

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 1997

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Les sursauts
gamma

La migraine

L'amiante

Les greffes
d'organes animaux

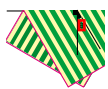
Les voiles des bateaux
de course

Engrais
et démographie

Les trésors de
la Chine bouddhiste

2003-01-17-79

Bloc-notes de Didier Nordon



Jeu-concours

Comment étendre sa serviette de bain?
par Pierre Tougne

Tribune



Les inattendus de la science

Les inattendus de l'astronomie
par André Brahic

Métier de l'ingénieur

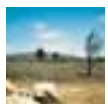
Vers des ingénieurs entrepreneurs
par Jean-Claude Lehmann

Science et finance

Les nombres-indices
par Christian Walter

Science et gastronomie

Cuisine rénovée
par Hervé This



Perspectives scientifiques : 20

Prévoir les feux de forêts
La fureur de vivre

Cristal livresque

Les oiseaux menacés
La musique des mers
Des embryons de dinosaures carnivores
Les petits corps du Système solaire
Parasites indicateurs



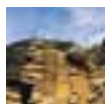
L'expérience du mois

Sablier inversé...
par Pierre Évesque



Logique et calcul

Les ordinateurs mathématiciens
par Jean-Paul Delahaye



L'image du mois

Cheminées de sable
par Roland Paskoff

Savoir technique

Les fibres optiques

par John Mac Chesney



Analyses de livres

- Biologie des coléoptères chrysomélides
- Îles, vivre entre ciel et mer
- L'origine des espèces aujourd'hui. L'espèce existe-t-elle? L'impasse ponctualiste
- L'évolution a-t-elle un sens?
- Sir Christopher Ingold, a Major Prophet in Organic Chemistry

La migraine

par Marie-Germaine Bousser,
Hélène Massiou et Anne Ducros

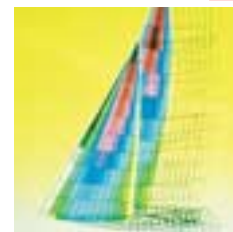
Les mécanismes de cette maladie aux multiples facettes s'éclairent et les composantes génétiques se précisent ; des médicaments mieux ciblés devraient naître des découvertes récentes.



Les voiles de course

par Brian Doyle

Les tissus en matériaux composites mis au point pour les voiles des bateaux de course pourraient être utilisés pour les parachutes et les ballons stratosphériques.



Grandeur et décadence de l'amiante

par James Alleman
et Brooke Mossman

Minéral aux applications universelles, des mouchoirs à la pâte dentifrice en passant par les matériaux de construction, l'amiante est aujourd'hui pros- crit. On ne lui connaît toutefois pas de remplaçant.



Amiante : le dossier français

par J.-P. Favre-Trosson

Avant d'interdire complètement l'utilisation de l'amiante, la France en était l'un des plus gros consommateurs.

Les trésors du bouddhisme chinois de Dunhuang

par Neville Agnew et Fan Jinshi

Les temples creusés dans la roche, le long de l'ancienne route de la soie, témoignent des transformations culturelles et religieuses d'un millénaire. Les archéologues tentent de préserver les statues et les peintures menacées.



Les poissons lumineux fossiles des carpates

par Ruzena Gregorova

Les organes émetteurs de lumière permettent aux poissons de vivre dans les ténébreuses profondeurs abyssales. Cette merveilleuse adaptation est révélée par des fossiles vieux de 35 millions d'années.

66

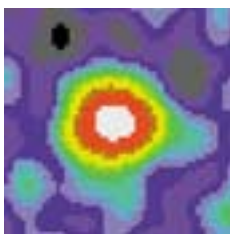


Les sursauts gamma

par Gerald Fishman
et Dieter Hartmann

Des observations récentes de ces explosions mystérieuses font espérer que l'on en connaîtra bientôt les sources. On envisage notamment des collisions d'étoiles à neutrons.

