Information for Physics 229, Advanced Mathematical Methods of Physics*, California Institute of Technology, Pasadena. Remarquables notes d'un cours donné en 1997-1998. Disponible à l'adresse Internet : <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph2>

Andrew STEANE, *Quantum Computing*, 1997. Notes disponibles à la même adresse que le précédent cours.

C. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPEAU, R. JOZSA, A. PERES et W. WOOTTERS, *Teleporting an Unknown Quantum State ...*, in *Physical Review Letters*, 29 mars 1993, vol. 70, n°13, pp. 1895-1899.

I. CHUANG, N. GERSHENFELD et M. KUBINEC, *Experimental Implementation of Fast Quantum Searching*, in *Physical Review Letter* (à paraître).

J.-P. DELAHAYE, *Les ordinateurs quantiques*, in *Pour La Science*, n° 209, 100-105, mars 1995.

L. K. GROVER, *A Fast Quantum Mechanical Algorithm ...*, in *Proceedings of the 28th Annual Symposium on the Theory of Computing*, STOC, pp. 212-219, 1996,

P. SHOR, *Polynomial-time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithm on a Quantum Computer*, in *Proc. of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Santa Fe, IEEE Computer Society Press, pp. 124-139, 1994.



# Aquaculture des crevettes et environnement

CLAUDE BOYD • JASON CLAY

*De nouvelles méthodes d'aquaculture des crevettes réduisent les pollutions associées, accroissent les profits et rendent cette activité durable.*

L'aquaculture des crevettes se développe depuis les années 1970, surtout dans les zones tropicales. Les étangs d'élevage occupent aujourd'hui environ 1,2 million d'hectares, principalement en Thaïlande, en Indonésie et en Inde. En Amérique centrale et en Amérique du Sud, près de 200 000 hectares de littoral ont été aménagés en fermes à crevettes. Les crustacés ainsi produits sont en grande majorité consommés aux États-Unis, en Europe et au Japon. Toutes les espèces sont, en France, vendues sous le nom de gambas.

Qualifié de «révolution bleue», il y a un quart de siècle, l'élevage des crevettes et les autres formes d'aquaculture devaient réduire la surexploitation des océans : la pêche d'un kilogramme de crevettes nécessite en général la capture de dix kilogrammes d'animaux marins. Malheureusement, non seulement l'aquaculture n'a pas réduit la pression due à la pêche, mais elle dégrade l'environnement de plusieurs façons.

Normalement, les crevettes se reproduisent dans l'océan. Chaque femelle pond, en une seule fois, plus de 100 000 œufs qui, lorsqu'ils ont été fécondés, éclosent en 24 heures : ils produisent des larves qui se nourrissent de plancton. Environ 12 jours plus tard, les jeunes crevettes migrent de l'océan vers des estuaires, riches en nutriments, où elles poursuivent leur développement. Puis elles retournent dans l'océan, où elles deviennent adultes et se reproduisent à leur tour.

L'élevage des crevettes reproduit les principales étapes de ce cycle. Les aquaculteurs déclenchent la ponte des crevettes adultes dans des écloséries en agissant sur l'éclairage, la tempéra-

ture, la salinité, les cycles hormonaux et les nutriments. Peu après l'éclosion des œufs, les larves sont transférées dans des bassins d'élevage pour y grandir. Elles sont d'abord nourries d'algues microscopiques, puis elles reçoivent de petits crustacés nommés artémia et des aliments industriels. Après trois semaines de cette alimentation, elles sont placées dans des étangs plus grands, généralement des plans d'eau de moins de deux mètres de profondeur, entourés de digues de terre, et dont la taille varie de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs hectares.

## L'aquaculture qui augmente la pêche

En Asie du Sud-Est, la plupart des étangs d'élevage sont peuplés avec des crevettes issues d'écloséries, mais, en Amérique latine, de nombreux aquaculteurs préfèrent élever des larves pêchées dans l'océan : elles seraient plus grosses et survivraient mieux dans les étangs d'élevage. Ces larves, qui valent jusqu'au double de celles qui sont produites en éclosérie, font l'objet d'une pêche intensive qui semble néfaste pour les populations de crevettes : les patrons des crevettiers d'Amérique centrale affirment que leurs prises ont diminué depuis que l'on collecte massivement les larves dans les estuaires voisins. En outre, les filets à mailles serrées utilisés pour cette pêche capturent au passage de nombreux autres animaux (le chiffre de 100 animaux capturés pour une seule larve de crevette a même été avancé), ce qui menace d'autres espèces.

Les étangs d'élevage sont souvent installés dans des milieux naturels fra-

giles, tels les marais littoraux et les mangroves, les forêts d'arbres qui résistent au sel. Les mangroves absorbent les excès de nutriments qui, autrement, pollueraient les eaux côtières, et elles abritent des larves et de jeunes animaux marins, qui s'y développent avant de partir pour la pleine mer. La section Agriculture et alimentation de l'Organisation des Nations unies a évalué que 50 pour cent des mangroves de la planète ont déjà été détruites par les populations côtières qui y cherchaient du bois de construction et du bois à brûler.

Globalement, l'aquaculture des crevettes n'est directement responsable que de la disparition d'à peine dix pour cent des mangroves, mais les disparités sont fortes : dans quelques zones, la totalité des mangroves détruites le sont par les aquaculteurs. Ainsi, en Équateur, les bassins ont d'abord été construits sur des terrains salés, quasi dépourvus de faune et de flore, mais, à mesure que ces terrains ont été occupés, les étangs à crevettes ont envahi des marais et des mangroves. En Thaïlande et dans de nombreuses régions d'Asie, l'aquaculture des crevettes ne s'est jamais limitée aux terrains salés. Les plus grandes fermes ne se sont pas implantées à l'emplacement des mangroves, mais près de 40 pour cent des petites exploitations, installées sans réflexion ou sans moyens financiers, ont empiété sur ces milieux.

On classe les fermes aquacoles en trois catégories, en fonction de la den-

**1. LES CREVETTES** *Penaeus vannamei* et *Penaeus monodon* représentent respectivement 22 et 58 pour cent des crevettes élevées dans des étangs d'aquaculture, dans les pays tropicaux.

PENAEUS VANNAMEI



PENAEUS MONODON



sité de crustacés dans les bassins : moins de cinq crevettes par mètre carré d'étang pour l'aquaculture extensive, plus de 20 pour les élevages intensifs, et une valeur intermédiaire pour les élevages semi-intensifs. Elles diffèrent aussi par la nature de la nourriture utilisée et par le débit d'eau échangée entre les étangs et l'océan. Dans les systèmes extensifs, les aquaculteurs ajoutent seulement des engrais dans les étangs, afin de favoriser la croissance d'algues dont se nourrissent les crevettes. En revanche, les crevettes des élevages semi-intensifs et intensifs reçoivent quotidiennement des aliments granulés composés de farines végétales, de farines de poisson, de compléments alimentaires et d'un liant qui améliore leur stabilité dans l'eau.

Un élevage extensif produit environ une tonne de crevettes à l'hectare. Les fermes semi-intensives produisent jusqu'à deux tonnes par hectare, et l'aquaculture intensive atteint des récoltes phénoménales de huit tonnes par hectare, voire plus.

En moyenne, il faut près de deux kilogrammes d'aliments pour produire un kilogramme de crevettes : comme les autres animaux, la crevette, même en période de croissance, ne transforme pas en chair tous les aliments qu'elle absorbe. En outre, même avec des systèmes perfectionnés de distribution de la nourriture, jusqu'à 30 pour cent de celle-ci n'est jamais consommée. Avec les fèces, l'ammoniaque, le phosphore et le dioxyde de carbone produits par les crevettes forment des déchets dans les étangs. Géné-

ralement, moins d'un quart du carbone organique et des autres nutriments apportés par l'alimentation est récolté sous forme de crevettes. Les trois autres quarts stimulent la croissance de phytoplancton qui meurt, sédimente et se décompose au fond des étangs, en consommant de grandes quantités d'oxygène.

Dans les systèmes traditionnels, les aquaculteurs éliminent périodiquement les déchets en vidant les étangs dans l'océan. Ainsi, ces 20 dernières années, 10 à 30 pour cent de l'eau des étangs était quotidiennement déversée dans l'océan. Aujourd'hui, ce chiffre est plutôt compris entre deux et cinq pour cent dans la plupart des exploitations, et certains aquaculteurs essaient même de supprimer totalement cette évacuation : ils gaspillent moins de nourriture et préviennent les maladies en maintenant la densité des crevettes à des valeurs faibles et en surveillant l'état sanitaire des larves qu'ils introduisent. Dans des étangs de culture intensive, l'eau est réoxygénée par des aérateurs mécaniques : une trop forte baisse de la concentration en oxygène dissous est préjudiciable aux crevettes.

### Garder l'eau propre

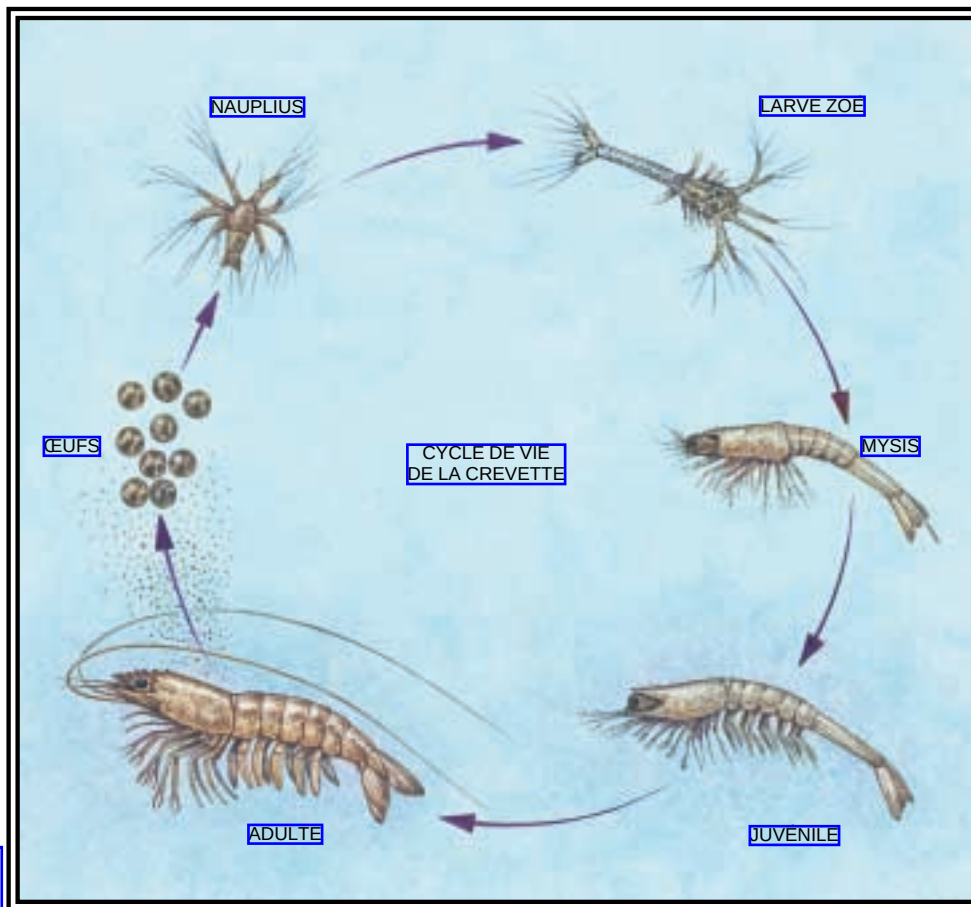
Outre des engrais, les aquaculteurs ajoutent à l'eau des étangs de la chaux agricole et de la chaux vive, qui réduisent l'acidité de l'eau et des fonds d'étang. En Asie, ils ajoutent aussi systématiquement des minéraux poreux qui absorbent l'ammoniaque et, parfois, de l'hypochlorite de calcium, de la formaline et d'autres composés qui éliminent les microbes pathogènes et les parasites.

L'assainissement des rejets est toutefois insuffisant : dans certaines zones, les effluents de chaque étang, pris individuellement, sont de qualité satisfaisante, mais les étangs sont si nombreux que la capacité d'épuration du milieu naturel est saturée. Notamment, des algues se développent en excès dans les eaux côtières, consommant tout l'oxygène dissous et tuant toutes les autres formes de vie : c'est l'eutrophication, qui nuit à toutes les activités côtières, y compris à l'aquaculture.

Ce n'est d'ailleurs pas la seule menace que l'aquaculture fait peser sur son propre avenir : des maladies virales ont mis en faillite la plupart des fermes aquacoles de crevettes en Chine et à Taiwan, et elles ont menacé l'aqua-



**2. LES ANIMAUX MARINS inutilement tués par la pêche des crevettes au chalut sont beaucoup plus nombreux que les prises de crevettes : on prend jusqu'à dix de ces animaux pour une crevette !**



**3. LE CYCLE BIOLOGIQUE DE LA CREVETTE** (ci-dessus) est reproduit par les aquaculteurs : après l'éclosion des œufs, les larves passent par cinq stades avant de devenir adultes. Dans les exploitations les plus respectueuses de l'environnement, les crevettes sont d'abord élevées dans des écloséries (à gauche), puis elles poursuivent leur développement dans des étangs situés loin derrière les mangroves côtières (en bas, à gauche). De nombreux aquaculteurs élèvent toutefois de jeunes crevettes pêchées en mer (à droite) et certains construisent des étangs dans des zones auparavant occupées par des mangroves (en bas, à droite), détruisant ces milieux fragiles.



culture de Thaïlande, d'Inde et d'Équateur. Les virus migrent entre les pays et même entre les continents, par le transport de larves infectées produites en éclosérie. Les maladies des crevettes peuvent aussi être transmises par l'intermédiaire de crevettes surgelées crues.

Les aquaculteurs ont appris à lutter contre ces maladies. Par exemple, ils savent aujourd'hui détecter les virus

dangereux qui infectent les larves qu'ils achètent aux écloséries. Ils savent aussi se débarrasser des crevettes contenues dans un étang infecté sans disséminer les microbes ou les virus. Certaines écloséries utilisent des reproducteurs élevés avec soin, afin d'engendrer des larves exemptes de maladies. De telles mesures sont efficaces et saines, contrairement à l'emploi de médicaments ajou-

tés à l'alimentation, qui risquent de faire proliférer des bactéries résistantes aux antibiotiques et de bouleverser l'écologie microbienne locale.

Comment les aquaculteurs de crevettes préservent-ils leur environnement? Tout d'abord, en ne construisant pas des étangs n'importe où. Ainsi, on évitera l'installation dans les sols sablonneux qui ne sont pas imperméabilisés

## L'opinion d'un expert

L'incurie de certains aquaculteurs de crevettes et le laxisme des gouvernements des pays où cette forme d'aquaculture s'est développée sont responsables de nombreuses dégradations de l'environnement. Toutefois, certains écologistes ont abusivement critiqué l'ensemble de la filière. Selon eux, de riches investisseurs construiraient des étangs d'aquaculture n'importe où, réaliseraient des profits rapides, puis abandonneraient leurs installations. Dans les quelques cas où ces accusations sont justifiées, les fermes étaient petites, avec seulement un ou deux étangs construits à peu de frais sur des sites inadaptés, et fonctionnaient avec un manque manifeste de capitaux et de compétences. Au contraire, la construction d'une ferme d'aquaculture de bonne qualité coûte 50 000 à 300 000 francs par hectare d'étang, et les frais d'exploitation sont élevés, de sorte que les propriétaires, soucieux de récupérer leur investissement, s'assurent que leurs installations seront productives pendant de nombreuses années. L'aquaculture des crevettes est une situation typique où l'environnement est fortement détérioré par de petits exploitants et pas par les grands. D'où l'intérêt des coopératives.

Des exploitations bien conduites emploient une main-d'œuvre nombreuse : une ou deux personnes par hectare d'étang (pour les écloséries, les étangs d'élevage et les usines de conditionnement). L'aquaculture des crevettes stimule aussi l'économie locale et rapporte des devises à de nombreux pays en développement. Ce

serait donc une grande perte si elle disparaissait. Comme la dégradation des zones côtières menace l'aquaculture, on peut aisément convaincre la plupart des aquaculteurs qu'ils ont tout intérêt à être de bons gestionnaires de l'environnement. L'Association australienne des éleveurs de crevettes a ainsi élaboré un code de pratiques pour ses membres ; l'Association du réseau des pêcheries des pays d'Asie du Sud-Est a publié un manuel des bonnes méthodes de culture de la crevette, et l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation a présenté des conseils techniques à l'intention des pêcheries qui s'appliquent à l'aquaculture des crevettes. Enfin, le Réseau des centres d'aquaculture d'Asie et du Pacifique a lancé un plan détaillé pour améliorer la durabilité de l'aquaculture en général.

De surcroît, la plupart des États demandent aujourd'hui une évaluation des conséquences sur l'environnement avant toute nouvelle installation. La Thaïlande a institué une réglementation pour s'assurer que les aquaculteurs adoptent les meilleures méthodes d'exploitation possibles. Un progrès particulièrement notable est la formation récente de l'Alliance mondiale d'aquaculture, groupement d'industriels qui encourage l'aquaculture non polluante, à l'aide d'un code de bonnes pratiques et de sensibilisation des consommateurs à l'aide d'un «éco-label» pour la crevette.

Claude BOYD

## Les commentaires d'un écologiste

Le monde économique considère que les ressources naturelles sont à celui qui les prend, et qu'elles ne coûtent que le travail et les investissements nécessaires à leur extraction. Peu d'industries tiennent autant ce raisonnement que l'aquaculture de crevettes, qui exploite des ressources publiques traditionnellement utilisées par de nombreux groupes.

Toute activité économique a des conséquences sur l'environnement, mais les producteurs de crevettes, dans leur propre intérêt, devraient minimiser les conséquences néfastes de leur activité : bien que les plus progressistes et les plus riches appliquent déjà des techniques qui améliorent la durabilité de l'aquaculture des crevettes, celle-ci aura disparu de la plupart des pays du monde dans quelques dizaines d'années tout au plus si les centaines de milliers d'aquaculteurs ne changent pas leurs pratiques.

Nous ne pouvons peut-être pas, avec nos connaissances actuelles, pratiquer une aquaculture totalement durable, mais certaines pratiques sont meilleures que d'autres. Ainsi, l'augmentation du taux de survie des larves à plus de 75 pour cent, alors qu'il est aujourd'hui inférieur à 50 pour cent, réduit l'investissement initial de chaque récolte. De même, certaines méthodes d'alimentation des crevettes réduisent de 25 à 50 pour cent les dépenses de nourriture.