72



Les xénotransplantations

par Robert Lanza, David Cooper
et William Chici

Depuis plusieurs dizaines d'années, le nombre d'organes prélevés sur des donneurs décédés est insuffisant pour tous les patients qui attendent de bénéficier d'une transplantation. Des organes humanisés provenant d'animaux deviendront peut-être une source d'organes salvateurs.

80



ENGRAIS ET DÉMOGRAPHIE

par Vaclav Smil

Pour nourrir la population du Globe, on doit utiliser tant d'engrais azotés que la répartition de l'azote sur la Terre a été modifiée de manière spectaculaire, voire dangereuse.

86



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

É D I T O R I A L

Un monde de contraires

Scintillements quotidiens, les étoiles imprègnent de leurs ordonnancements cultures, traditions, religions. Cette régularité céleste est ponctuée d'extraordinaires manquements : les étoiles filantes et les comètes signalaient, pensait-on, l'exceptionnel catastrophique ou divin. Une comète aurait guidé les rois mages vers Bethléem ; une autre aurait, la tapisserie de Bayeux l'atteste, signalé la conquête de l'Angleterre.

Les étoiles paraissent toutes identiques, à de minimes différences de coloration près... Trompeuse uniformité. Les instruments de la physique ont ouvert des fenêtres sur un monde divers (voir *Les inattendus de l'astronomie*, par André Brahic, page 8).

Mais ce monde est compréhensible par extrapolation des lois terrestres. La science unifie : les mêmes phénomènes nucléaires, gravitationnels et électromagnétiques sont à l'œuvre dans les étoiles ; la science explique ainsi des comportements divers, des quasars aux pulsars... Les objets cosmiques sont de la science éparpillée dans l'Univers.

Certaines expressions cosmiques gargantuesques restent énigmatiques. Comment élucider les flambées de rayonnements gamma (voir *Les sursauts gamma*, par Gerald Fishman et Dieter Hartmann, page 72), qui consomment en quelques minutes l'énergie émise par le Soleil en dix milliards d'années ?

Le futur de la physique est l'astrophysique. Les physiciens pallieront les limites des accélérateurs de particules en analysant les particules de fabuleuses énergies envoyées par les lointaines machines stellaires.

La tête dans les étoiles : attitude du fou, du poète, du mystique et de l'astronome... Alors quelle tristesse, quelle colère, que de retomber sur Terre pour voir fleurir à l'arrière des autobus les mérites d'un nouveau jeu fondé sur les signes... astrologiques. Il n'est de superstition si mal fondée et si stupide qui ne puisse être exploitée par les marchands du temple.

Philippe BOULANGER

Poésie matricielle

Voici le poème le plus stupide qu'il m'ait été donné de lire. Il est reproduit dans le dossier consacré à l'Oulipo par la revue *Écrire & Éditer* (Vitry, mai-juin 1997).

Haletant sur les flots
Le **t**ronc du pin sourit
Tendu d'un sombre sang...
Sûrs **p**inçons rhapsodiques,
Les **s**oubresauts haineux
Florissant d'ichneumons.

Pourquoi stupide, ce poème ? Pas parce qu'il ne veut rien dire. À ce compte-là... Mais il a dû exiger un travail invraisemblable. Il jouit en effet d'une propriété extraordinaire, qui fait de lui ce qu'on nomme un diagonnet. Lisez verticalement la première syllabe de chaque vers : vous retrouvez exactement le premier vers. Lisez verticalement la seconde syllabe de chaque vers : vous retrouvez exactement le second vers. Ainsi de suite jusqu'à la sixième syllabe et le sixième vers. Autrement dit, si l'on dispose les syllabes de ce poème sous forme de matrice, on obtient ce que les mathématiciens appellent une matrice (6, 6) symétrique.

Comme disent les bidasses, le type qui a fait ça, tant qu'il a fait ça, il n'a pas fait autre chose...

Comme un lieu commun...

Curieuse topologie que celle des lieux communs : quand on s'écarte d'un lieu commun, on ne fait que rester dedans.