Les mesures simples nécessaires réduisent aussi le coût d'épuration des effluents et les déplacements périodiques des étangs. Les éleveurs de crevettes équatoriens ont réussi à doubler leurs bénéfices grâce à de telles mesures.

D'autres améliorations sont plus coûteuses, mais l'augmentation de revenu qui en découle compense les dépenses la plupart du temps. Pour les investissements qui n'augmenteront pas la rentabilité, les coûts devront être répercutés sur les consommateurs, qui sont, on doit l'admettre, les véritables pollueurs du système économique. Des réglementations pourraient imposer l'augmentation des prix, et la mise en place d'un label «écologique» justifierait le prix supérieur auprès de consommateurs soucieux de l'environnement.

Qui attribuerait un tel label? Des écologistes, des producteurs et des gouvernements élaborent chacun leurs propres normes. Aucun groupe, et certainement pas les producteurs, ne pourra, seul, créer un système crédible. La concentration devra identifier des principes généraux, qui seront ensuite adaptés aux conditions locales particulières. Ce n'est que par l'adoption de tels systèmes de production durable que l'aquaculture des crevettes sera une activité du prochain millénaire, et pas un problème d'environnement de plus.

Jason CLAY

par une couche argileuse ou par des films en plastique, parce que l'eau salée s'infiltrerait dans les nappes phréatiques. Le rejet d'effluents salés dans des réservoirs naturels d'eau douce ou sur des terres sèches devrait aussi être interdit. L'installation d'étangs dans des mangroves ou dans des marais littoraux est également malavisée : les sols de ces zones sont souvent incompatibles avec une production de crevettes à long terme (sur ces sols argileux et saturés en sel, les déchets de l'aquaculture se transforment en gaz toxiques pour les crevettes, tel du sulfure d'hydrogène) et, ce qui est pire encore, ils sont exposés aux tempêtes côtières.

## Économie et écologie vont de pair

Même les aquaculteurs les plus obnubilés par la rentabilité peuvent ainsi comprendre qu'ils n'ont pas intérêt à détruire les mangroves. La construction d'étangs de bonne qualité coûte de 50 000 à 300 000 francs par hectare. S'il faut les abandonner après quelques années parce qu'ils ont été implantés sur des sites mal adaptés, non seulement l'environnement aura été endommagé, mais l'opération aura été ruineuse.

La majorité des grands exploitants construisent aujourd'hui des canaux ou des réseaux de canalisation pour amener l'eau de mer vers des étangs construits à l'intérieur des terres. De nombreux petits aquaculteurs se regroupent en coopératives pour mettre en commun les ressources et les connaissances nécessaires à de telles installations. En Indonésie, la loi oblige même quelques grands producteurs à aider les petits exploitants.

D'autre part, les aquaculteurs découvrent aujourd'hui que des perfectionnements des systèmes de distribution des aliments, s'ils préservent l'environnement, sont également rentables. La qualité des effluents des étangs est améliorée quand les crevettes sont nourries plus efficacement. Les pertes sont inférieures quand les éleveurs distribuent les aliments plusieurs fois par jour, au lieu d'une ou deux fois aujourd'hui, et en plus petites quantités, à l'aide de casiers : la proportion d'aliments non consommés diminue. De surcroît, des aliments où la part des protéines végétales est accrue sont mieux digérés, sont plus stables dans l'eau et produisent donc aussi moins de déchets que les farines de poisson.

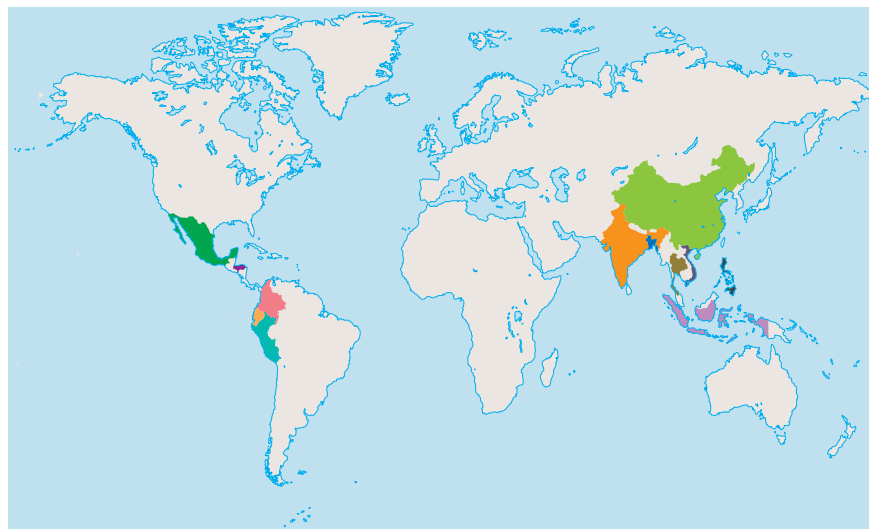
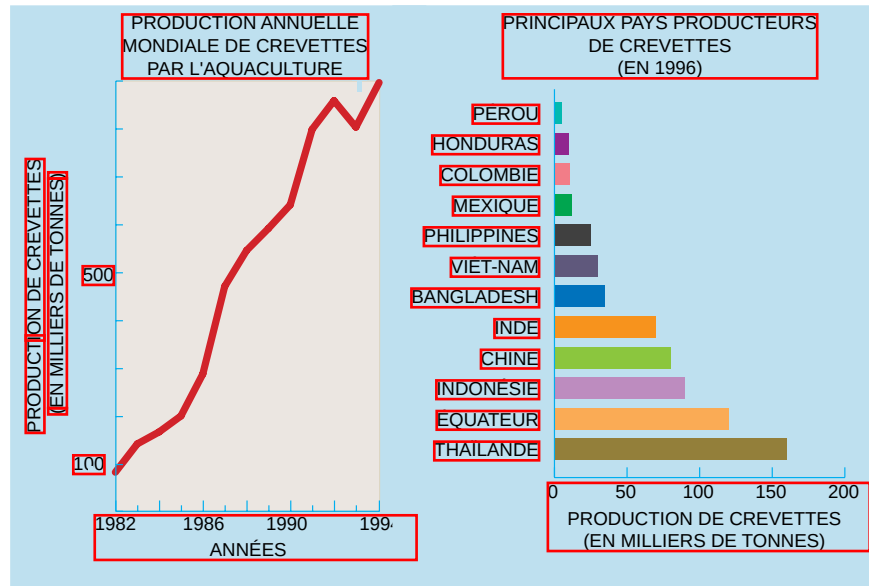
Enfin, avec une alimentation améliorée, les aquaculteurs n'ont pas besoin d'investir dans des installations de dépollution.

On réduit également la pollution quand on limite la densité de crevettes dans les bassins, parce que la majeure partie des déchets sont alors naturellement assimilés dans le sol. Même si les techniques actuelles de récolte nécessitent la vidange des étangs, les aquaculteurs pourraient stocker l'eau dans des bassins de décantation, qui favorisent la dénitrification et l'élimination de nombreux autres polluants associés à des particules solides en suspension. Les aquaculteurs devraient aussi s'abstenir de mélanger de l'eau douce à l'eau de mer des étangs pour en réduire la salinité, afin d'éviter le

pompage excessif des réservoirs d'eau douce. Cette pratique (qui fort heureusement a été abandonnée par la plupart des éleveurs de crevettes) n'est pas indispensable.

Comment réduire les menaces sur la biodiversité? L'élevage de crevettes exclusivement issues d'écloseries, d'espèces locales et la réglementation des importations de larves résoudraient une partie du problème. La pose de grilles filtrantes à l'entrée des pompes éviterait aussi la capture d'organismes marins de grande taille.

Les aquaculteurs de crevettes devraient enfin épandre moins d'additifs chimiques. L'utilisation de composés autres que la chaux agricole, la chaux vive et les engrais est généralement inutile. Dans les rares cas où



**4. L'AQUACULTURE DES CREVETTES est pratiquée depuis des siècles, mais sa production n'est devenue notable que depuis 20 ans (ci-contre). Les premiers pays producteurs se trouvent dans les zones équatoriales d'Asie et d'Amérique (à droite).**



Claude BOYD, Jason CLAY, WWF



Claude BOYD, Jason CLAY, WWF

**5. LES ARBRES DES MANGROVES**, résistants au sel (*en haut*), bordent de nombreuses côtes tropicales, mais leur nombre a considérablement diminué. Près de la moitié des

mangroves mondiales répertoriées ont été détruites, même si l'aquaculture des crevettes n'est responsable que de dix pour cent de cette perte (*en bas*).

des antibiotiques sont nécessaires, ils ne devraient être employés que sous contrôle gouvernemental.

Dans l'ensemble, les aquaculteurs devraient être favorables à ces techniques d'exploitation plus propres, car même si elles nécessitent quelques investissements, à long terme elles amélioreront le rendement et la durabilité de leurs exploitations. D'autres innovations, qui favorisent la durée de vie de leurs étangs les aideront à réduire la consommation d'eau ; des programmes de reproduction, notamment, devraient produire des variétés de crevettes résistant mieux aux maladies.

Les producteurs de crevettes qui ne comprendront pas d'eux-mêmes l'intérêt de ces diverses mesures devront y être incités par la réglementation. Ainsi, les gouvernements devraient imposer des études approfondies de l'impact environnemental et social avant la construction de nouvelles fermes aquacoles. Les communautés concernées pourraient alors évaluer les risques de dégradation de l'environnement et identifier les conflits qui naissent de l'utilisation commerciale des terres et des eaux. Les gouvernements doivent aussi s'assurer que ces efforts initiaux de protection de l'environnement seront poursuivis.

L'industrie de la crevette semble répondre aux critiques des écologistes, et nous avons bon espoir que ses nuisances s'amenuiseront. De nombreuses exploitations se sont transformées, depuis quelques années, et des progrès devraient permettre une pérennisation des sites aquacoles. Ce n'est qu'à cette condition que l'aquaculture des crevettes deviendra un élevage comme un autre.

Claude BOYD est professeur à l'Université d'Auburn et Jason CLAY travaille au WWF à Washington.

C.E. BOYD, *Shrimp Farming and the Environment : A White Paper*, Shrimp Council, National Fisheries Institute, Arlington, 1996.

Robert ROSENBERRY, *World Shrimp Farming 1996*, Shrimp News International, San Diego, 1996.

Jason W. CLAY, *Market Potentials for Redressing the Environmental Impact of Wild-Captured and Pond-Produced Shrimp*, World Wildlife Fund, Washington, 1997.

Jason W. CLAY, *Toward Sustainable Shrimp Aquaculture*, in *World Aquaculture*, vol. 28, n° 3, pp. 32-37, 1997.



# La défibrillation : l'étincelle de vie

MICKEY EISENBERG

*Les médecins utilisent l'électricité pour redémarrer le cœur humain depuis 50 ans et ils comprennent mieux comment utiliser les défibrillateurs. En revanche, la fibrillation et la défibrillation restent mal connues.*

**E**n 1947, à l'Hôpital universitaire de Cleveland, le chirurgien Claude Beck vient d'opérer un adolescent de 14 ans : une déformation congénitale de la cage thoracique ne permettait à celui-ci de respirer qu'à 30 pour cent de la capacité normale. L'opération s'est bien passée. Pendant un court instant, au moment de l'administration de l'éther, le rythme cardiaque s'est accéléré, mais l'administration de digitaline a ralenti le cœur. L'intervention de deux heures a été éprouvante : le chirurgien a dû séparer les côtes le long du sternum et réparer le travail que la nature avait bâclé. Beck se décontracte lorsque la phase critique est terminée, mais, au moment où il suture l'incision de 35 centimètres, le cœur du jeune homme s'arrête. Beck saisit un scalpel, rouvre les sutures, entoure le cœur de sa main et le masse en rythme. Il sent le tremblement inefficace du cœur : en 1947, personne ne survit à ces troubles du rythme cardiaque que l'on nomme fibrillation ventriculaire.

Toutefois Beck ne se démonte pas. Il fait administrer de l'adrénaline et de la digitaline, et demande calmement un électrocardiogramme et un défibrillateur, tout en continuant à masser le cœur de l'adolescent. Il faut 35 minutes pour obtenir un électrocardiogramme, dont le tracé vacillant et totalement désorganisé confirme le diagnostic de fibrillation ventriculaire. Dix minutes plus tard, les assistants apportent un défibrillateur expérimental mis au point par Beck et ses collègues. Ce dernier pose deux élec-

trodes directement sur le cœur du jeune homme. L'équipe chirurgicale guette le spasme cardiaque lorsque les 1 500 volts parcourent les fibres musculaires. Beck retient sa respiration, plein d'espoir.

## Premier choc

À l'aide du choc électrique, il espère arrêter momentanément le cœur, afin d'interrompre les contractions chaotiques. Les cellules du muscle cardiaque ont ainsi une chance de reprendre leur activité rythmique synchronisée. Le premier choc reste toutefois sans effet, et Beck reprend le massage à thorax ouvert, tout en demandant l'administration de médicaments complémentaires. Vingt-cinq minutes s'écoulent, puis Beck demande l'application d'un second choc, qui, cette fois, engendre un rythme normal. Trois heures après, l'adolescent, réveillé, répond normalement aux questions qu'on lui pose ; il se rétablira ensuite parfaitement.

Beck avait conscience de la portée de ce premier succès de défibrillation humaine : dans les années 1940, les États-Unis connaissaient le début d'une endémie de maladies coronariennes sans précédent. Aujourd'hui, en Europe et aux États-Unis, les maladies de l'appareil circulatoire demeurent la première cause de mortalité chez l'adulte. Beck savait que la plupart des décès par coronaropathie, notamment par arrêt cardiaque, étaient dus à une fibrillation ventriculaire. Celle-ci est à l'origine de 65 pour cent des arrêts cardiaques. Environ trois

pour cent des arrêts sont dus à une tachycardie ventriculaire (un rythme cardiaque très accéléré), qui dégénère généralement en fibrillation. Le reste des arrêts cardiaques résulte d'une asystole (électrocardiogramme plat) ou d'une dissociation électromécanique (cœur flasque, incapable de se contracter malgré une activité électromécanique).

La cause exacte de la fibrillation ventriculaire est mal connue. Souvent elle résulte de l'occlusion partielle ou totale d'une artère coronaire, qui prive le muscle cardiaque de sang et, donc, d'oxygène (ischémie myocardique). Parfois, la fibrillation ventriculaire n'a pas de cause apparente. Le cœur en état de fibrillation ne pompe pas de sang, le pouls disparaît et la pression sanguine devient nulle. Cet état de « mort clinique » conduit à une mort biologique irréversible si la circulation n'est pas rétablie en quelques minutes.

Si elle se produit parfois au cours d'interventions chirurgicales, la fibrillation ventriculaire se déclenche le plus souvent en dehors de l'hôpital, au cours de l'activité quotidienne des victimes : sur les 350 000 arrêts cardiaques enregistrés aux États-Unis chaque année, 75 pour cent ont lieu à domicile.

En 1947, Beck n'avait d'autre solution que de rouvrir la poitrine de son patient et de masser le cœur pour maintenir la circulation : la réanimation cardio-respiratoire (RCR) que nous connaissons aujourd'hui ne fut inventée qu'en 1960. Beck savait que le massage manuel ne servait qu'à gagner du temps, l'électricité étant (et restant) le



**1. LA DEFIBRILLATION** est la seule méthode efficace contre la fibrillation ventriculaire, c'est-à-dire la contraction désordonnée des diverses zones du cœur. Des électrodes enduites d'un gel conduc-

teur envoient un choc électrique au muscle cardiaque : pour des raisons encore mal comprises, le choc resynchronise la contraction de l'organe.

seul moyen de traiter la fibrillation ventriculaire.

Avant de sauver le jeune homme de 14 ans, Beck avait mis au point et perfectionné sa machine sur des centaines de chiens, mais il lui fallait démontrer son pouvoir potentiel de sauver des vies humaines. Après son premier succès, il publia un rapport dans le *Journal of the American Medical Association* et initia aussitôt les médecins au diagnostic de la fibrillation et à l'utilisation des défibrillateurs.

Beck considérait le défibrillateur comme un outil capable de récupérer «des cœurs en trop bon état pour mourir», des cœurs qui continueraient à fonctionner si la défibrillation intervenait suffisamment vite. Son expression est tout à fait appropriée, car un cœur qui repart après une défibrillation a généralement de longues années devant lui ; un cœur atteint de fibrillation est comme un superordinateur qui tomberait en panne à cause d'un fusible.

Un demi-siècle après la première défibrillation, les espoirs de Beck se sont-ils réalisés ? Le monde entier a-t-

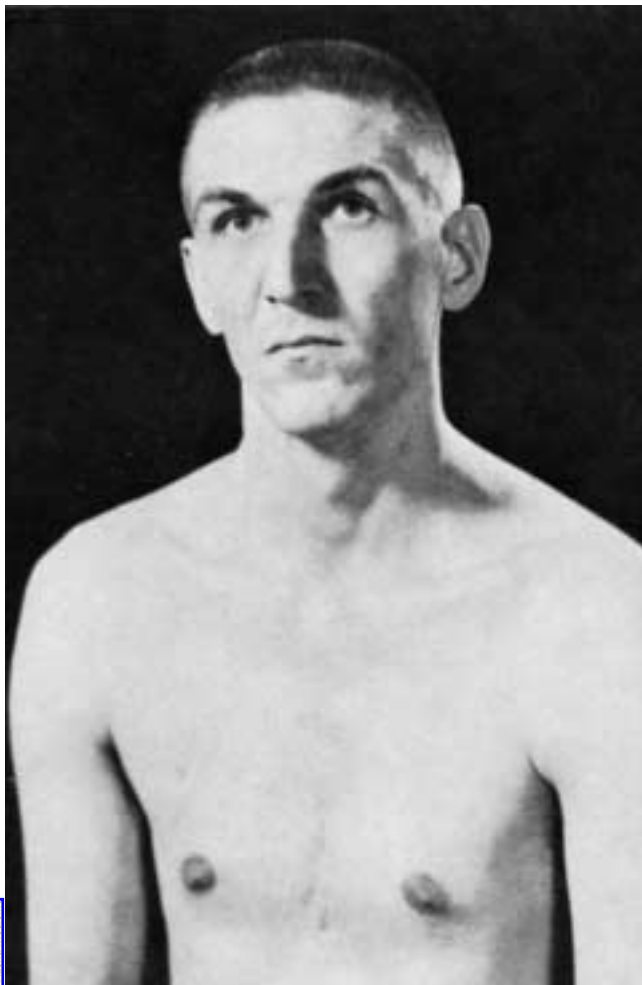
il adopté son invention ? Son extraordinaire potentiel s'est-il concrétisé ? Que nous réserve l'avenir ?

Le défibrillateur de Beck était une machine lourde et encombrante, qui utilisait le courant alternatif du secteur et nécessitait un transformateur volumineux. La tension, généralement de 1 000 volts, était appliquée pendant un quart de seconde ou une demi-seconde. Montée sur un chariot, la machine était difficilement transportable. En outre, on devait appliquer les électrodes directement sur les ventricules, car on ignorait alors quelle intensité électrique était nécessaire pour propager le choc à travers la cage thoracique. Après ces modestes débuts, les défibrillateurs devinrent plus petits et beaucoup plus élaborés. Les applications cliniques se développèrent parallèlement à la technique.

Peu après la publication de Beck, en 1947, la plupart des salles d'opération des pays industrialisés s'équipèrent de défibrillateurs, mais ces appareils restèrent cantonnés aux blocs

opératoires tant qu'il fallait ouvrir la cage thoracique et appliquer les électrodes directement sur le cœur. Ce problème fut résolu en 1956 par Paul Zoll, de l'École de médecine de Harvard, qui montra que la défibrillation pouvait se faire avec succès à travers une cage thoracique intacte. Les défibrillateurs apparurent alors dans les services d'urgence et dans les unités de cardiologie.

Toutefois, ces défibrillateurs volumineux fonctionnaient toujours avec du courant alternatif. Aussi restèrent-ils confinés dans les hôpitaux. Comment en faire des systèmes transportables par des équipes d'urgence ? Les obstacles furent surmontés en 1960, par Bernard Lown, de l'École de santé publique de Harvard, et par William Edmark, de l'Université de Washington : ils montrèrent que, non seulement les défibrillateurs pouvaient fonctionner avec du courant continu, mais qu'ainsi ils étaient plus sûrs, car ils entraînaient moins de complications après le choc, telles que des troubles de la conduction ou du



**2. LE PREMIER HOMME AYANT BÉNÉFICÉ DE LA DÉFIBRILLATION** (représenté à gauche, 20 ans après son opération) fut victime, en 1947, d'une fibrillation ventriculaire au cours d'une intervention chirurgicale visant à réparer une déformation congénitale de sa cage thoracique. À cette époque, l'issue de la fibrillation ventriculaire était invariablement fatale. Le chirurgien Claude Beck (ci-dessus) réanima son patient grâce à un défibrillateur semblable à celui de la figure 3.

rythme cardiaque difficiles à traiter. Dans ces systèmes à courant continu, des batteries portables assuraient le stockage de l'énergie, et des condensateurs que l'on déchargeait procuraient une libération rapide de l'énergie stockée. Même si les premiers appareils à batteries pesaient près de 16 kilogrammes, les défibrillateurs devenaient transportables. Il ne restait plus qu'à organiser les secours.

## Vers les défibrillateurs portables

À Belfast, deux cardiologues voyaient affluer les victimes, toujours plus nombreuses, de maladies cardiaques. Ce fléau était quasi invisible, puisque la mort des malades survenait avant leur admission à l'hôpital, généralement dans l'heure suivant l'apparition des symptômes. Frank Pantridge et son collègue John Geddes pensèrent que le seul moyen d'atteindre à temps les malades qui décédaient de fibrillation ventriculaire était de se rendre directement à leur domicile. En 1966, remettant une ancienne ambulance en service, ils créèrent la première unité mobile de soins intensifs au monde, qui comprenait un médecin, une infirmière et un défibrillateur rudimentaire, alimenté par deux batteries de voitures de 12 volts.

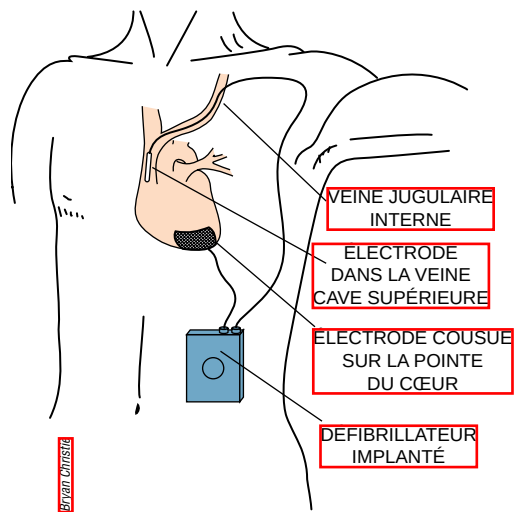
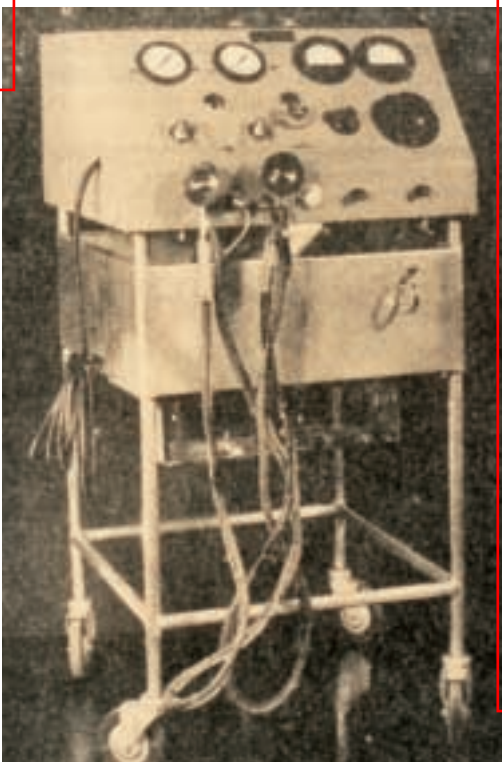
En 18 mois, ils avaient traité suffisamment de cas pour publier leurs résultats dans le journal international *Lancet* ; ils décrivaient notamment le cas de dix patients soignés pour arrêt cardiaque : tous avaient présenté une fibrillation ventriculaire et avaient été réanimés sur place, puis transportés à l'hôpital ; cinq d'entre eux avaient été sauvés.

L'idée des unités de soins mobiles se répandit rapidement. Vers la fin des années 1960, plusieurs villes s'en équipèrent. Pour la première fois dans l'histoire, on ranimait des personnes qui mouraient subitement. Des programmes de soins d'urgence sont maintenant en place dans pratiquement tous les pays industrialisés.

Toutefois, ces unités de soins ne suffisent pas. Lorsqu'une personne nécessite une défibrillation, chaque

minute compte, et l'attente d'une ambulance fait perdre un temps précieux : on sauverait davantage de vies si l'on distribuait plus largement des appareils et la formation nécessaire à leur utilisation.

Jusqu'aux années 1970, les défibrillateurs fonctionnaient manuelle-



**3. LE PREMIER DEFIBRILLATEUR utilisé sur l'homme ressemblait à celui présenté ci-dessus. Constitué d'un transformateur, de divers instruments de surveillance et de deux électrodes placées directement sur le cœur, le défibrillateur était un cube d'une cinquantaine de centimètres de côté. Il fonctionnait avec le courant alternatif du secteur. Les premiers défibrillateurs implantables (en bas) étaient gros comme des baladeurs et pesaient près de 340 grammes. Implantés dans l'abdomen, ces boîtiers étaient reliés à des électrodes qui arrivaient directement à l'apex du cœur et à la veine cave supérieure.**

ment. L'opérateur (médecin, infirmière ou auxiliaire médical) devait analyser le rythme cardiaque sur un petit oscilloscope, puis, en cas de fibrillation ventriculaire, appliquer les électrodes et administrer un choc électrique au patient. Dans les années 1980, les défibrillateurs devinrent « intelligents ». Des systèmes informatiques capables de détecter une fibrillation ventriculaire furent ajoutés aux défibrillateurs : ils analysent automatiquement le rythme cardiaque du patient et n'envoient de choc électrique qu'en cas de fibrillation ventriculaire. Grâce à des équipements de synthèse vocale, les défibrillateurs automatiques externes, dont certains pèsent moins de deux kilogrammes, « parlent » à l'opérateur et le guident tout au long de la procédure. L'usage des défibrillateurs s'est ainsi étendu aux centaines de milliers de techniciens médicaux qui forment le personnel des services ambulanciers. Aujourd'hui, il y a plus de 250 000 défibrillateurs aux États-Unis. Quelque 100 000 sont utilisés en dehors des hôpitaux et la moitié d'entre eux sont des défibrillateurs automatiques externes.

En France, l'usage des défibrillateurs est réservé aux seuls médecins (hôpitaux, SAMU). Toutefois, depuis peu, les pompiers sont équipés de défibrillateurs semi-automatiques qui détectent la fibrillation éventuelle.

Depuis 1994, on assiste à une progression spectaculaire du nombre de défibrillateurs. Toutefois s'il est utile de multiplier leur nombre, l'efficacité n'en demeure pas moins limitée, car la majorité des arrêts cardiaques ne se produisent pas dans les stades ou dans les centres commerciaux, mais au domicile des victimes. Seuls 15 pour cent des arrêts cardiaques se produisent dans des lieux publics.

Pour mieux faire profiter les populations des défibrillateurs, on devra encore réduire leur coût, afin d'en faire des appareils commercialisables en pharmacie. Aujourd'hui, les défibrillateurs automatiques externes sont vendus sur ordonnance, et ils coûtent près de 20 000 francs ; une production en série (d'environ un million d'unités par an) pourrait ramener le prix

## Sauver des vies sans défibrillateur

La réanimation cardio-respiratoire (le massage cardiaque et le bouche à bouche) permet de sauver la vie de patients victimes de fibrillation ventriculaire et de tachycardie ventriculaire, une accélération du rythme cardiaque qui précède la fibrillation. Cependant, cette technique sauve moins de cinq pour cent des victimes d'arrêts cardiaques hors des hôpitaux. Pourquoi cette faible proportion ? Parce que les personnes âgées qui en auraient le plus souvent besoin ne connaissent pas cette technique et que l'entourage des patients est incapable de réagir.

Ainsi, bien que l'arrêt cardiaque survienne généralement à la maison, la plupart des membres de la famille du patient ignorent les techniques de réanimation respiratoire. De surcroît, l'atmosphère très tendue qui entoure l'arrêt cardiaque ne favorise pas

la mise en pratique des manœuvres élémentaires de réanimation.

Des gestes faciles à apprendre peuvent toutefois remplacer la réanimation cardio-respiratoire. Ils doivent intervenir dans les quatre à six minutes dont on dispose pour rétablir la circulation et l'oxygénation du cœur. Comme pour la réanimation cardio-respiratoire classique, la proportion de vies sauvées est faible. Dans certains cas, on ne sauve pas la victime parce que son état général est mauvais ou la fibrillation trop grave, mais, parfois aussi, faire quelque chose peut sauver une vie. Un coup de poing sur la poitrine peut suffire à maintenir une personne en vie pendant quelques minutes, en attendant l'arrivée du médecin. La leçon à retenir est qu'il faut tenter quelque chose rapidement.

### Les gestes qui peuvent sauver

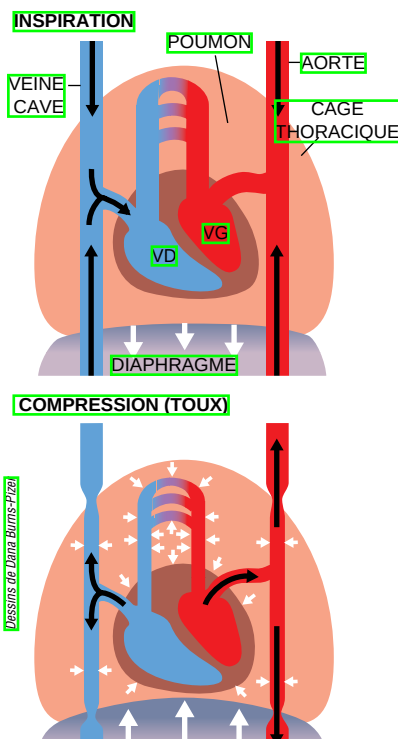
Lorsque quelqu'un s'écroule subitement, vérifiez tout d'abord rapidement le pouls ou le battement du cœur. Si l'un ou l'autre est perceptible, relevez les jambes de la victime au-dessus du plan du corps allongé (pour augmenter le reflux du sang vers la circulation cérébrale) ; puis demandez une aide médicale.

En l'absence de pouls, soupçonnez un arrêt cardiaque. Vérifiez si les voies respiratoires ne sont pas obstruées et dégagez-les. Comme la plupart des patients victimes d'un arrêt cardiaque ayant pu être réanimés présentaient une tachycardie ou une fibrillation ventriculaire, vous pouvez considérer que c'est là l'origine du problème ; appliquez alors l'une des deux méthodes suivantes.



### Faire tousser le patient

Si la victime est consciente et capable de réagir, faites-la tousser très fort une ou deux fois : on a observé qu'une toux énergique peut transmettre suffisamment de courant au cœur pour arrêter la funeste arythmie et rétablir un rythme cardiaque régulier. Cette pratique est appropriée à l'auto-administration : un malade cardiaque qui perçoit des palpitations, un étourdissement et pressent une perte de connaissance imminente gagne à se faire tousser vigoureusement.



Pourquoi cet effet ? Durant la phase d'inspiration de la toux, l'abaissement du diaphragme facilite le retour du sang vers le ventricule droit et oxygène le sang qui irrigue les poumons à ce moment-là (voir le schéma). Au cours de la phase d'expiration, la contraction des muscles abdominaux force le diaphragme à remonter dans la cage thoracique, ce qui exerce une forte pression sur le cœur et sur les gros vaisseaux sanguins associés, qui propulsent alors le sang à travers les valves cardiaques vers le cerveau et les autres organes.

Une forte toux régulière, répétée près de 60 fois par minute, peut être aussi efficace que la réanimation cardio-respiratoire classique. La réanimation par la toux s'est révélée efficace pour une durée d'environ 90 secondes, même si des cas isolés ayant atteint cinq minutes ont été rapportés. Le malade finit par se fatiguer, mais il gagne du temps.

### La méthode des coups de poing

Lorsque le malade n'est pas capable de tousser, on frappera une ou deux fois, au milieu de la poitrine, avec le poing fermé. La manœuvre doit avoir lieu moins d'une minute après le malaise, et le coup, porté d'une hauteur de 15 à 20 centimètres, doit être appliqué aux deux tiers supérieurs du sternum. Si le premier coup ne restaure pas le pouls, un second plus fort doit être donné immédiatement. On peut également se frapper soi-même.

Le mode d'action de la méthode du coup de poing est inconnu, mais on pense qu'il engendre un stimulus électromécanique qui met fin au trouble du rythme cardiaque.

Carl BARTECCHI enseigne au département de médecine de l'Université du Colorado.

à 2 000 francs. Un défibrillateur automatique grand public n'est pas dangereux, car l'appareil ne délivre un choc électrique que s'il détecte une fibrillation ventriculaire. Un jour, le défibrillateur automatique externe sera aussi courant dans les foyers qu'un extincteur d'incendie.

## Le défibrillateur implantable

Prolongeons l'idée des défibrillateurs plus petits et plus intelligents : pourquoi ne pas placer le défibrillateur dans la poitrine du patient ? C'est précisément ce qu'a proposé Michel Mirowski, de l'Hôpital du Sinaï de Baltimore, à la suite d'une expérience personnelle tragique, en 1966. Son meilleur ami était hospitalisé pour des arythmies cardiaques qui nécessitaient une surveillance constante et des chocs électriques répétés. Toutefois, ne supportant pas de vivre ainsi à l'hôpital, il sortit, contre l'avis médical. Quelques jours plus tard, il mourut. Mirowski se promit d'éviter de tels drames.

Travaillant dans un laboratoire au sous-sol de l'Hôpital du Sinaï et sans budget de recherche, Mirowski et son collègue Morton Mower entreprirent de miniaturiser les défibrillateurs et de les implanter dans la poitrine de patients à hauts risques. Après des tests de prototypes sur des chiens, la première implantation chez l'homme eut lieu en 1980, à l'Hôpital Johns Hopkins ; ce fut un succès. Cinq années supplémentaires d'essais cliniques furent nécessaires avant que l'appareil ne soit approuvé par l'Agence américaine du médicament.

Les premiers défibrillateurs implantables commercialisés étaient de la taille d'un baladeur et pesaient 340 grammes. En raison de leur taille et de leur poids, ils devaient être placés dans une poche cutanée, au niveau de l'abdomen, et reliés par des fils aux électrodes implantées sur le cœur. Pour installer l'appareil, un chirurgien devait opérer à thorax ouvert et coudre les électrodes directement sur les ventricules. En fonctionnement, l'appareil surveille en permanence le rythme cardiaque et, lorsqu'il décèle une fibrillation, il charge ses condensateurs et libère une énergie électrique égale à 34 joules. C'est moins que les 200 ou 300 joules de la défibrillation externe classique, mais c'est suffisant pour une application directe sur le cœur.

L'implantation de ces appareils, qui ne se justifiait que dans des cas extrêmes, démontra que des vies pouvaient être sauvées. Depuis 1985, les défibrillateurs implantables ont été améliorés et miniaturisés. Ceux de la dernière génération ne pèsent que 85 grammes, et leur taille réduite permet de les implanter sous la peau de la partie supérieure du thorax, tout comme les stimulateurs antibradycardes (ou *pace-maker* qui stimulent le cœur en cas de ralentissement du rythme cardiaque). Le boîtier en titane abritant l'appareil constitue l'une des électrodes, et une sonde reliée au cœur par une veine constitue la seconde électrode. La mise en place d'un tel appareil ne requiert qu'une intervention de une heure pratiquée en soins externes.

Les appareils les plus récents ont une autonomie de huit ans. Ils enregistrent également l'activité électrique cardiaque et aident ainsi à une

meilleure prise en charge diagnostique et thérapeutique du patient. Cette technique reste onéreuse : 150 000 francs pour le défibrillateur et 100 000 francs pour l'implantation. Aux États-Unis, plus de 100 000 appareils ont été implantés à ce jour. Avec une estimation de 30 000 implantations par an, elle représente un marché de huit milliards de francs par an.

Beck serait étonné de voir les défibrillateurs actuels. Des appareils de 85 grammes intelligents et implantables étaient inconcevables en 1947, mais ces 50 années d'évolution ont-elles réellement sauvé autant de vies qu'on l'espérait ? Malheureusement non. Malgré les centaines de programmes de services médicaux d'urgence et les milliers d'auxiliaires médicaux formés à la pratique de la défibrillation, seule une infime partie des patients victimes d'arrêts cardiaques sont sauvés chaque année aux États-Unis comme en France.

## Un retard à combler

En France, on compte 400 implantations de défibrillateurs par an, ce qui correspond à un des taux les plus faibles d'Europe. À titre d'exemple, il y a 8,2 appareils par million d'habitants dans l'hexagone contre 38 en Allemagne.