Il y a quelque chose d'émouvant dans les contorsions d'un auteur qui répète un lieu commun, tout en soulignant qu'il le prend pour tel : «On a beaucoup dit que... Comme chacun sait... Faut-il rappeler que...?» Ces formules de distanciation, par lesquelles l'auteur marque qu'il a conscience de la banalité du propos qu'il va reprendre, sont émouvantes en ce sens qu'elles valent aveu d'échec. Ces formules, en effet, sont elles-mêmes toutes faites, véritables lieux communs de la prose ! Preuve que le lieu commun est un piège dont on ne se sort pas si facilement.

Que ce soit pour l'adopter ou pour le critiquer, le simple fait qu'un auteur cite un lieu commun révèle qu'il s'est déterminé par rapport à lui. Autrement dit, même s'il prétend s'en dissocier, voire le repousser, il n'y est pas étranger et, en cela, y reste soumis. Une pensée originale, quant

à elle, se meut dans son univers propre, à l'écart de tout lieu commun. L'originalité exige une indifférence si souveraine aux lieux communs qu'elle en vient à oublier jusqu'à leur existence.

Note de gueule

Yves-Alain Fontaine n'est pas convaincu que tout soit à rejeter dans la morphopsychologie (appelée aussi physiognomonie) – laquelle a tenté d'associer certains traits du visage à des sortes de directives psychiques. «Même si ces considérations sont passées de mode, j'y suis sensible, [ayant vu à l'œuvre un ami peintre portraitiste] capable de décoriquer en quelques minutes les tendances caractérielles d'une personne parfaitement inconnue auparavant. Je me demande donc si ces idées n'ont pas été considérées avec trop de mépris. Est-il vraiment inconcevable que des ensembles de gènes puissent jouer un rôle de directives internes à la fois vis-à-vis de caractères morphologiques et de tendances "sentimentales" ?» (Yves-Alain Fontaine, *L'évolution sentimentale*, Odile Jacob, 1996, p. 96).

Peut-être en effet s'agit-il là d'un exemple – un de plus ! – de l'incapacité des hommes à penser autrement qu'en allant trop loin, dans un sens puis dans l'autre. Choqués des excès auxquels a mené la physiognomonie (dans le domaine

judiciaire, par exemple, ou comme «argument» raciste), nous la rejetons totalement, sans imaginer que ce rejet puisse nous mener à notre tour à des excès que, peut-être, on nous reprochera à l'avenir. «Le Progrès est l'injustice que chaque génération commet à l'égard de celle qui l'a précédée», disait Cioran (*De l'inconvénient d'être né*, VIII).

La marée n'attend pas

Les lois de la physique sont-elles universelles ? Sont-elles les mêmes depuis le début des temps ? Plutôt que de spéculer sans fin sur ces questions, mieux vaudrait lire les témoignages des voyageurs – et leur faire confiance, bien sûr. La réponse est nette et définitive. C'est non.

«La théorie newtonienne des marées ne se vérifie pas à Tahiti où, toute l'année, les eaux commencent uniformément à refluer à midi et à minuit, et montent vers le coucher du soleil et le point du jour. D'où l'expression Tuiraa-Pô, employée à la fois pour désigner la marée haute et le minuit.» (Herman Melville, *Omoo*, I, XXVII, Pléiade, p. 393.)

De deux choses l'une. Ou les observations modernes confirment celles de Melville ; en ce cas, les lois de la physique ne sont pas universelles. Ou elles les contredisent ; en ce cas, les lois de la physique ont changé depuis Melville.

O temps, suspends ton vol...

En ces temps où nombre d'éditeurs pâtiennent de la mévente générale du livre, republier un dithyrambe de Lamartine à la gloire de Gutenberg est héroïque. L'éditeur qui fait cela (Folle Avoine) est aussi crâne qu'un pendu entreprenant l'éloge de la corde qui le tient...