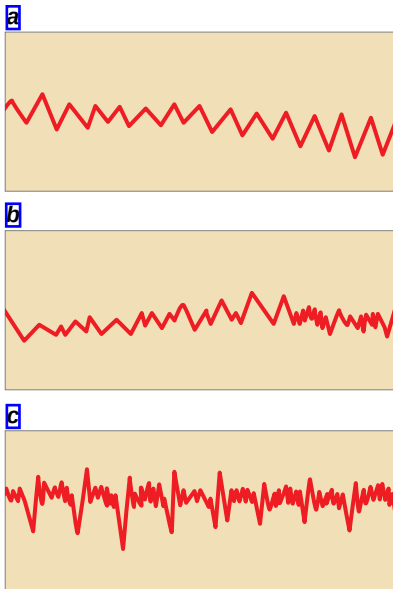
Pourquoi ce retard ? Tout d'abord peu de victimes de fibrillation ventriculaire bénéficient d'emblée, sur les lieux de l'incident, des manœuvres de réanimation efficaces : seulement deux pour cent des victimes survivent en France contre 20 pour cent dans des villes comme Seattle, aux États-Unis. Il y a donc besoin d'un effort d'enseignement, destiné à un public large, des gestes élémentaires de réanimation cardio-respiratoire. Une meilleure prise en charge initiale contribuerait à une augmentation du nombre de patients rescapés d'arrêt cardiaque et donc du nombre d'implantations de défibrillateurs.

Un autre frein à l'implantation réside dans l'absence de remboursement de l'appareil de défibrillation par la Caisse nationale d'assurance maladie (CNAM). L'acquisition du défibrillateur dépend en effet uniquement du budget de l'hôpital dans

lequel le patient est soigné. Les contraintes budgétaires pourraient donc peser dans la décision d'implantation.

Pour finir, insistons sur le fait que la décision d'implantation n'est pas systématique chez tout patient cardiaque avec trouble du rythme ventriculaire. Le choix d'un traitement par le défibrillateur doit être mûrement réfléchi. Un bilan complet est nécessaire afin d'éliminer toute autre cause potentielle d'arythmie, en particulier l'ischémie myocardique. Des études cherchent à déterminer précisément la place de ce traitement parmi les autres thérapeutiques, pharmacologiques ou chirurgicales, dont dispose le cardiologue. Les résultats de ces travaux seront déterminants pour estimer le rapport risque/bénéfice du défibrillateur chez un patient donné. Enfin, des travaux de recherche expérimentale doivent être encouragés pour décrypter les mécanismes de la fibrillation ventriculaire, pathologie encore insuffisamment comprise, et donc mal prévenue.

Philippe CHEVALIER et Paul TOUBOUL, Hôpital Louis Pradel, Lyon



**4. LE TRACE CARDIAQUE** de la première personne ayant bénéficié d'une défibrillation montre le rythme vacillant et désorganisé caractéristique de la fibrillation ventriculaire (a et b). Le dernier tracé (c) montre le rythme plus régulier restauré par la défibrillation.

Ce nombre (quelques centaines tout au plus) reste faible parce que la défibrillation intervient trop tard. Une stratégie fondée sur l'envoi d'urgence de défibrillateurs aux patients ne peut remporter qu'un succès limité.

### La solution définitive

Pourquoi cet échec? Parce que nous ignorons la cause de la fibrillation, et ne savons pas la prévoir ; comme il est impossible d'équiper de défibrillateurs tout malade potentiel, le nombre de décès diminue peu. Vingt pour cent des fibrillations ventriculaires surviennent chez des personnes n'ayant aucun antécédent cardiaque. Les facteurs déclenchants sont mal connus. Ils comprendraient l'ischémie (une oxygénation insuffisante du muscle cardiaque qui le rend irritable), des anomalies électrolytiques, des déséquilibres neurovégétatifs et des maladies héréditaires.

Les médecins connaissent mal également le mécanisme de la défibrillation. Vraisemblablement, le choc électrique dépolarise simultanément toutes les fibres musculaires du cœur, permettant à son mécanisme de temporisation interne de se resynchroniser et de revenir ainsi à la normale. Cette resynchronisation s'apparente à la réinitialisation d'un ordinateur qui s'est mystérieusement bloqué.

Même si les défibrillateurs se multiplient, la seule solution définitive du problème de fibrillation ventriculaire réside dans la prévention. Les défibrillateurs sont à l'origine d'un paradoxe que le médecin Lewis Thomas fut le premier à décrire : cet instrument que nous pensons être une prouesse technique n'est en fait qu'un balbutiement, puisque nous n'avons qu'une connaissance très rudimentaire de la maladie. En fait, le plus haut niveau de technique médicale est celui qui est le moins cher et qui va de pair avec une bonne connaissance de la maladie, comme c'est le cas pour la vaccination. Le plus bas niveau technique est très coûteux et traite les ravages qu'occasionne une maladie plutôt que de les prévenir. Nous savons miniaturiser les défibrillateurs et les implanter dans le thorax des patients, mais nous ne comprenons pas pourquoi un cœur entre en fibrillation et nous restons incapables de reconnaître les signes avant-coureurs de la fibrillation ventriculaire.

Depuis 50 ans, les progrès de la cardiologie ont été considérables, mais la fibrillation ventriculaire reste toujours la première cause de décès chez l'adulte. Je dirais que les espoirs de Beck ne se sont réalisés qu'à 50 pour cent. Lorsque l'usage à domicile des défibrillateurs sera autorisé, peut-être que l'énorme potentiel des défibrillateurs se concrétisera, mais il s'agira encore d'une fausse victoire. La vraie victoire sera remportée lorsque nous comprendrons la fibrillation ventriculaire et saurons la prévenir. Ne serait-il pas fabuleux de considérer un jour le défibrillateur comme un objet obsolète?

Mickey EISENBERG dirige le service de médecine d'urgence de l'Université de Washington.

C.S. BECK, W.H. PRITCHARD et H.S. FEIL, *Ventricular Fibrillation of Long Duration Abolished by Electric Shock*, in *Journal of the American Medical Association*, vol. 135, pp. 985-986, 1947.

J.F. PANTRIDGE et J.S. GEDDES, *A Mobile Intensive-Care Unit in the Management of Myocardial Infarction*, in *Lancet*, n° 7510, pp. 271-273, 5 août 1967.

M.S. EISENBERG, L. BERGNER, A.P. HALLSTROM et R.O. CUMMINS, *L'arrêt cardiaque*, in *Pour la Science*, juillet 1986.

## DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

**DIDIER NORDON**

**Des cailloux dans les choses sûres**



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

144 pages - 65 F  
Code 1897

**POUR LA SCIENCE**  
DIFFUSION BELIN

**Bon de commande en p. 90**



# La gradiométrie gravitationnelle

ROBIN BELL

*Un appareil de mesure mis au point pour le guidage des sous-marins permet l'établissement de cartes géologiques précises.*

Comment diriger un sous-marin dans les profondeurs opaques des océans? Les sonars, qui émettent des ultrasons et chronométrent le retour des échos, détectent des obstacles situés à l'avant du bâtiment ou mesurent la hauteur d'eau sous la quille, mais ils risquent de révéler la présence du sous-marin aux ennemis.

Pendant la guerre froide, la Marine américaine équipa donc ses sous-marins nucléaires de systèmes de guidage plus discrets, nommés gradiomètres gravitationnels, qui détectent les infimes variations de l'attraction gravitationnelle engendrées par les récifs ou par les montagnes sous-marines. Ces appareils, dont l'existence a longtemps été tenue secrète, sont aujourd'hui utilisés par les compagnies pétrolières pour la localisation précise de gisements de pétrole et de gaz naturel.

Les géologues ont depuis longtemps tenté de mesurer les variations locales de l'intensité de la pesanteur. En 1890, le physicien hongrois Loránd Eötvös conçut le premier dispositif qui mesurait directement les variations dues à la présence d'un corps massif. Avant lui, des physiciens avaient chronométré les oscillations de pendules pour détecter les effets des marées solides dues à la Lune et au Soleil, mais la balance de torsion d'Eötvös était beaucoup plus sensible.

Cette balance est composée d'une potence métallique horizontale suspendue à un fil, aux extrémités de laquelle sont fixées deux masses. L'une des masses est sur la potence et l'autre est accrochée plus bas (voir la figure 1, à droite). Comme l'orientation du champ de gravité est légèrement dif-

férente aux points occupés par les masses, la potence tourne autour du fil, jusqu'à ce que la torsion de celui-ci contrebalance exactement la différence des forces. La mesure de l'angle d'équilibre, avec un viseur solidaire de la potence, pour cinq orientations de départ différentes permet le calcul de toutes les composantes du gradient gravitationnel (voir l'encadré page 96).

## Du fond du lac aux gisements pétroliers

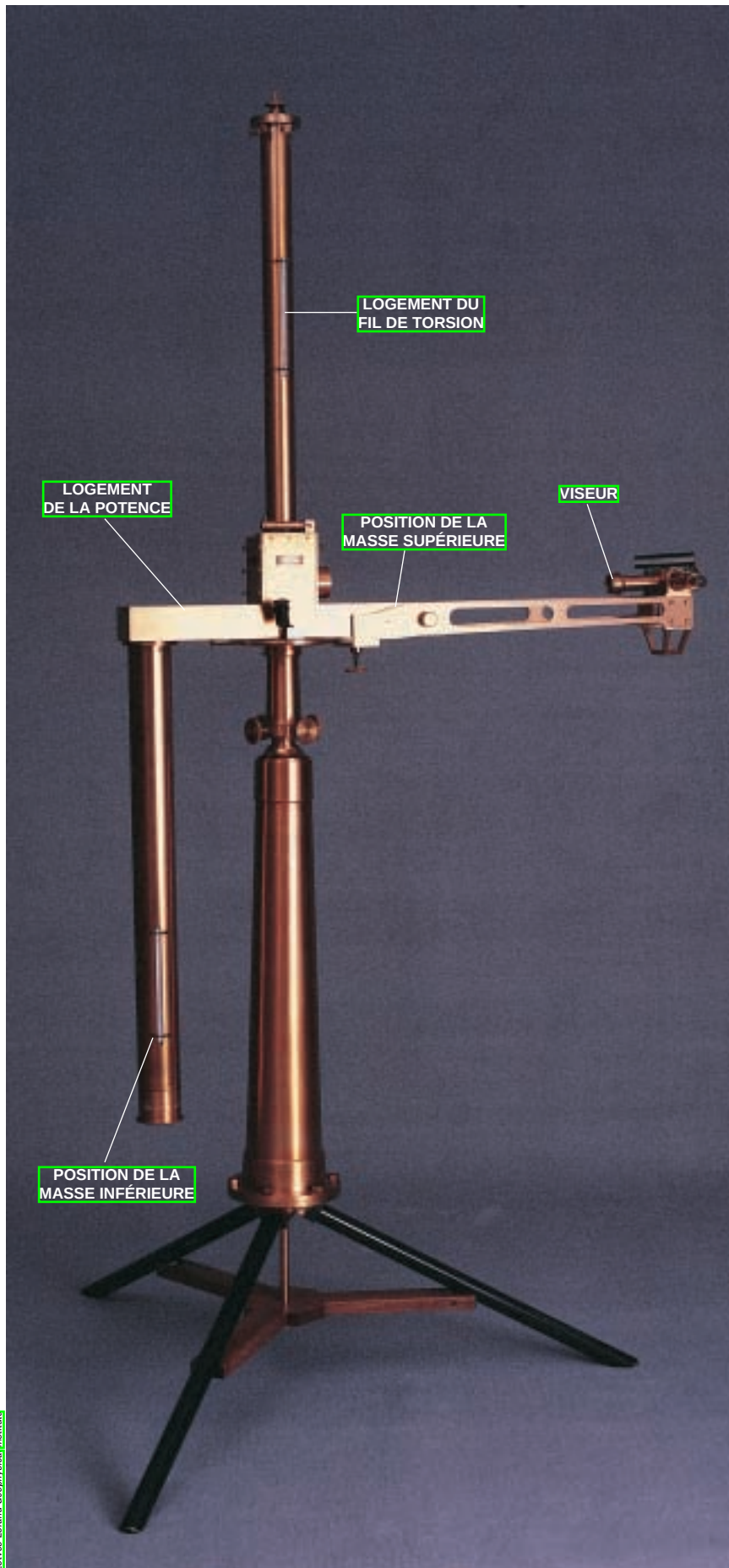
Le directeur du Bureau géologique hongrois, Hugo de Boeckh, eut l'idée d'utiliser de telles mesures pour déterminer la structure géologique du sous-sol. En 1901, Eötvös et de Boeckh testèrent cette idée sur un lac gelé. Ils dressèrent une carte du fond du lac et la comparèrent à un relevé au fil à plomb réalisé l'été précédent : le résultat était identique. Puis ils réalisèrent des relevés géologiques plus complexes, qui intéressèrent rapidement les prospecteurs pétroliers.

Ce n'est toutefois qu'après la Première Guerre mondiale que des géologues américains utilisèrent la balance d'Eötvös pour la prospection pétrolière. Ils espéraient notamment détecter ainsi une de leurs cibles favorites : les «dômes de sel». Ces structures géologiques en forme de champignon, qui atteignent parfois plus d'un kilomètre d'épaisseur, renferment souvent d'énormes gisements de gaz et de pétrole, parce qu'ils résultent de l'assèchement d'océans, au cours duquel des sédiments organiques ont été enfouis et transformés. Comment détecter ces dômes lorsqu'ils n'affleurent pas en surface? Le sel étant moins dense que la plupart des roches, il exerce une attraction gravitationnelle inférieure : des valeurs anormalement faibles de l'intensité de la pesanteur (ou une anomalie du gradient gravitationnel au-dessus de ces gisements) indiquent la présence de telles masses de sel.

Un premier dôme de sel fut ainsi découvert, à l'aide d'une balance d'Eötvös, en 1924. De nombreuses autres découvertes s'enchaînèrent rapi-



**1. LE PREMIER GRADIOMETRE** (à gauche), une balance de torsion, a été mis au point par le physicien hongrois Loránd Eötvös, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Pendant l'hiver 1901, Eötvös et ses collègues ont testé cet instrument en cartographiant le fond du lac Balaton, près de Budapest, à partir de sa surface gelée (ci-dessus).



dement, et des géologues dressèrent les cartes de formations souterraines plus complexes à l'aide de gradiomètres gravitationnels. Au milieu des années 1930, la gradiométrie gravitationnelle était devenue une technique classique de la prospection pétrolière.

Toutefois, le succès du gradiomètre gravitationnel fut bref, parce que l'instrument était d'emploi compliqué : avant d'utiliser une balance de torsion, on devait niveler le terrain sur une centaine de mètres de long et dans huit directions différentes, puis, au centre de cette clairière étoilée, on devait construire un petit bâtiment qui protégeait la balance du vent ou des variations de température. Les lourdes boucles de ceintures, les lignes téléphoniques, les caves du voisinage et même la présence des expérimentateurs étaient à l'origine de nombreuses incertitudes. Les cartes de gradients gravitationnels étaient en outre difficiles à interpréter.

Au contraire, les instruments qui mesuraient directement l'intensité de la pesanteur (aussi très utilisés par les prospecteurs pétroliers dans les années 1930) étaient moins perturbés par l'environnement, et leur emploi ne nécessitait ni l'abattage d'arbres ni la construction de bâtiments. Les géologues préféraient employer des cartes où se superposaient les contours d'égale intensité de la pesanteur que des cartes gradiométriques détaillées, encombrées de traits et de flèches énigmatiques. La gradiométrie gravitationnelle tomba donc dans l'oubli.

### Le renouveau

Comme la plupart de mes collègues, je ne connaissais de cette technique que ces quelques éléments historiques, rapportés par les manuels de géologie. En revanche, j'utilisais la gravimétrie pour mes travaux : à l'aide d'un gravimètre électronique perfectionné que j'avais installé à bord d'un avion, j'explorais la géologie du socle rocheux de l'Antarctique Ouest.

Il y a quatre ans, mon collègue Roger Anderson me demanda si, avec mon gravimètre, je pourrais survoler la zone qu'il étudiait, dans le golfe du Mexique, afin de comparer mes mesures avec celles recueillies par un navire. Il souhaitait analyser les variations de l'intensité de la pesanteur en fonction de l'altitude, c'est-à-dire faire de la gradiométrie gravitationnelle ! Il recherchait des dépôts de sel dans

le golfe du Mexique, parce que ces dépôts amortissent les ondes sismiques avec lesquelles des prospecteurs pétroliers explorent le sous-sol (les techniques sismiques standards qui reposent sur l'émission et la réflexion d'ondes sonores).

Je savais que des mesures gravimétriques par avion seraient difficiles parce que, même dans de bonnes conditions de vol, l'altitude de vol varie, de sorte que les mesures seraient entachées d'une grande incertitude. Le gradiomètre gravitationnel utilisé dans les sous-marins militaires, dont j'avais appris l'existence par le fabricant de mon gravimètre, résoudrait-il le problème? Pour obtenir le gradient gravitationnel complet, les militaires utilisent cet instrument équipé de six paires de capteurs gravitationnels. Dans chaque paire, les capteurs sont placés de part et d'autre d'un axe

autour duquel l'ensemble tourne. La différence des forces exercées sur les deux capteurs pour différentes positions permet de calculer les composantes du gradient gravitationnel.

La Société *Bell Aerospace*, qui avait fabriqué les gradiomètres pour les sous-marins, n'avait plus de commandes régulières des militaires et recherchait d'autres utilisations. Des ingénieurs avaient imaginé de mesurer la charge de camions en train de rouler, mais cette idée n'avait guère rencontré de succès commercial. Nous avons donc rapidement convaincu les responsables de cette société, la Marine américaine et plusieurs compagnies pétrolières de nous aider à tester le gradiomètre gravitationnel pour la prospection pétrolière dans le golfe du Mexique.

Nous avons testé les instruments dans une zone située à environ 130 kilo-

mètres au Sud-Est de la Nouvelle-Orléans, qui contient une gigantesque masse de sel en forme de botte. Des géologues de la Société *Texaco* nous ont fourni des cartes géologiques qu'ils avaient dressées à partir de relevés sismiques. La Marine a accepté de mesurer des gradients gravitationnels au-dessus de cette zone à l'aide d'un gradiomètre installé à bord d'un de ses navires de recherche.