Mais lisons plutôt. Lamartine commence ainsi (p. 9-10) : «L'imprimerie rapproche et met en communication immédiate, continue, perpétuelle, la pensée de l'homme isolé avec toutes les pensées du monde invisible, dans le passé, dans le présent et dans l'avenir. On a dit que les chemins de fer supprimaient la distance ; on peut dire que l'imprimerie a supprimé le temps. [...] On peut hésiter à prononcer si une presse n'est pas autant un véritable sens intellectuel, révélé à l'homme par Gutenberg, qu'une machine matérielle.» Et il conclut (p. 91-2) : «Dans quelques années, un mot prononcé et reproduit sur un point quelconque du globe pourra illuminer ou foudroyer l'univers. La parole par le procédé perfectionné de Gutenberg sera redevenue, par la matière, aussi immatérielle que quand elle était seulement pensée. [...] L'esprit se trouble d'admiration devant les conséquences futures de ces inventions et devant ce règne prochain de l'idée par la parole.»

Quelle actualité ! Quelques mots à peine à changer ça et là, et ce texte pourrait être signé de n'importe quel thuriféraire d'Internet ou du cyberspace. Les enthousiastes sont gens peu imaginatifs : d'un siècle à l'autre, la technique accélère, mais leurs commentaires piétinent.

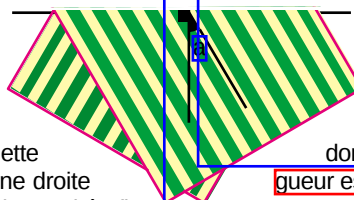
JEU-CONCOURS

PIERRE TOUGNE

N° 39

COMMENT ÉTENDRE SA SERVIETTE DE BAIN ?

Ce mois, un problème pratique : comment faire sécher le plus rapidement possible sa serviette de bain quand on n'a pas de pinces à linge et que la corde à linge est très glissante. Plus précisément, on supposera qu'il n'y a aucun frottement entre la corde et la serviette et, par conséquent, que la serviette doit être pliée autour d'une droite passant par son centre de gravité afin qu'elle ne tombe pas. D'autre part, pour que la serviette sèche le plus rapidement possible, on doit chercher à minimiser la surface des parties de la serviette qui se recouvrent. Dans le cas d'une serviette carrée, il n'est pas difficile de montrer que l'on doit la plier autour d'une droite faisant



un angle de $\pi/8 = 22,5$ degrés avec une diagonale de la serviette. Pour une serviette rectangulaire, le problème est plus délicat. Sauriez-vous déterminer l'angle α de la normale au pli avec l'axe de symétrie dans le sens de la longueur de la serviette (voir la figure) pour des serviettes dont le rapport largeur sur longueur est, soit 0,5, soit 0,838?

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

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°37

Remarquons qu'ajouter à droite d'un nombre binaire un 0 ou un 1 revient à multiplier le nombre décimal correspondant par deux et lui additionner respectivement 0 ou 1. D'autre part, le critère d'arrêt du jeu étant la divisibilité ou non du nombre décimal par un nombre premier p , ce n'est pas le nombre lui-même qui nous intéresse, mais le reste de sa division par p qui obéit à la même loi de transformation que le nombre lui-même en calculant simplement modulo p . Ainsi si p est un nombre premier de la liste, Marc devra éviter le reste 0 (évident) et le reste $(p-1)/2$, car Benoît, en ajoutant un 1, conduira au nombre décimal dont le reste de la division par p est $2 \times (p-1)/2 + 1 = p \equiv 0 \pmod{p}$, donc divisible par p . Prenons l'exemple de la liste (5, 7) : Marc doit éviter le reste 2 pour la division par 5 et le reste 3 pour la division par 7. Au départ, les deux restes sont 1 et 1, ce qui est noté (1, 1) ; s'il ajoute un 0 ceux-ci deviennent (2, 2), position perdante pour la division par 5, et s'il ajoute un 1, les restes sont (3, 3), position perdante pour la division par 7, donc Benoît gagne. Pour la liste (7, 11), Marc doit éviter les restes respectifs 3 et 5, d'où son meilleur jeu :

(1, 1) $\xrightarrow{0}$ (2, 2) $\xrightarrow{0}$ (4, 4) $\xrightarrow{0}$ (1, 8)

mais, au coup suivant, il ne peut donner que les deux positions perdantes $\xrightarrow{0}$ (2, 5) ou $\xrightarrow{1}$ (3, 6), et Benoît gagne.