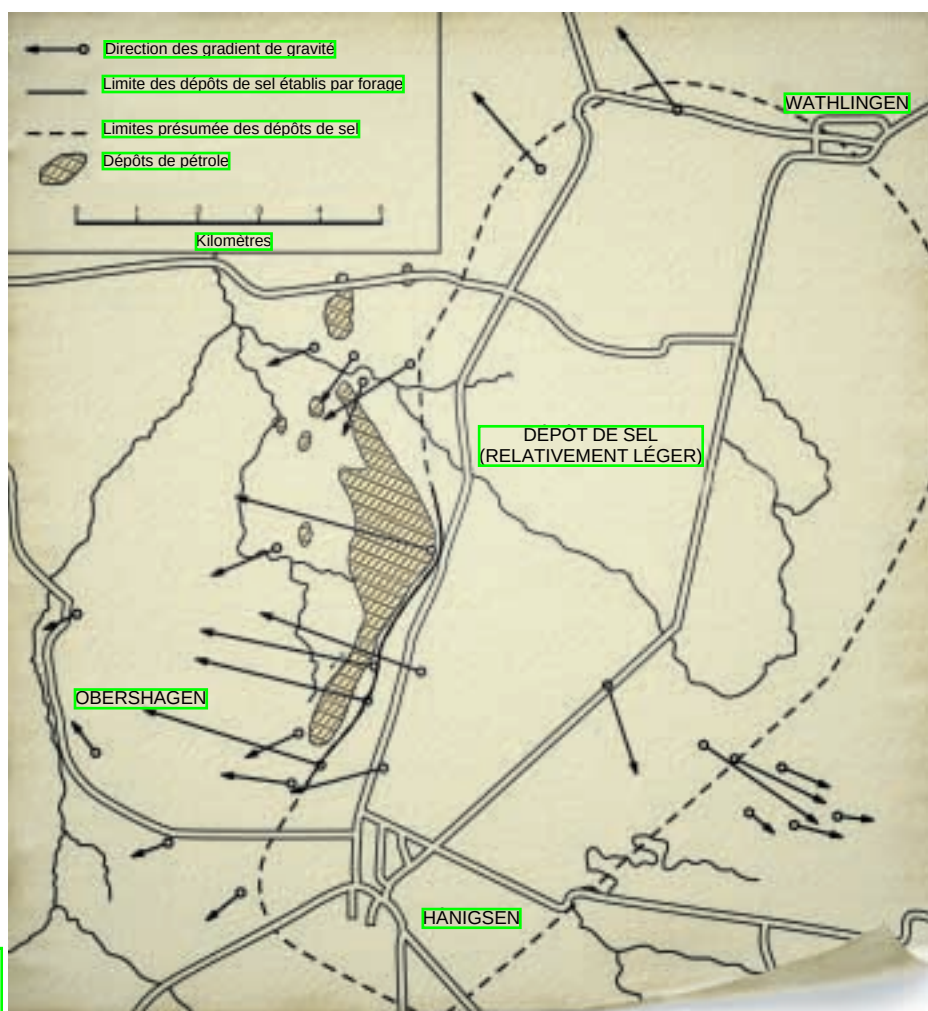
Comme le gradiomètre était encore un matériel militaire classé secret, nous n'avons pas participé à la mise au point des protocoles expérimentaux ni à l'interprétation des données brutes. Nous nous sommes consacrés à la mise au point de méthodes pour tracer des cartes géologiques à partir des valeurs des gradients gravitationnels : nous avons retrouvé les difficultés qui avaient découragé nos prédécesseurs des années 1930, avec l'heureuse différence que nous disposions d'ordinateurs.

## Une meilleure précision

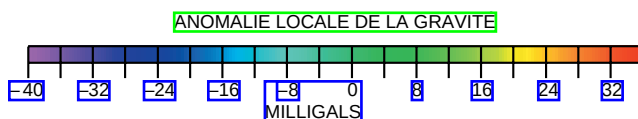
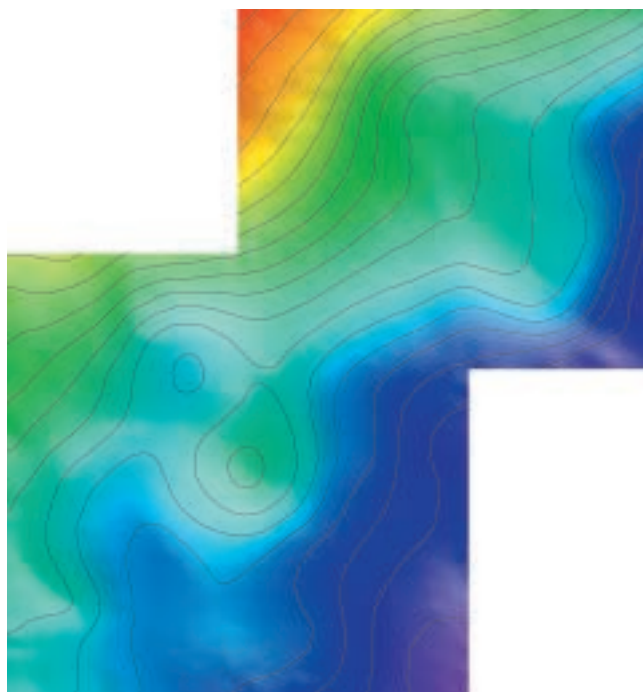
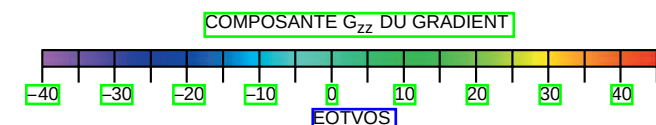
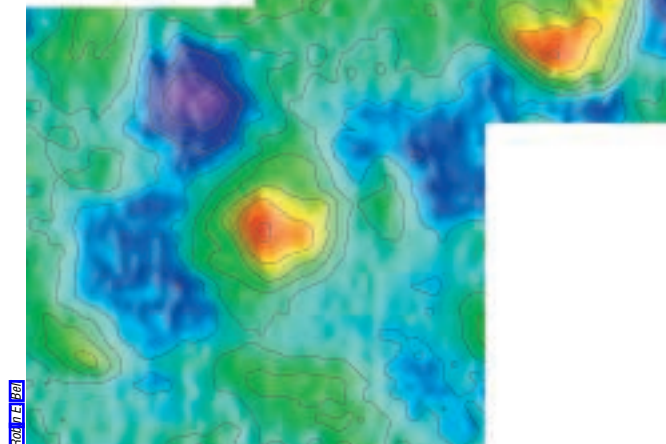
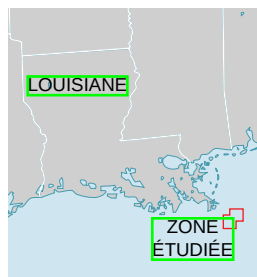
Nos premiers résultats montrèrent que les gradients gravitationnels mesurés par le navire militaire ressemblaient à ceux que nous avions déduits des cartes géologiques. Toutefois, une analyse plus détaillée des gradients révéla la présence d'une masse plus importante que ne le suggérait le relevé sismique. La gradiométrie précisa même sa position, ainsi que ses contours, qui ressemblaient à ceux d'un chapeau.

Comment tester notre hypothèse? Un forage dans le golfe du Mexique, à travers les couches de sel, aurait coûté des dizaines de millions de francs. Nous avons alors demandé aux géophysiciens de la Société *Texaco* de nous communiquer leurs analyses les plus récentes de la géologie de la zone. Sans que nous ayons mentionné nos résultats, ils découvrirent, à l'aide d'un nouveau relevé sismique, une structure géologique, auparavant restée inaperçue, qui ressemblait à un chapeau, et qui était située à l'endroit même où nous l'avions repérée. Cette découverte démontrait que la mesure des gradients gravitationnels était aussi précise que le plus détaillé des relevés sismiques pour la détection des masses salifères. Elle renforça considérablement l'intérêt des prospecteurs pétroliers pour les gradiomètres militaires.

Le gouvernement américain a aujourd'hui levé le secret sur les gra-



**2. UNE ETUDE GEOPHYSIQUE** réalisée en 1917 près de Hanovre, à l'aide d'une balance de torsion, prouva que l'on pouvait repérer des dépôts de sel souterrains grâce à la gradiométrie gravitationnelle. Ces formations salifères, moins denses que les roches environnantes, indiquent généralement que des gisements de gaz et de pétrole (zones hachurées) sont situés à proximité.



**3. LES CARTES GRAVITATIONNELLES** permettent aux prospecteurs de détecter des gisements de gaz et de pétrole. Par exemple, les mesures de la composante  $G_{zz}$  du gradient gravitationnel (qui indique la variation de l'intensité de la pesanteur suivant la verticale) au-dessus d'une zone du golfe du Mexique ont fourni une description détaillée des formations salifères sous-jacentes

(à gauche, un eötvös vaut  $10^{-9}$  par seconde au carré). En revanche, les mesures directes des anomalies locales dans l'intensité de la pesanteur, obtenues sur cette même zone, n'ont donné qu'une image grossière de la masse de sel (à droite, un milligal vaut  $10^{-5}$  mètre par seconde au carré). Ce relevé a été réalisé en 1995 au large du delta du Mississippi (en haut à gauche).



**4. UN GRADIOMETRE MODERNE** (à droite), analogue à ceux embarqués à bord de sous-marins militaires américains (ci-dessus), comprend six paires d'accéléromètres. Pour chaque paire, on mesure la différence des forces exercées par la gravité. Une grande précision est obtenue par la rotation des paires de capteurs autour d'un axe, qui permet la réalisation des mesures dans plusieurs directions.

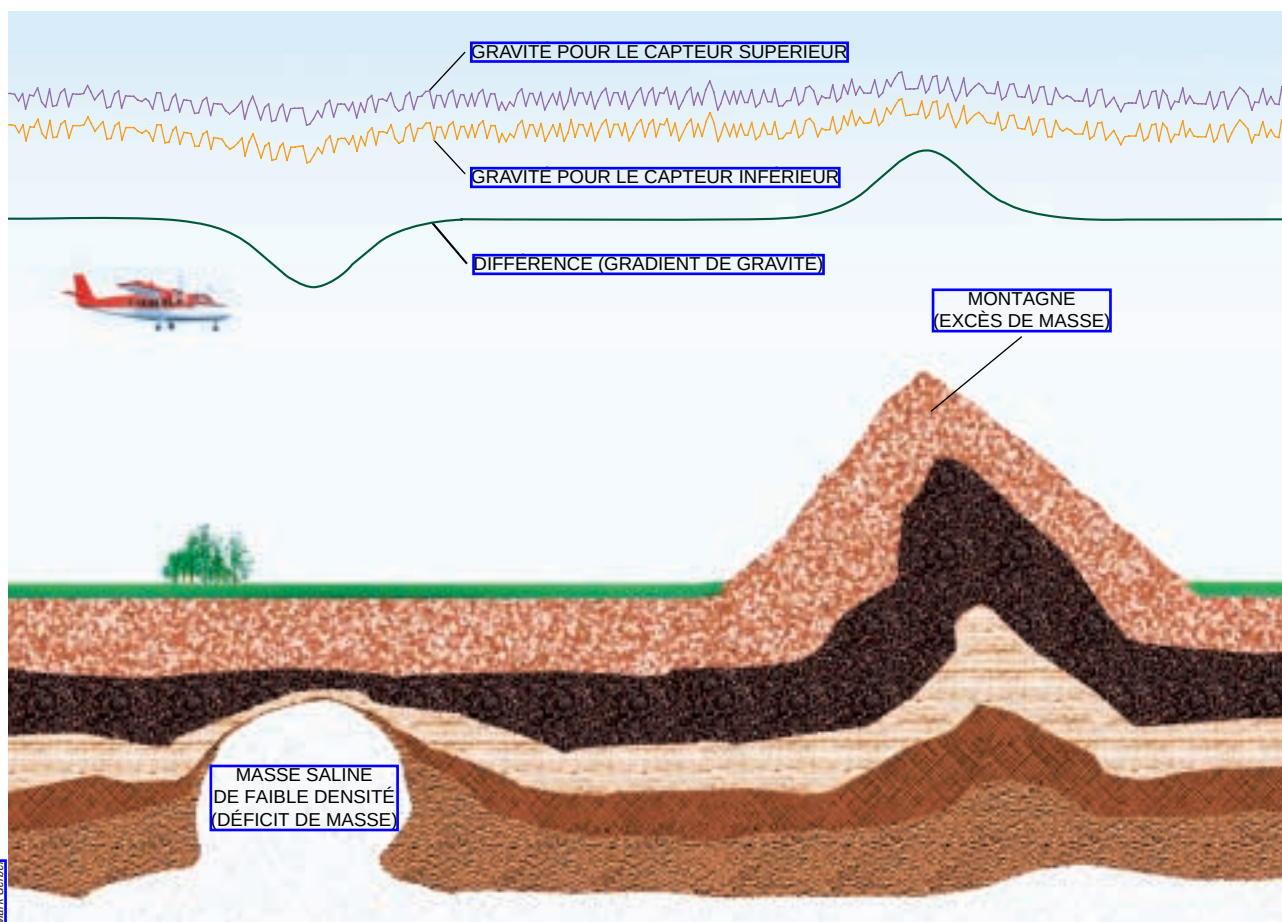
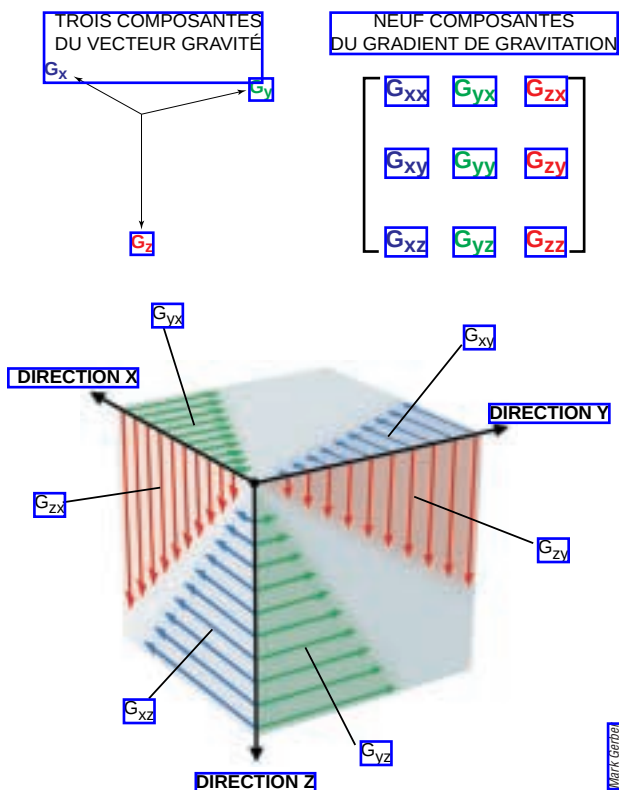


## La mesure du champ gravitationnel local

**P**our identifier les masses du sous-sol terrestre, les géologues mesurent, non pas l'intensité de la pesanteur, mais son gradient (ses variations). A la différence du champ de gravitation ( $G$ ), représenté mathématiquement par trois nombres (ses composantes dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ ), le gradient gravitationnel est décrit par neuf composantes (à droite).

L'élément  $G_{xy}$ , par exemple, mesure la variation de la composante  $G_x$  (la valeur du champ dans la direction  $x$ ) lorsqu'on se déplace dans la direction  $y$ ; l'élément  $G_{yz}$  correspond à la variation de la composante  $G_y$  (la valeur du champ dans la direction  $y$ ) lorsqu'on se déplace dans la direction  $z$ , et ainsi de suite. La somme de  $G_{xx}$ ,  $G_{yy}$  et  $G_{zz}$  étant nulle, et les éléments symétriques étant identiques (par exemple,  $G_{xy}$  est égal à  $G_{yx}$ ), cinq mesures seulement suffisent pour déterminer complètement la matrice.

La cartographie réalisée à partir des gradients gravitationnels est un progrès par rapport aux relevés de l'intensité de la pesanteur, car elle donne une image plus détaillée du sous-sol. Par exemple, lorsqu'un avion survole une montagne (un excès de masse) ou une masse salifère souterraine de faible densité (un défaut de masse), un gravimètre embarqué perçoit à peine les variations de l'intensité de la pesanteur. En revanche, les mesures correspondantes du gradient gravitationnel révèlent immédiatement une variation de masse (ci-dessous). De surcroît, les secousses subies par l'avion engendrent une forte incertitude sur le profil gravitationnel, tandis que la différence des valeurs fournies par deux capteurs mesurant le gradient gravitationnel élimine cette incertitude.



diomètres gravimétriques, que les compagnies pétrolières peuvent désormais utiliser. Sept d'entre elles l'ont déjà fait pour prospecter le golfe du Mexique. Ainsi, après avoir dressé la carte des gradients gravitationnels autour d'un dôme de sel, un géologue de la Société *Shell* a déterminé les structures géologiques sous-jacentes : la base du dôme est très nette sur cette nouvelle carte, alors qu'elle restait floue avec les relevés sismiques.

L'industrie minière s'intéresse aussi aux gradiomètres gravitationnels, pour la recherche de petits gisements enfouis dans des terrains inaccessibles ou pour la détermination de structures géologiques complexes. Pour ce type de prospection, on doit embarquer le gradiomètre à bord d'un avion. Nous avons vu que les irrégularités du vol interdisent des relevés précis avec des gravimètres, mais les gradiomètres gravitationnels permettront de tourner cette difficulté : les accélérations engendrées par la turbulence de l'air sont de même nature que l'attraction gravitationnelle, mais elles n'engendrent pas de gradients gravitationnels. Des ingénieurs australiens ont déjà mis au point une version supraconductrice de la balance d'Eötvös, que l'on peut embarquer à bord d'un avion. La Société *Bell Geospace*, à la fondation de laquelle R. Anderson et moi-même avons participé en 1994, tente d'adapter aux avions le gradiomètre conçu pour les sous-marins.

La gradiométrie gravitationnelle commence à séduire les géologues, comme elle a séduit autrefois les commandants de sous-marins. En outre, au contraire des méthodes actuelles de mesure, qui causent des dégâts environnementaux **lorsque** les équipes de prospection sillonnent en tous sens une région avec leurs camions et leurs bulldozers, cette technique, mise en œuvre d'un avion, ne nuit pas à l'environnement.

---

Robin BELL est chercheur à l'Observatoire de la Terre Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Robin E. BELL, Roger N. ANDERSON et Lincoln F. PRATSON, *Gravity Gradiometry Resurfaces*, in *Leading Edge* (Society of Exploration Geophysicists), vol. 16, n° 1, pp. 55-60, janvier 1997.

Robin E. BELL et R.O. HANSEN, *The Rise and Fall of Early Oil Field Technology : The Torsion Balance Gradiometer*, in *Leading Edge*, vol. 17, n° 1, pp. 81-83, janvier 1998.