Dans le cas de la liste (5, 11), la suite des coups forcés de Marc est (1, 1) $\xrightarrow{1}$ (3, 3) $\xrightarrow{0}$ (1, 6) $\xrightarrow{1}$ (3, 2) $\xrightarrow{0}$ (1, 4) $\xrightarrow{1}$ (3, 9) $\xrightarrow{0}$ (1, 7) $\xrightarrow{1}$ (3, 4) $\xrightarrow{0}$ (1, 8) $\xrightarrow{1}$ (3, 6) $\xrightarrow{0}$ (1, 1), et, comme (1, 1) est une position précédente, Marc gagnera en recommençant la même suite, c'est-à-dire la stratégie notée 1 10.

La liste (7, 11) est plus intéressante, car l'arbre binaire des possibilités de Marc a plusieurs branches et il y a 12 stratégies possibles dont la plus immédiate est (1, 1) $\xrightarrow{0}$ (2, 2) $\xrightarrow{0}$ (4, 4) $\xrightarrow{1}$ (2, 9) $\xrightarrow{1}$ (5, 8) $\xrightarrow{1}$ (4, 6) $\xrightarrow{1}$ (2, 2) soit 10 0111 et la plus simple 10 01 (vérification laissée au lecteur). L'analyse de la liste (7, 11, 13, 17) ne présente pas de difficulté, si ce n'est sa longueur, et l'on montre que Marc en jouant au mieux perdra au 16^e coup après la suite 100 101 111 010 00 {0/1}.

À propos du Jeu-Concours n° 35, une erreur s'est glissée dans la réponse. Il fallait lire $I = \sqrt{119^2 - 105^2} = 56$. D'autre part, J. Marot a réussi la gageure de donner une expression algébrique (!) de la longueur I séparant les deux murs (on le trouvera sur le site WEB de *Pour la Science*).

Effondrement

L'article de Maurice Mattauer *La faille du tunnel de Toulon* (voir *Pour la Science*, avril 1997) comporte des appréciations inexactes. La complexité de la structure géologique du site avait été identifiée dès les premières études du projet de traversée souterraine de Toulon. Le grand chevauchement signalé par M. Mattauer a donc bien été pris en compte.

À chacun des stades d'avancement des études, des sondages de reconnaissance ont été réalisés pour dresser la coupe géologique complète du tunnel : un sondage tous les 40 mètres en moyenne. Deux galeries de reconnaissance ont été creusées. Les géologues de l'administration ont, en outre, fait appel aux spécialistes de l'Université de Marseille pour l'interprétation de toutes ces données.

De même, les caractéristiques mécaniques des terrains ont été appréciées par des essais en laboratoires, des essais *in situ* et l'analyse classique du comportement des galeries de reconnaissance (étude de la déformation de la galerie, des tassements, et mesure des contraintes). Ce n'est donc pas dans la méconnaissance des terrains et de leurs caractéristiques qu'il faut rechercher les causes de l'effondrement du tunnel de Toulon.

C. LEYRIT, Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme

Réponse de M. Mattauer

À lire la réponse de C. Leyrit, on pourrait croire que les études ont été très bien menées et que tout a été pris en compte. Et le tunnel lui-même ne sait pas pourquoi il s'est si bêtement écroulé en pleine ville.

La réalité est hélas bien différente. Il est faux de dire que le grand chevauchement de la nappe du Cap Sicié avait été envisagé et localisé sur le tracé du tunnel. En effet, le dossier géologique mis à la disposition des entreprises, dans la phase de consultation avant travaux, proposait deux hypothèses structurales, fort éloignées l'une de l'autre, pour expliquer la géologie complexe du sous-sol toulonnais. La première hypothèse, la plus argumentée dans le dossier, mettait en avant une tectonique simple à composante verticale, avec failles sub-verticales, tout à fait irréaliste et en contradiction totale avec le contexte régional.

La deuxième hypothèse envisageait l'existence d'une nappe de charriage, mais d'une façon théorique et seulement en quelques lignes, sans la moindre localisation sur le terrain et sans aborder les conséquences possibles sur la qualité des terrains intéressés par le tunnel.

Ce n'est que trois mois avant l'effondrement que des sondages profonds ont été réalisés sous le niveau du tunnel ; c'est l'intervention d'un très bon expert en géologie structurale qui, un mois avant, a permis la mise en évidence de ce chevauchement, sans équivoque, et qui a découvert l'empilement de plusieurs écaillles de charriages apparaissant en série inverse, les terrains les plus jeunes se trouvant sous les plus anciens. Il est piquant de constater que c'est l'entreprise, à juste titre inquiète, qui est à l'origine de la consultation d'un géologue indépendant et de la mise en évidence de la nappe, et non pas les responsables du projet.

On peut donc bien affirmer que « l'interprétation de toutes les données », faite par ces responsables dans différents rapports entre 1989 et 1991, et maintenue jusqu'après l'éboulement, est toujours restée simpliste et sommaire ; elle n'a pas été capable de déchiffrer la structure complexe de la région qui avait pourtant fait l'objet de plusieurs articles dans la presse spécialisée depuis 1963. Cela est bien compréhensible, car ces différentes personnes ont été consultées pour donner un avis sur un problème tectonique difficile qui relevait de la compétence de spécialistes en géologie structurale.

On a ainsi réussi l'exploit de dépenser 60 millions de francs sans s'être rendu compte qu'on se trouvait en plein dans une nappe de charriage. Il est vrai, que pour la découvrir, il aurait fallu réaliser des sondages traversant la nappe, donc bien plus profonds que le radier du tunnel.

Si on peut se contenter de reconnaître les terrains dans l'environnement immédiat d'un tunnel, en contexte géologique simple, éloigné des zones perturbées par la tectonique, il est évident qu'à Toulon il fallait ratisser beaucoup plus large pour mettre en évidence la grande faille responsable du laminage et du broyage des terrains où est creusé l'ouvrage. Si ce contexte géologique avait été mis en évidence dès l'origine des travaux de reconnaissance, le soutènement du tunnel aurait certainement été dimensionné autrement.

On cherche aujourd'hui à prouver qu'il n'y a pas de responsable ; afin de sauver la face, de se couvrir pour que les surcoûts, engendrés par un projet mal adapté aux réalités géologiques, soient pris en charge par tous les payeurs et les assurances. Finalement ce tunnel coûtera probablement près de un milliard de francs, alors qu'il a été négocié à l'origine à moins de 300 millions de francs.

Mettons en place un Comité technique des tunnels qui rendra obligatoire l'intervention d'experts compétents, et qui rappellera systématiquement que les études géologiques sérieuses sont évidemment un préalable à toutes les consi-

dérations géotechniques, ces dernières devant découler des premières, et non l'inverse, comme le croit encore C. Leyrit. D'ailleurs, il ne nous dit pas encore pourquoi le tunnel s'est effondré... il y a plus de 17 mois.

Division euclidienne

Considérons l'ensemble des restes de la division euclidienne d'un nombre premier par son rang. Cet ensemble est-il majoré ? Si la réponse est non, cet ensemble est-il égal à celui des entiers naturels ? Peut-on trouver trois (ou plus) nombres premiers consécutifs ayant même reste pour cette division ?

Abdoulah VAVODA, Saint-Laurent du Maroni

Réponse de M. Balazard, de l'Université Bordeaux 1

La troisième question est la plus simple.

Grâce au logiciel MAPLE, j'ai constaté que :

$$1181 = 6 \times 194 + 17$$

$$1187 = 6 \times 195 + 17$$

$$1193 = 6 \times 196 + 17$$

La réponse à la première question est négative. Voici la démonstration.