---



# La conjecture du soufflet

IAN STEWART

*Grâce à une formule qui donne le volume d'un polyèdre, on montre que les polyèdres flexibles ne changent pas de volume en se déformant.*

**T**out bricoleur qui a déjà assemblé quatre planches pour construire une bibliothèque sait que les rectangles ne sont pas rigides. En appuyant sur le bord d'une bibliothèque mal construite, on la déforme en un parallélogramme. En revanche, les triangles sont rigides : on ne peut changer leur forme sans modifier la longueur d'au moins un de leurs côtés. Le triangle est d'ailleurs le seul polygone rigide. Une bibliothèque de n'importe quelle autre forme – rectangle, pentagone, hexagone – doit être consolidée par ajout de traverses diagonales : le polygone initial est alors divisé en triangles rigides.

On peut aussi renforcer une bibliothèque en clouant un fond plat. Le problème entre ainsi dans la troisième dimension, où les choses deviennent bien plus intéressantes. Pendant près de 200 ans, les mathématiciens ont été étonnés par la rigidité des polyèdres, des solides fermés qui comportent un nombre fini de faces polygonales.

Encore récemment, on pensait que tous les polyèdres à faces triangulaires étaient rigides. Cette hypothèse était fautive : il existe des polyèdres flexibles dont la forme change sans que la forme des faces triangulaires soit modifiée. De surcroît, il y a quelques mois, des mathématiciens ont démontré la conjecture du soufflet, selon laquelle le volume d'un polyèdre flexible reste constante lorsque sa forme varie. Cette démonstration, fondée sur une ancienne formule grecque, ouvre un nouveau champ de recherche en géométrie.

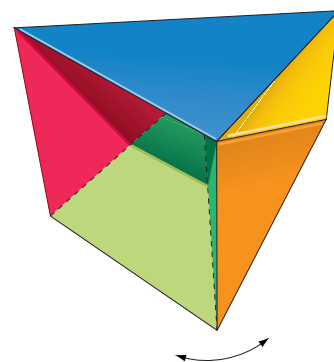
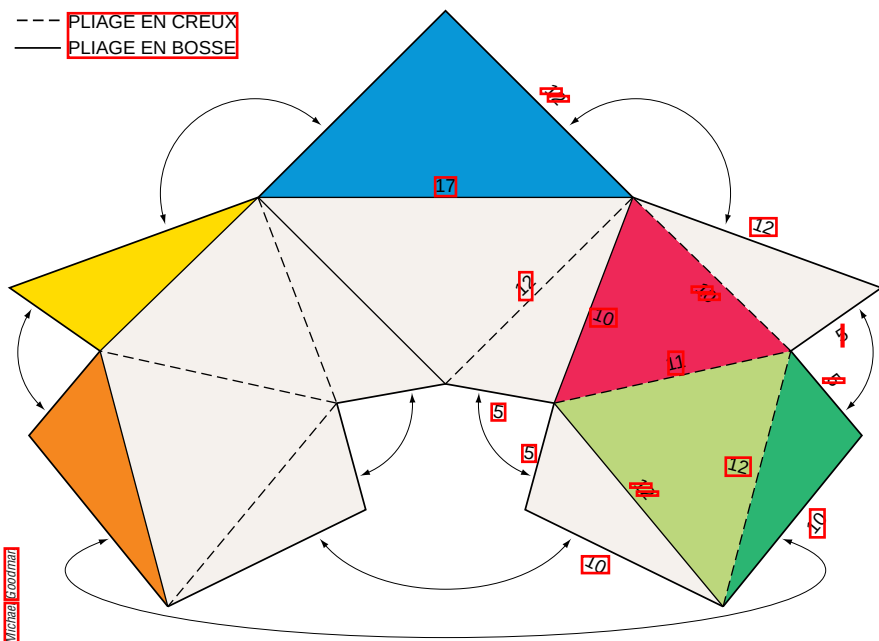
Par pliage d'une feuille de papier, on obtient une foule de formes flexibles, étudiées par les maîtres japonais de l'*origami* : des oiseaux qui battent des ailes, des grenouilles dont les pattes bougent, etc. Ces pliages sont-ils des exemples de polyèdres flexibles ? Non, car lorsque la grenouille en papier bouge ses pattes, le papier s'incurve légèrement. De même, on plie ou l'on déplie le soufflet d'un accordéon parce que les

faces qui le composent se courbent et s'étirent légèrement. En revanche, les faces d'un polyèdre flexible ne se déforment pas. Lorsqu'un polyèdre flexible se déforme, seuls les angles entre les faces adjacentes varient : les arêtes sont comme des charnières, tout le reste demeure parfaitement rigide.

L'étude des polyèdres flexibles commence en 1813, lorsque le mathématicien français Augustin-Louis Cauchy montre qu'un polyèdre convexe – c'est-à-dire dont la courbure est toujours dans le même sens, sans creux, ni bosses – n'est pas flexible. Qu'en est-il des polyèdres non convexes ? En 1897, l'ingénieur français Raoul Bricard découvre que les polyèdres non convexes sont flexibles si leurs faces peuvent s'interpénétrer. Les polyèdres de Bricard sont des objets abstraits, mais on peut s'en faire une idée à l'aide de tiges articulées avec lesquelles on matérialise leurs arêtes (par exemple, avec des pailles que l'on relie par une ficelle).

En 1977, le mathématicien canadien Robert Connelly modifie le polyèdre non convexe de Bricard de sorte qu'il

--- PLIAGE EN CREUX  
— PLIAGE EN BOSSE



Patron d'un polyèdre flexible (à gauche). Si vous le reproduisez sur une feuille de carton fin et si vous pliez comme indiqué par les pointillés, en collant des arêtes selon les flèches (une petite languette qui dépasse des arêtes vous aidera), vous obtiendrez un polyèdre flexible, dont les mouvements sont indiqués sur la perspective (ci-dessus).

demeure flexible, mais que les faces ne s'interpénètrent plus. Klaus Steffen, de l'Université de Düsseldorf, a simplifié cette construction et a construit un polyèdre flexible à neuf sommets et 14 faces triangulaires (voir la figure).

Si vous construisez cet objet, vous observerez que, quand certaines faces du polyèdre se rapprochent, d'autres s'éloignent, de sorte que le volume semble rester constant. Denis Sullivan, de l'Université de New York, a testé cette hypothèse en perçant un petit trou dans un polyèdre flexible et en le remplissant de fumée ; durant la flexion du polyèdre, aucune fumée ne s'en échappa. Cette expérience corroborait l'hypothèse du volume constant, mais elle ne la démontrait pas (l'hypothèse du volume constant est nommée conjecture du soufflet, car elle implique qu'un polyèdre flexible ne se comporte pas comme un soufflet, lequel change de volume comme il change de forme, inspirant et soufflant de l'air).

Dans le plan, l'analogue à deux dimensions de la conjecture du soufflet est faux : lorsque l'on déforme un polygone flexible, sa surface diminue (un rectangle s'aplatit en parallélogramme, puis en ligne, de surface nulle). Pourquoi un soufflet polyédrique ne peut-il exister dans l'espace tridimensionnel ?

Pour résoudre cette énigme, R. Connelly et deux autres mathématiciens – Idzhad Sabitov, de l'Université de Moscou, et Anke Walz, de l'Université Cornell – partirent d'une ancienne formule qui donne l'aire d'un triangle. Sans doute trouvée par Archimède, cette formule a été attribuée à Héron d'Alexandrie, un mathématicien grec du début de notre ère qui en a donné une démonstration. Cette formule relie l'aire  $x$  d'un triangle aux longueurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  de ses côtés (voir l'encadré). La relation entre ces valeurs est polynomiale, c'est-à-dire qu'interviennent uniquement des puissances entières de  $x$ , de  $a$ , de  $b$  et de  $c$ .

Une relation analogue relie-t-elle le volume d'un polyèdre quelconque aux longueurs de ses arêtes ? Pour quelques polyèdres particuliers, de telles relations sont connues : par exemple, le volume d'un cube ou d'un parallélogramme est égal au produit de la longueur par la largeur et par la profondeur ; pour le tétraèdre, un polyèdre à quatre faces triangulaires, une relation analogue est connue. Toutefois, personne n'avait jamais trouvé une formule générale qui donne le volume d'un polyèdre.

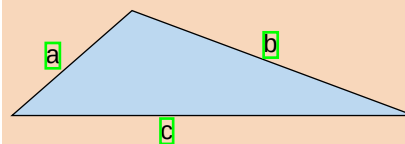
Supposons néanmoins qu'une telle formule existe. Dans ce cas, la conjecture du soufflet serait vérifiée, car le volume d'un polyèdre dépendrait seulement

des longueurs des arêtes. Lors de la flexion d'un polyèdre, les longueurs de ses arêtes sont inchangées et son volume serait donc constant. Ce raisonnement possède cependant une faille : une équation polynomiale peut avoir plusieurs solutions distinctes, de sorte qu'en théorie le volume pourrait «sauter» d'une valeur à une autre. En fait, une variation discontinue du volume ne peut pas se produire dans le monde physique : comme la flexion est continue, le volume ne peut changer subitement de valeur, de sorte qu'il doit rester constant.

Comment trouver la formule du volume ? Les mathématiciens ont commencé leur démonstration en modifiant la formule du volume d'un tétraèdre, qui est similaire à la formule de Héron. De la même façon que, dans le plan, tout polygone peut être divisé en triangles, dans l'espace, tout polyèdre peut être divisé en tétraèdres : le volume du polyèdre est alors la somme des volumes des tétraèdres constitutifs. Cette méthode ne suffit pas à résoudre le problème : elle conduit seulement à la formule qui relie les arêtes de tous les tétraèdres constitutifs. Or, plusieurs de ces arêtes ne sont pas des arêtes du polyèdre initial, mais des diagonales qui relient un sommet du polyèdre à un autre, et leur longueur peut changer lors de la flexion. Les mathématiciens ont dû travailler algébriquement leur relation pour se débarrasser de ces longueurs variables.

Ce processus laborieux aboutit en 1996 : I. Sabitov construisit un algorithme qui permet de trouver le volume de n'im-

## La formule d'Héron



Nommons  $a$ ,  $b$  et  $c$  les longueurs des côtés d'un triangle,  $x$ , son volume, et  $p$ , la moitié de son périmètre, soit :

$$p = (a+b+c)/2.$$

On a alors :

$$x = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}.$$

Lorsqu'on élève cette équation au carré, on obtient la formule de Héron :

$$16x^2 + a^4 + b^4 + c^4 - 2a^2b^2 - 2a^2c^2 - 2b^2c^2 = 0.$$

porte quel polyèdre. Puis, en 1997, l'équipe de trois mathématiciens simplifia considérablement cet algorithme. Pour un octaèdre – un solide à huit faces triangulaires –, la formule est une équation polynomiale qui contient le volume élevé à la puissance 16. Pour des polyèdres plus compliqués, les puissances sont encore supérieures.

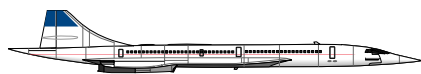
L'existence d'une relation polynomiale pour n'importe quel polyèdre est étonnante, car, dans le plan, il n'existe pas d'équivalent de la formule de Héron qui s'appliquerait à tous les polygones. R. Connelly et I. Sabitov pensent savoir prouver la conjecture du soufflet dans un espace à quatre dimensions, mais pas à cinq dimensions. Et là, il n'est plus question de plier du papier pour se faire une idée des résultats !

## RÉACTIONS

En réponse à l'article *Us et charmes des dés* (voir *Pour la Science*, mars 1998), plusieurs lecteurs m'ont indiqué d'autres ensembles de dés non transitifs. Le dé A est marqué 3, 3, 4, 4, 8, 8 ; le dé B, 1, 1, 5, 5, 9, 9 ; et le dé C, 6, 6, 7, 7, 2, 2. En moyenne, le dé B bat A cinq fois sur neuf, C bat B cinq fois sur neuf et A bat C cinq fois sur neuf. George Trepal, de Floride, fait remarquer que ces nombres arrangés correctement forment les colonnes d'un carré magique (voir ci-dessous), où la somme des nombres de chaque ligne ou de chaque colonne est égale à 15. De surcroît, si l'on utilise les nombres des lignes pour former les faces des dés, l'ensemble de dés obtenus – A (8, 8, 1, 1, 6, 6) ; B (3, 3, 5, 5, 7, 7) ; et C (4, 4, 9, 9, 2, 2) – est également non transitif : A bat B, B bat C et C bat A, avec des probabilités égales à 5/9. Des ensembles de dés similaires, construits à partir de carrés magiques plus grands, semblent ne pas avoir cette propriété de non-transitivité. Cette proposition peut-elle être montrée ou infirmée ?

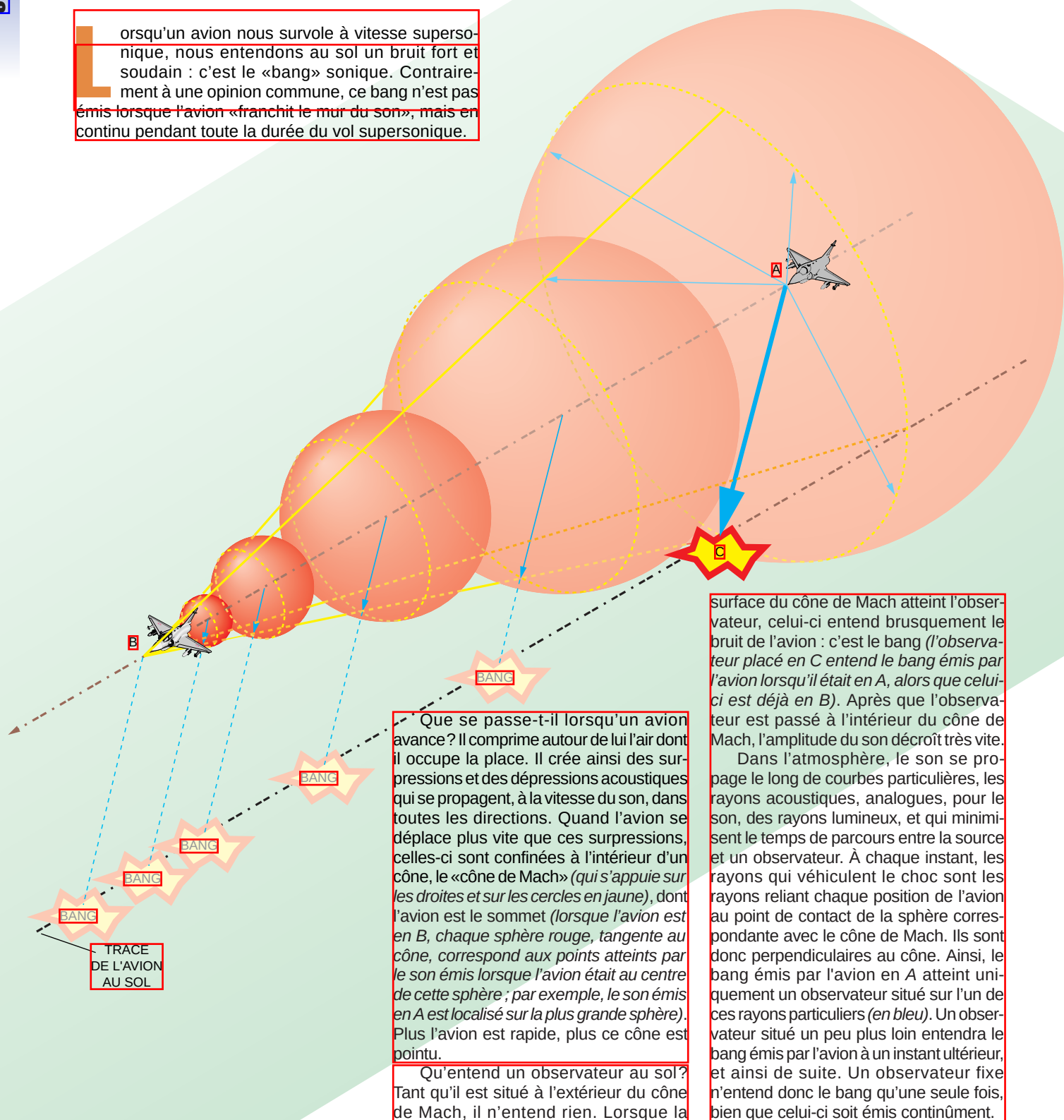
Le meilleur ensemble de dés non transitifs proposé par G. Trepal, c'est-à-dire celui qui utilise les nombres les plus petits, a des faces marquées de la façon suivante : A (1, 1, 4, 4, 4, 4) ; B (3, 3, 3, 3, 3, 3) ; et C (2, 2, 2, 2, 5, 5). Dans ce cas, A bat B avec une probabilité 6/9, B bat C avec une probabilité 6/9 et C bat A avec une probabilité 5/9.

|   |   |   |
|---|---|---|
| 8 | 1 | 6 |
| 3 | 5 | 7 |
| 4 | 9 | 2 |



# Le bang sonique

**L**orsqu'un avion nous survole à vitesse supersonique, nous entendons au sol un bruit fort et soudain : c'est le «bang» sonique. Contrairement à une opinion commune, ce bang n'est pas émis lorsque l'avion «franchit le mur du son», mais en continu pendant toute la durée du vol supersonique.



Que se passe-t-il lorsqu'un avion avance ? Il comprime autour de lui l'air dont il occupe la place. Il crée ainsi des surpressions et des dépressions acoustiques qui se propagent, à la vitesse du son, dans toutes les directions. Quand l'avion se déplace plus vite que ces surpressions, celles-ci sont confinées à l'intérieur d'un cône, le «cône de Mach» (qui s'appuie sur les droites et sur les cercles en jaune), dont l'avion est le sommet (lorsque l'avion est en B, chaque sphère rouge, tangente au cône, correspond aux points atteints par le son émis lorsque l'avion était au centre de cette sphère ; par exemple, le son émis en A est localisé sur la plus grande sphère). Plus l'avion est rapide, plus ce cône est pointu.