Lemme 1 : soit α, β, a, b quatre nombres réels tels que $0 < \alpha < \beta < 1$, $a - b < \beta - \alpha$, et u_n une suite de nombres réels tendant vers l'infini telle que $u_{n+1} - u_n$ tende vers 0 quand n tend vers l'infini. Alors, il existe un nombre entier K tel que, pour tout nombre entier $k \geq K$, on puisse trouver n vérifiant :

$$k + \alpha \leq u_n - a, \text{ et } u_n - b \leq k + \beta$$

Lemme 2 : Si on note p_n le n -ième nombre premier, quand n tend vers l'infini, $p_n/n - \log n - \log(\log n)$ tend vers -1 .

C'est une version forte du théorème des nombres premiers.

D'après le lemme 2, on a pour $n \geq n_0$:

$$n(u_n - 5/4) \leq p_n \leq n(u_n - 3/4)$$

où $u_n = \log n + \log(\log n)$, suite qui vérifie l'hypothèse du lemme 1. Par le lemme 1, on trouve K tel que, pour tout $k \geq K$, il existe $n \geq n_0$ tel que $k + 1/5 \leq u_n - 5/4$ et $u_n - 3/4 \leq k + 4/5$

$$\text{d'où } kn + n/5 \leq p_n \leq kn + 4n/5$$

d'où par conséquent, si on note $f(n)$ le reste de la division de p_n par n :

$$n/5 \leq f(n) \leq 4n/5.$$

Quand on fait tendre k vers l'infini, on voit que cet encadrement se produit pour une infinité d'entiers n , ce qui montre bien que l'ensemble des valeurs de f n'est pas borné.

On peut sans doute préciser considérablement cet énoncé, et peut-être montrer que l'ensemble des valeurs de f est de densité 1. En revanche, je n'ai pas trouvé s'il contient ou non tous les entiers naturels.

Les inattendus de l'astronomie

ANDRÉ BRAHIC

Excepté les étoiles à neutrons et les trous noirs, aucun objet cosmique n'était prévu. Uranie, muse pudique, dévoile avec parcimonie ses attraits.

Le monde céleste est peuplé d'êtres extraordinaires d'une diversité difficile à imaginer *a priori* : des quasars consommant de formidables quantités d'énergie, des pulsars émettant des rayonnements avec la régularité des meilleures horloges, des galaxies aux proportions fabuleuses, des étoiles de diverses tailles et de divers types, des mondes sans retour comme les trous noirs.

UNE DIVERSITÉ EXPLICABLE

Le grand «inattendu» est que nous avons les moyens de comprendre cette diversité : chaque fois que nous avons découvert une nouvelle loi de la physique, nous avons trouvé un astre où elle s'appliquait ; sans cette loi, nous n'aurions pas compris la nature de cet astre. Ainsi les physiciens ont découvert les masers au laboratoire avant de les observer dans le ciel. Dans le silence des laboratoires, les scientifiques découvrent des principes qui s'appliquent à des milliards d'années-lumière.

Il y a 2 600 ans, les Grecs pensaient autrement : ils élaboraient une physique propre à la Terre, être à part. Pour eux, en revanche, le ciel était le monde des dieux, qui ne pouvait être que le siège de mouvements «parfaits» ; donc les astres tourment, pensaient les Grecs, selon des trajectoires circulaires avec un mouvement uniforme. Aujourd'hui les physiciens pensent que les lois physiques sont universelles, et ils le vérifient : la loi de la gravitation de Newton est vérifiée au moins sur un dixième de l'Univers. Sur les neuf dixièmes restants, c'est une extrapolation.

Au fur et à mesure des progrès de la physique et des mathématiques, de nouveaux êtres sont apparus : au début de ce siècle, en 1900, nous ne connaissions que les étoiles – les galaxies n'étaient pas identifiées à l'époque – et les planètes.