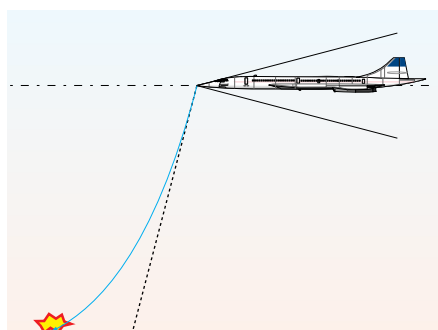
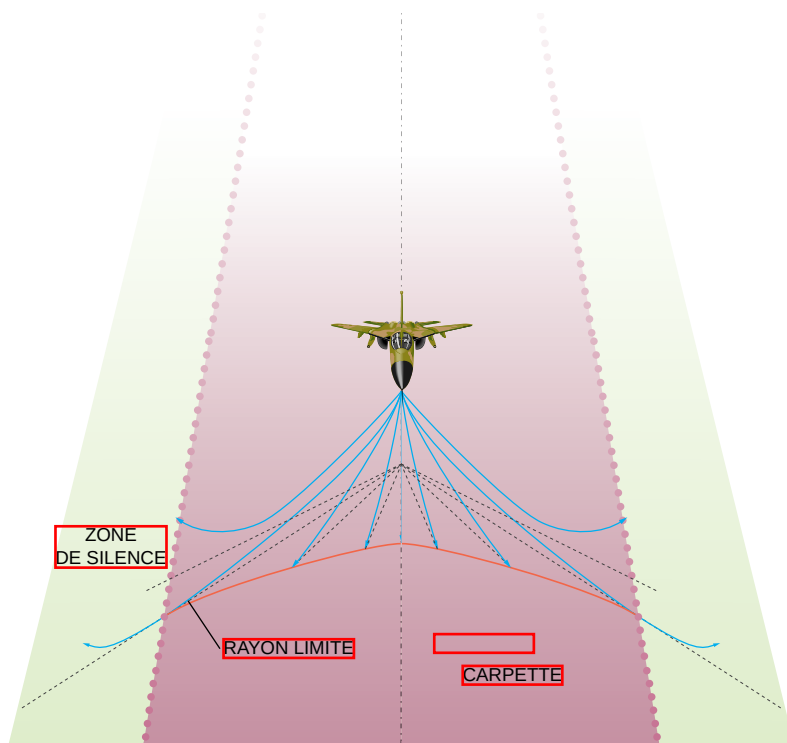
Qu'entend un observateur au sol ? Tant qu'il est situé à l'extérieur du cône de Mach, il n'entend rien. Lorsque la

surface du cône de Mach atteint l'observateur, celui-ci entend brusquement le bruit de l'avion : c'est le bang (l'observateur placé en C entend le bang émis par l'avion lorsqu'il était en A, alors que celui-ci est déjà en B). Après que l'observateur est passé à l'intérieur du cône de Mach, l'amplitude du son décroît très vite.

Dans l'atmosphère, le son se propage le long de courbes particulières, les rayons acoustiques, analogues, pour le son, des rayons lumineux, et qui minimisent le temps de parcours entre la source et un observateur. À chaque instant, les rayons qui véhiculent le choc sont les rayons reliant chaque position de l'avion au point de contact de la sphère correspondante avec le cône de Mach. Ils sont donc perpendiculaires au cône. Ainsi, le bang émis par l'avion en A atteint uniquement un observateur situé sur l'un de ces rayons particuliers (en bleu). Un observateur situé un peu plus loin entendra le bang émis par l'avion à un instant ultérieur, et ainsi de suite. Un observateur fixe n'entend donc le bang qu'une seule fois, bien que celui-ci soit émis continûment.

Où entend-on le bang? Si l'atmosphère était homogène, les rayons acoustiques seraient des droites, et le bang atteindrait tous les points du sol, atténué seulement par la distance. Toutefois, la température varie avec l'altitude : de 15 °C au sol à -56,5 °C environ à 11 kilomètres d'altitude pour l'atmosphère standard utilisée en aéronautique. Comme la vitesse du son dépend de la température, elle décroît aussi, de 340 mètres par seconde au sol à 295 mètres par seconde à 11 kilomètres d'altitude. À mesure qu'ils se rapprochent du sol, les rayons acoustiques issus de l'avion sont donc déviés vers le haut (*ci-dessous*) : c'est la réfraction atmosphérique, analogue au mirage optique. Le vent contribue aussi à la déformation des rayons acoustiques.

Si l'avion vole juste un peu au-dessus de la vitesse du son (à moins de 1,15



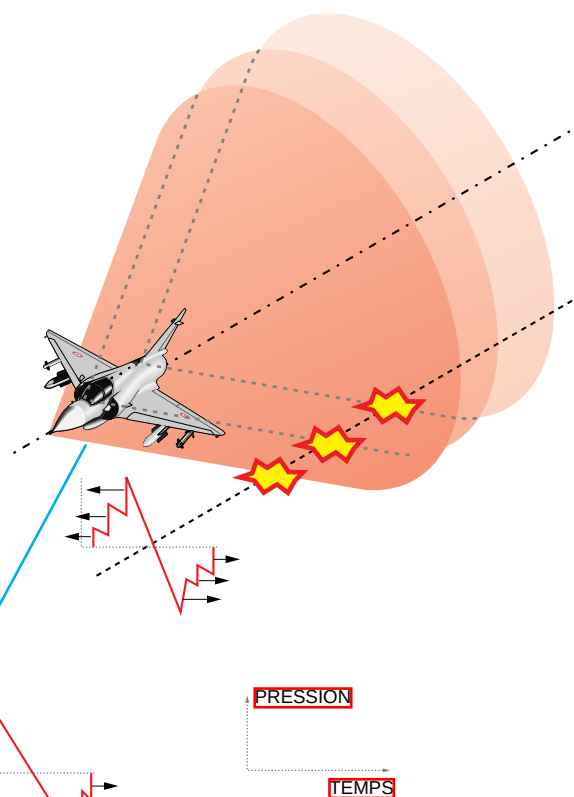
fois la vitesse du son pour l'atmosphère standard), le cône de Mach est très ouvert. Les rayons acoustiques partent presque à l'horizontale, se retournent avant de toucher le sol et remontent vers la haute atmosphère : le bang n'est pas entendu au sol. Pour une vitesse supérieure, les rayons émis dans le plan défini par la trajectoire de l'avion et la verticale touchent le sol (*en haut, à droite*). Les rayons émis latéralement sont d'autant plus déviés qu'ils partent proches de l'horizontale (*ils touchent le sol sur la ligne rouge, intersection du cône de Mach, déformé par la propagation atmosphérique, avec le sol*). Il existe ainsi un rayon limite qui se retourne juste au moment de toucher le sol. Son point de contact avec le sol (*en violet*) sépare deux zones : la «carpette», où l'on entend le bang, et la zone de silence (*en vert*). Selon cette description géométrique, le bruit est nul dans la zone de silence. En réalité, le bruit n'est pas complètement nul, mais il décroît rapidement quand on s'éloigne du bord de la carpette. Pour un avion volant à deux fois la vitesse du son et à 15 kilomètres d'altitude, la carpette est large d'environ 85 kilomètres.

Si l'avion était un point, il émettrait un son très court, localisé exactement sur

la surface du cône de Mach, qui définirait l'onde de choc suscitée par le mouvement supersonique. En réalité, l'avion occupe un certain volume. Chaque variation de sa géométrie (nez, sections du fuselage, bords d'attaque et de fuite des ailes, réacteurs...) produit son propre cône de Mach (*en bas, à droite*). L'onde de choc associée est d'autant plus forte que l'accident dans la géométrie est plus important. De façon analogue, les forces exercées par la voilure sur l'air en réaction à la portance contribuent elles aussi au bang. Au fur et à mesure du passage des cônes de Mach successifs, un observateur à proximité de l'avion entendrait donc plusieurs bangs, associés à chacun des détails de la géométrie.

Pourquoi n'entend-on qu'un seul bang au sol? La vitesse du son varie avec la température, nous l'avons vu. Or, localement, le passage de l'onde acoustique modifie la température de l'air, donc la vitesse du son : une surpression acoustique réchauffe faiblement l'air et accélère le son ; au contraire, une détente se propage un peu moins vite. Les différentes ondes de choc présentes dans le signal (*en rouge*) se propagent donc à des vitesses légèrement différentes (*flèches noires*). Sur de grandes distances de propagation (ici plusieurs dizaines de kilomètres), les ondes de choc les plus intenses rattrapent les plus faibles et fusionnent avec elles, si bien que, au sol, le signal acoustique ne présente plus en général que deux chocs, un à l'avant du signal et un à l'arrière. Le signal de pression acoustique en fonction du temps présente une forme caractéristique

en N. C'est le choc avant, brusque variation de pression, qui produit la sensation auditive de bang. Suivant son intensité et le temps qui le sépare du choc arrière, on entend éventuellement ce dernier, et on parle alors de «double bang».



François COULOUVRAT, Laboratoire de modélisation en mécanique, CNRS et Université Paris 6.



# Entomologie

## Les insectes associés aux peupliers

Sous la direction d'André Delplanque. Éditions Mémor, 1998.

**O**n ne présente pas le peuplier : nous connaissons tous ces arbres du genre *Populus*, dont l'aire naturelle de répartition se situe dans la zone tempérée de l'hémisphère Nord. Ce sont généralement des arbres à croissance rapide, qui poussent principalement dans les sols bien alimentés en eau. Leur culture, très importante en Europe de l'Ouest, se justifie par les nombreuses utilisations de leur bois (contre-plaqué, emballage, charpente, allumettes, pâte à papier...) et par leur emploi dans le paysage (rideaux de verdure, bords de route, parcs...).

Avec une surface plantée en peupliers qui atteint environ 250 000 hectares, avec une production de bois de peuplier qui atteint en France 3,4 millions de mètres cubes, supérieure à celle du chêne (3,1 millions de mètres cubes) et du hêtre (2,3 millions de mètres cubes), un pays tel que le nôtre peut craindre les maladies et les ravageurs.

En effet, du fait de l'ancienneté de ce peuplement dans nos régions, on observe une grande richesse de l'entomofaune. Plus d'une centaine d'insectes ont été signalés, dont certaines vivent aussi sur les saules qui appartiennent à la même famille botanique. Ainsi s'établissent des relations particulières entre des organismes animaux nombreux et l'arbre qui, bénéficiant d'une grande longévité, peut

élaborer un système de défense (chimique, chute des feuilles...). Sur le plan écologique, à la diversité des habitats s'ajoute la diversité des modes de vie. Chaque espèce est spécialisée dans la consommation d'une partie spécifique : le feuillage, les méristèmes (bourgeon, cambium), les racines, la sève, les fruits et les graines, l'écorce, le bois (vivant ou décomposé), etc. En utilisant un ordre systématique, les auteurs de ce livre ont cherché à établir un inventaire complet des espèces rencontrées, en insistant sur celles qui présentent un intérêt économique.

C'est ainsi qu'ils présentent aussi bien des espèces nuisibles que des ennemis de ces espèces. D'un côté, les arbres sont attaqués par des coléoptères, tels que les buprestes *Agrilus suvorovi*, des cérambycides *Compsidia populnea* et *Anaerea carcharias* ; des lépidoptères *Sesia apiformis*, *Paranthrene tabaniformis* ou *Gypsonoma aceriana* ; des diptères, tel *Phytobia cambii* ; des hyménoptères, tels *Trichiocampus viminalis* et *Nematus melanaspis* ; des hémiptères. De l'autre, ces ravageurs ont des prédateurs, tels les coccinelles, les carabes, les staphylins, les fourmis, les punaises... ou des parasitoïdes (divers diptères et hyménoptères).

Comment lutter ? La lutte doit être fondée sur une bonne connaissance du ravageur et de sa nocivité. Des mesures prophylactiques (contre le stress hydrique et pédologique) limitent l'extension des ravageurs en rendant la plante moins vulnérable. Elles sont complétées par des mesures chimiques ou biologiques, avec un volet préventif (piégeages sexuels et alimentaires, qui limitent les populations d'adultes soit en déterminant les périodes d'activité et, partant, les dates de traitement, soit par autodestruction) et un volet

curatif. Dans l'ouvrage qui nous arrive aujourd'hui, un tableau indique les périodes de traitements et les produits homologués.

Un cahier de 460 photographies en couleurs, consacré aux déprédateurs et à leurs dégâts, termine cet ouvrage réalisé par A. Delplanque avec le concours de 26 auteurs. C'est, après le livre de C. Chararas (publié en 1972) la nouvelle référence sur ce sujet. À l'usage principal de ceux qui cultivent les peupliers.

Jacques d'AGUILAR

# Paléontologie

## La fin tragique des dinosaures

Walter Alvarez. Éditions Hachette, 1998.

**E**n juin 1980 paraissait dans la revue *Science* un article qui restera sans doute dans les annales comme l'un des plus importants de la littérature scientifique du <sup>xx</sup>e siècle : le physicien Luis Alvarez, son fils géologue Walter Alvarez et les chimistes Frank Asaro et Helen Michel, de l'Université de Berkeley, y avançaient une hypothèse aujourd'hui bien connue, même du grand public, mais qui, à l'époque, fit sensation, voire scandale, dans les milieux scientifiques. Les quatre scientifiques proposaient que l'extinction des dinosaures, tout comme celle de nombreux animaux qui leur étaient contemporains, à la fin du Crétacé (-65 millions d'années), était due à la collision avec la Terre d'un gros astéroïde, d'une dizaine de kilomètres de diamètre.

Dans l'excellent livre qu'il publie aujourd'hui, W. Alvarez raconte brillamment les étapes de la découverte des anomalies géochimiques et minéralogiques qui marquent la limite Crétacé-Tertiaire et le cheminement intellectuel par lequel son groupe en vint à proposer l'hypothèse de l'impact. Il relate aussi la suite des événements, les âpres débats que suscita l'hypothèse et, surtout, la longue recherche du point d'impact, qui eut pour résultat, au début des années 1990, la mise en évidence de l'énorme cratère météoritique de Chicxulub, dans la péninsule du Yucatán, au Mexique.

Ce n'est certes pas le premier livre qui soit consacré à cette extraordinaire aventure intellectuelle, qui constitue certainement l'une de ces révolutions scientifiques décrites par Thomas Kuhn : le terme n'est pas exagéré, car elle a donné une inflexion nouvelle au développement des sciences



JACQUES DELPLANQUE

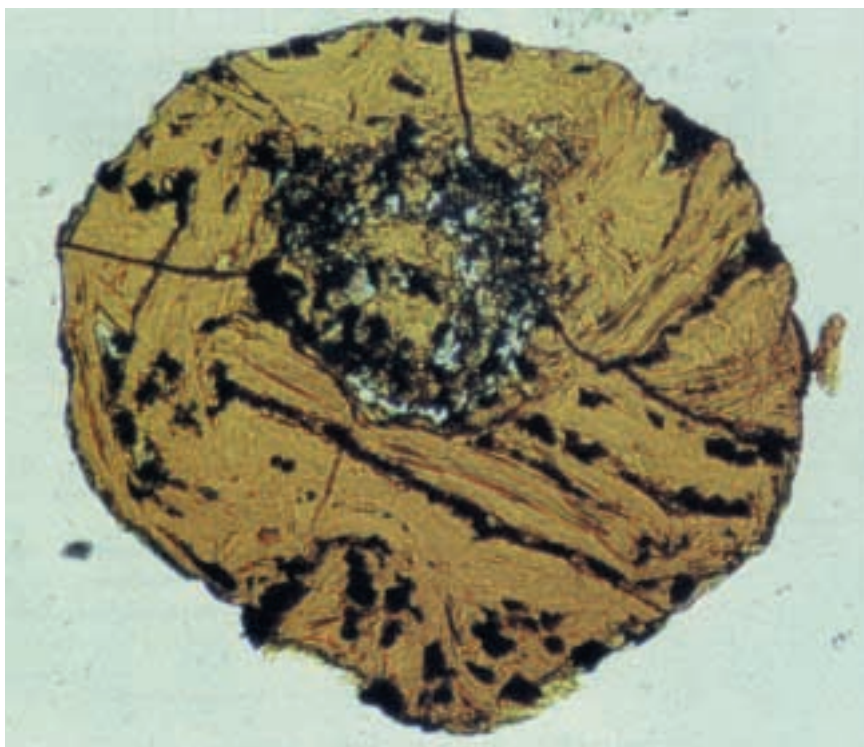
Une guêpe ? Non, cet insecte qui ravage les peupliers est un papillon à aspect de guêpe. La chenille du lépidoptère Sésiidé *Paranthrene synagriformis* creuse une galerie dans les tiges et provoque des nodosités. C'est une espèce plus méridionale que la petite sésie du peuplier, communément répandue.

de la Terre et de l'évolution. Ce qui fait l'intérêt de l'ouvrage, ce n'est d'ailleurs pas seulement qu'il ait été rédigé par un des acteurs principaux de cette révolution ; c'est aussi qu'il soit fort bien écrit et remarquablement documenté : sa riche bibliographie est un excellent point de départ pour qui veut se lancer à l'assaut de la montagne de publications scientifiques parues sur le sujet depuis 1980. Un des aspects agréables du livre est son ton serein, fort éloigné de celui des polémiques qui ont suivi la publication de l'hypothèse de la météorite : certains ouvrages écrits par des détracteurs de cette hypothèse montrent une amertume et une agressivité étonnantes (il est vrai que L. Alvarez eut souvent la dent dure vis-à-vis de ses adversaires).

Ici, rien de tel ; on constate avec plaisir que W. Alvarez sait rendre à César ce qui lui est dû, par exemple lorsqu'il admet que le géologue néerlandais Jan Smit doit être considéré comme le codécouvreur de la preuve de l'impact, pour avoir détecté indépendamment la présence d'iridium dans la couche d'argile de la limite Crétacé-Tertiaire. On regrettera seulement que les travaux d'Éric Robin et de Robert Rocchia sur les magnétites nickélifères de la limite Crétacé-Tertiaire, qui sont sans doute les preuves les plus démonstratives de l'impact d'un objet extraterrestre, ne soient mentionnés qu'en bibliographie.

L'agréable sérénité de W. Alvarez tient sans doute au fait qu'il est aujourd'hui pleinement convaincu de la justesse de l'hypothèse proposée en 1980, même s'il ne dissimule pas l'existence de collègues réfractaires. Et les faits, de la découverte de l'anomalie d'iridium à celle du cratère de Chicxulub, tels qu'ils sont exposés dans ce livre, ne laissent en effet guère de doute. Certes des oppositions demeurent, mais, comme l'a souvent remarqué R. Rocchia, les sceptiques ont souvent rendu de grands services aux partisans de l'impact, les obligeant à chercher (et à trouver) de nouvelles preuves, à affiner leurs explications des phénomènes observés. Cela n'est, en soi, que le débat scientifique tel qu'il doit être, qui demeure la meilleure (et en fait la seule) façon de faire avancer les choses.

Le livre de W. Alvarez ne convaincra hélas pas ceux qui campent sur leurs positions, sur la base d'arguments dépassés ou par méconnaissance des derniers progrès en la matière. Pour ceux qui, au contraire, se sont ralliés, plus ou moins aisément, aux thèses néocatastrophistes, il constituera une excellente mise au point sur une question dont l'étude a bouleversé notre histoire de la Terre et des êtres vivants. Pour les néophytes en la matière, cet ouvrage sera une remarquable intro-



Des sphérules basaltiques ont été découvertes en plusieurs endroits sur Terre ; elles sont incluses dans les argiles de la limite Crétacé-Tertiaire. Ces sphérules, dont les caractéristiques chimiques se sont modifiées au cours du temps, étaient initialement des particules de sous-sol océanique fondu qui ont été dispersées un peu partout à la surface de la planète par le choc d'impact survenu au Crétacé.

duction à l'une des grandes découvertes scientifiques de notre temps. Il faut souhaiter un beau succès à ce livre, ce qui devrait être facilité par son style simple et clair, et l'humour dont l'auteur sait faire preuve, à commencer par le titre parodique (*Tyrannosaurus rex and the Crater of Doom* dans l'édition originale), que le traducteur a fort bien su rendre.

Eric BUFFETAUT

## Agronomie

### Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Biogéochimie et écologie des eaux continentales et littorales

François Ramade, ÉdisScience international, 1998, 786 pages.

Les «sciences de l'eau» ont donc leur dictionnaire encyclopédique, rédigé par un généraliste, comme aime à se qualifier son auteur, François Ramade : un généraliste au savoir et aux

convictions régulièrement développés dans des ouvrages de qualité.

«Les» sciences et non «la» science de l'eau ? Ce pluriel reflète une réalité qui, elle-même, pose problème. Des sciences de la terre aux sciences humaines, en passant par les sciences de la vie, peu de disciplines ignorent l'eau : il existe une physique et une chimie de l'eau, de même qu'il existe une biologie, une économie, une sociologie, un droit de l'eau. D'où une fragmentation des connaissances peu propice à relever deux grands défis du siècle à venir : l'épuisement et la dégradation des ressources en eau. Nous savons aujourd'hui que l'eau s'épuise et se dégrade sur l'ensemble de la planète, menaçant des équilibres fragiles et complexes dans des domaines aussi variés que la santé, l'agriculture ou la géopolitique. Comment lutter, sinon en s'appuyant sur une connaissance suffisamment intégrée des eaux continentales ? Cette connaissance existe, à la fois théorique et appliquée, mais elle se développe au sein d'une discipline méconnue : la limnologie, c'est-à-dire l'étude des eaux continentales.

A cet égard, le dictionnaire proposé révèle la méconnaissance où s'enfonc la limnologie depuis quelques années. Certes, il fait référence aux travaux des limnologues français et tire nombre de ses exemples de la récente *Limnologie générale* éditée par Michel Meybeck et



Les rivières modèlent le paysage ainsi que le tissu humain des régions. La limnologie étudie leur impact régional, ainsi que les faunes et les flores qu'elles abritent.

Roger Pourriot (Éditions Masson, 1995). Certes, entre «limnologue» et «*Limnomedusae*», il définit la «limnologie», mais dans une rubrique si brève qu'il est possible de la reproduire ici : «limnologie, n.f. (*limnology*). Science dont l'objet est l'étude de l'écologie des lacs et de façon plus générale des eaux continentales». Cette concision conduit à s'interroger sur la place de la limnologie. D'où vient cette discipline ? Quelles sont ses forces et ses faiblesses ? Quelle est son utilité et son avenir ?

La limnologie est l'une des plus anciennes disciplines consacrées à l'étude des eaux continentales : lacs, rivières, ruisseaux, réservoirs, mares, zones humides, etc. Elle se reconnaît un ouvrage fondateur : *Le Léman*, monographie limnologique publiée par le Suisse F. A. Forel entre 1892 et 1904 (Éditions F. Rouge). Ses origines remontent aux premiers écrits de Forel en 1871 et à la publication, en 1887, d'un article où l'Américain S.A. Forbes, assimilant les lacs à des microcosmes, jetait les bases d'une analyse écosystémique avant l'heure. Dès 1891 étaient ouvertes les premières stations de recherche sur les lacs, à Plön, en Allemagne, et à Glubkoje, en Russie.

L'année 1922 marque un nouveau départ pour la limnologie, avec la création de la *Societas internationalis limnologiae* (SIL) par l'Allemand August Thienemann, professeur associé d'hydrobiologie à l'Université de Kiel, et par le Suédois Einar Nauman, professeur assistant de botanique et de limnologie à l'Université de Lund. Le congrès fondateur de Kiel fixait trois objectifs majeurs à la nouvelle association : d'abord, rassembler les limnologues de tous les pays dans un

ensemble «international ou mieux supranational» ; ensuite, réunir les «aspects théoriques et appliqués» de la recherche sur les eaux continentales ; enfin, rapprocher les limnologues du «domaine hydrographique» de ceux du «domaine biologique». La SIL tient congrès tous les quatre ans et, en 75 ans d'existence, a puissamment contribué au développement des recherches sur les eaux continentales.

La force de la limnologie est d'assimiler les eaux continentales à des systèmes écologiques et d'examiner ces systèmes sous les angles les plus variés : productivité biologique, biogéochimie, interactions terre-eau, dynamique physique, structure et fonctionnement des communautés vivantes. D'où son adéquation aux questions actuelles de protection des eaux continentales : c'est la limnologie qui explique les mécanismes de l'eutrophisation des eaux et de leur acidification, ou ceux de la production piscicole des lacs et des rivières ; c'est elle qui indique comment se structurent les communautés des lacs et des rivières, d'où provient la matière organique des eaux douces et comment elle se transforme, en quoi l'accroissement du rayonnement ultraviolet modifie les processus microbiologiques...

Ces connaissances sont les bases indispensables à la protection et à la restauration des milieux aquatiques. Et les succès promis n'ont pas manqué : la restauration des lacs de Zurich et d'Annecy, le sauvetage du lac Washington, le retour des migrateurs dans la Tamise, ainsi que dans le Rhin... Le recours aux approches intégrées de type limnologique est de plus en plus nécessaire. En France, le phénomène d'eutrophisation touche

toujours de nombreux cours d'eau, particulièrement l'aval de la Seine et de la Loire, les rivières de Bretagne et celles du bassin du Nord. De même, les pesticides et les nitrates d'origine agricole menacent partout l'intégrité des eaux souterraines.

En conséquence, le Commissariat du Plan note, dans un rapport récent, que, «pour améliorer la qualité des eaux et des milieux, il faut bien connaître leur état et leur fonctionnement». Toutefois, pour bien connaître ces milieux, il faut qu'existent des limnologues, identifiés comme tels, dans le monde universitaire et de la recherche. Où formera-t-on ces limnologues dans l'avenir ? Où exerceront-ils leurs talents ? Méconnaissant la limnologie, notre pays risque de perdre le bénéfice de plusieurs années d'efforts qui le placent encore aux premiers rangs de ceux qui sont capables d'assurer une formation supérieure et une recherche de pointe dans le domaine des eaux continentales.

En matière d'eaux continentales, les problèmes présents et à venir, actuellement connus ou inconnus, ne trouveront jamais que des solutions partielles de la part de chacune des sciences de l'eau. Seule l'intégration de ces sciences apportera des solutions globales et adaptées. La limnologie donne le cadre, la logique et la perspective nécessaires à cette intégration. Aux limnologues, en complémentarité et non en concurrence avec les spécialistes d'autres disciplines telles que l'hydrologie, d'en convaincre les décideurs de notre pays. Alors verrons-nous accorder à la limnologie la place qui lui revient dans les programmes d'enseignement, de recherche et d'aménagement... Ainsi que dans les dictionnaires.

Henri DÉCAMPS

## Médecine

### La guerre du tabac

Michel de Pracontal. Éditions Fayard, 1998.

Le livre de Michel de Pracontal est très intelligent, ce qui ne surprend pas, mais il défend une thèse. Pour lui, on exagère les méfaits du tabagisme actif et passif, ainsi que l'influence de la publicité sur les jeunes. Sa parution, une semaine avant le vote du Parlement européen sur l'interdiction de la publicité pour le tabac, ne peut être le fait du hasard ; elle avait sans doute pour but de donner

aux parlementaires un point de vue différent de celui des médecins.

Le chapitre 6, intitulé «Le marché de la peur», est une analyse très fine du risque de la société moderne ; il est d'une très grande qualité, et de grands spécialistes du risque ne le désavoueraient pas. Avec une connaissance approfondie de ce sujet, l'auteur analyse les mécanismes qui conduisent «la civilisation la plus riche, la mieux protégée, à être en passe de devenir la plus effrayée». Ce chapitre conclut que la méfiance générale vis-à-vis des objets qui nous entourent semble traduire plus un phénomène social et culturel qu'une réalité objective. Il est dommage que la fin de ce chapitre fasse comprendre que ses 63 pages ont pour objet de montrer que, dans le monde contemporain, la peur de la cigarette est excessive, comme le sont d'autres peurs. Ce n'est, hélas, pas le cas. Si certains dangers sont amplifiés et inspirent bien des craintes hors de proportion avec le risque réel, la cigarette n'est pas un petit risque négligeable ; c'est le risque majeur pour la santé dans notre société : le tabac est responsable du tiers des cancers chez l'homme. Cela ne signifie pas qu'il faille l'interdire (la prohibition est toujours mauvaise), mais explique qu'il soit nécessaire d'empêcher qu'une publicité insidieuse, en créant des associations d'idées inconscientes, mais puissantes, amène les plus faibles à ne pas résister à l'attrait du tabac, tout en connaissant les risques qu'il fait courir.

Il est naturel que, dans l'optique de ce livre, où les adversaires du tabac sont fustigés pour leur intolérance et où les risques du tabac sont relativisés et minimisés, l'influence de la publicité sur le comportement des jeunes soit mise en doute, alors que de nombreuses études récentes l'attestent. De plus, si les travaux les plus récents sont analysés avec acuité dans le chapitre «Le marché de la peur», les chapitres sur les effets du tabac sont un peu partiels et reprennent des critiques qui ont été faites par les avocats du tabac sans tenir compte des réponses qui ont été rendues et des travaux les plus récents. Prenons l'exemple des cancers des voies aéro-digestives supérieures, qui surviennent généralement chez des individus qui sont fumeurs et buveurs. M. de Pracontal déclare qu'on ne peut pas les compter deux fois, chez les fumeurs et chez les buveurs. Certes, et cette difficulté n'a pas échappé à M. Doll et à M. Peto, deux des plus illustres statisticiens. La méthode qu'ils utilisent et qui semble avoir échappé à l'auteur est de calculer, en tenant compte des consommations respectives d'alcool et de tabac, les pourcentages de ces cancers qui sont attribuables à l'alcool et au tabac. Le fait

qu'il existe une synergie entre l'alcool et le tabac aggrave, certes, les effets du tabac, mais ne diminue en rien la part de responsabilité de ce dernier. De même, l'alcool au volant et la vitesse conjuguent leur effet sur les accidents de la route, mais le fait qu'un homme ivre ait roulé vite au moment d'un accident n'innocente pas l'alcool, et l'on peut calculer de combien, à vitesse égale, le risque d'accident est augmenté en fonction du taux d'alcoolémie du conducteur.

Considérons aussi le chapitre sur le tabagisme passif, intitulé «L'arme fatale», puisque, en effet, c'est la découverte des effets du tabagisme passif qui a eu, aux États-Unis, le plus grand retentissement sur l'opinion publique (alors qu'elle n'a eu que peu d'influence en France : il suffit d'aller dans un restaurant pour le constater). Dans ce domaine, où les connaissances s'accroissent rapidement, M. de Pracontal en reste au rapport de l'Agence américaine de protection de l'environnement de 1992 et à la critique qu'en a faite Peter Lee, un statisticien britannique consultant de l'industrie du tabac, comme le rappelle M. de Pracontal. Pas un mot sur les nombreux travaux récents qui ont pourtant répondu point par point aux objections de P. Lee : pas de mention du rapport de l'Académie de médecine sur ce sujet, publié en mai 1997, ni du numéro du *British Medical Journal* d'octobre 1997, ni des rapports européens parus depuis. L'auteur mentionne le rapport du Centre international de recherche sur le cancer, en indiquant que l'article n'est pas encore publié, ce qui est exact, mais il suggère que l'article n'a pas été écrit ou que sa publication a été refusée par un grand journal. Ce n'est heureusement pas le cas : il est sous presse, et un journaliste du poids de M. de Pracontal n'aurait eu qu'à décrocher son téléphone pour l'apprendre de la bouche des auteurs qu'il connaît. D'ailleurs, un résumé du futur article a paru depuis janvier 1998, comme le dit M. de Pracontal, et l'essentiel s'y trouve. Ce chapitre laisse donc l'impression soit d'une certaine partialité, soit d'une absence de mise à jour dans ce domaine pourtant crucial.

Le livre est, par ailleurs, bien écrit, plein d'anecdotes. Les fumeurs qui sont à la recherche d'un soutien y trouveront des raisons psychologiques de persévérer dans leurs habitudes ; mais, de façon surprenante, l'auteur semble parfois plus au courant de ce qui se passe aux États-Unis que de la situation française, tant sur le plan des travaux scientifiques que sur celui des réactions psychologiques des Français devant la cigarette. C'est dommage, car certains passages du livre faisaient naître beaucoup d'attente.

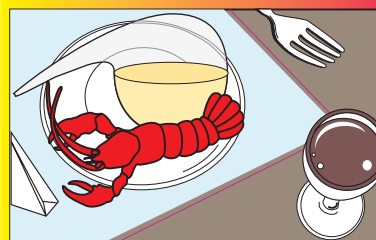
Maurice TUBIANA

## 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 27 août 1998.

FRANCE

info

# POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06  
Tél : 01-55-42-84-00  
<http://www.pourlascience.com>

**POUR LA SCIENCE** Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Hélène Maurey, Philippe Pajot (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Patricia Arecchi, G. Balmino, Michel Brune, Philippe Chevalier, Bettina Debû, Paul Decaix, Laurent Dugué, Évelyne Host-Platret, Jean-Marc Huré, Christian Jeanmougin, Alain Lecavelier, Claude Olivier, Jacques Paul, Guy Paulus.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, Anthony Degutis.

## PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06  
Tél. : 01 55 42 84 28.  
Téléc : LIBELIN 202978F.  
Télécopieur : 01 43 25 18 29

**Étranger** : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

## SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

## SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

## DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

### POUR LA SCIENCE

**Canada** : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

**Suisse** : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

**Autres pays** : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

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

## © Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 90A et 90B.

# Images

## On the Surface of Things

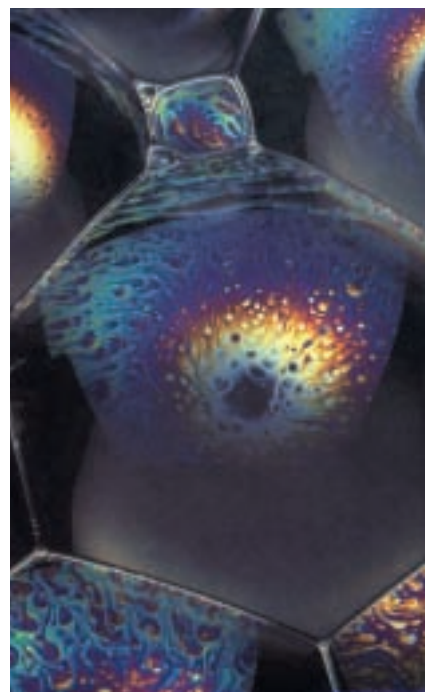
Felice Frankel et George Whiteside.  
Chronicle Books, San Francisco, 1997.

Images et sciences : le thème est à la mode. Il s'intègre dans une tentative de rapprochement de l'art et de la science. Qui en sont les artisans ? Ce sont les scientifiques qui refusent d'être exclus d'une vie intellectuelle qui se résumerait environ à la politique, à la philosophie et à l'art. Ce sont aussi les artistes audacieux, qui cherchent ailleurs que dans leur monde des possibilités d'expression nouvelles. Et ce sont enfin les «communicateurs scientifiques», qui utilisent le Beau comme appât pour faire venir aux sciences tous ceux qui n'en ont pas le goût.

Un des courants du domaine est la présentation d'images issues de la recherche scientifique : devant les courbes de Lissajous qui se déforment sur les oscilloscopes, dans les laboratoires d'électroniques, devant les diverses précipitations de paillettes dorées, dans les laboratoires de chimie, devant les formes étranges du monde microscopique que découvre la biologie, devant les ensembles colorés qu'ont produit Benoit Mandelbrot et ses émules, que possibilités de rêver ! Toutefois, derrière la «belle image de science», il y a toujours de l'humain : soit l'homme caché derrière la blouse de laboratoire qui présente ces images, afin de faire partager son idée du Beau, soit un esprit artistique qui, tel un papillon, vient se coller au lampadaire du laboratoire. Et les images sont choisies, voire retraitées.

Avec *On the Surface of Things* («à la surface des choses»), la sélection a été double : la photographe Felice Frankel montre les images qu'elle a été chercher dans les divers appareils scientifiques d'imagerie, mais elle est épaulée par le chimiste George Whiteside, qui, de son côté, jugeait que les équations ne pouvaient pas captiver les étudiants et voulait expliquer les phénomènes naturels par des images.

Les deux auteurs s'interrogent : tout sujet scientifique peut-il donner lieu à des images captivantes ? Pour le savoir, le test a été fait à partir d'images de surfaces, parce que la surface de la matière est souvent le siège de phénomènes remarquables. Le livre est composé de quelques 70 doubles pages, avec, pour chacune, une grande image et un léger texte d'accompagnement.



Où est la beauté d'une bulle de savon : dans la bulle elle-même ou dans l'œil de celui qui la trouve belle ?

Examinons, par exemple, la double page intitulée *Failure in adhesion* («Rupture d'adhésion»). Personnellement, l'image ne me semble pas belle, mais à chacun son jugement en cette matière ; d'autres que moi seront peut-être séduits. Le texte (en anglais) indique qu'un liquide visqueux déposé sur un solide y adhère pourvu que la surface du solide ait des propriétés appropriées (lesquelles ? Ce n'est pas dit). Un adhésif est ainsi un liquide visqueux qui mouille les surfaces à coller (quelle percée de la compréhension !). Quand un collage vient à rompre, le film liquide se dissocierait comme un chewing-gum que l'on étire (mais savons-nous bien comment un chewing-gum se rompt ?) Puis les deux parties du liquide se rétractent en formant des doigts perpendiculaires aux surfaces (comment et pourquoi ?).

Quoi ? Le projet ambitieux d'expliquer la science en se fondant sur les images se résume-t-il à cette description ? C'est insuffisant, comme l'ont été bien des tentatives «art et sciences» des dernières années. C'est une leçon pour ceux qui voudront reprendre le flambeau : ils devront prendre garde à n'être pas... superficiel.

Christophe RICHTER

**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>**