En 1880, le bilan a été fait dans les merveilleux ouvrages de Camille Flammarion. Si Flammarion était encore parmi nous, et j'aimerais bien qu'il y soit parce qu'il avait un talent extraordinaire, il diffuserait avec passion les dernières nouvelles, et nous apprécierions mieux combien notre connaissance du monde s'est enrichie.

LA PROSPECTIVE N'A AUCUN FUTUR...

Les découvertes en science ne sont pas une succession de hasards. La vision d'un monde magique dont des savants en longues robes déchiffrent quelques mystères n'est que trop répandue. Si les découvertes ne résultaient que de hasards, notre vision serait celle d'un monde chaotique à l'orchestration incompréhensible. Les recherches scientifiques sont dirigées par des idées *a priori*.

La science avancerait-elle alors selon des rails bien tracés ? Non plus. Je vous engage à lire les rapports de prospective des organismes de recherche du monde entier. Vous y découvrirez en gros ce qui ne s'est pas passé. La prospective n'a pas un futur prometteur en science.

Par nature, les découvertes sont bien difficiles à prévoir. L'astronome a des surprises aussi intenses que celles de Christophe Colomb découvrant «des Indes» très différentes de celles qu'il avait imaginées. Des Amériques, ils s'en découvrent tous les ans, aussi inattendues, aussi imprévisibles.

J'ai eu le bonheur d'être un des scientifiques associés à la mission *Voyager* qui a exploré Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune : avant chaque rencontre avec une planète, nous faisons des paris sur ce que nous allons voir, et tout le monde perdait. Si vous voulez savoir à quoi ne ressemblent pas les paysages et les

planètes, feuillotez les ouvrages de science-fiction des années 1880 à 1950.

LE DIRIGISME EST PEU PRODUCTIF

Comme la prospective est difficile, le dirigisme, son corollaire, est inadéquat. Si vous voulez guérir le cancer ou le SIDA, ce n'est pas uniquement en créant un programme de recherches contre le cancer ou contre le SIDA que vous y parviendrez : les faits importants jaillissent sans cesse de directions inattendues.

À quoi sert l'astronomie ? J'ai la faiblesse de penser que c'est une activité culturelle essentielle. Mais, en dehors de cet aspect, et comme toutes les sciences, les progrès en astronomie ont des retombées économiques. Les astronomes ont mis au point des programmes de calcul des formes à partir d'observations à deux dimensions. Ainsi ils reconstituent le ciel sur la base de visées à deux dimensions. Quand les physiciens ont inventé le scanner avec lequel il faut représenter l'intérieur du corps à trois dimensions à partir de mesures d'absorption par tranches, ils ont utilisé les programmes des astronomes. Le fâcheux est que le brevet est maintenant américain : quand on achète un scanner en France, on paie des redevances qui auraient pu rester dans notre escarcelle.

Autre exemple, l'optique adaptative : les astronomes ont su s'affranchir des déformations optiques dues à l'atmosphère. Quand nous regardons un astre, nous le voyons à travers une espèce de rideau atmosphérique. L'étoile, dont l'image devrait être un point, est une «patate». En faisant l'opération inverse sur les photographies du ciel, opération qui nous fait repasser de la «patate» au point, nous éliminons les perturbations atmosphériques. Un Français, François Roddier, a mis au point cette technique... aux États-Unis. En France, l'effort a été moindre. L'optique adaptative a des prolongements en chirurgie oculaire pour les examens où il faut effacer les défauts des lentilles de l'œil.

HIÉRARCHIE ET FRAGMENTATION

Toutefois, le plus passionnant en astrophysique, reste l'astrophysique. Parce qu'elle pose les questions importantes sur l'existence de l'Univers. A-t-il commencé un jour ? Quand ? Est-il éternel ? Est-il limité ? D'où venons-nous ? Où allons-nous ? Qui sommes-nous ? Il n'est guère de sujet plus prenant ! Nous avons, pour la première fois dans l'histoire, des ébauches de réponses aux questions précédentes.

Deux aspects inattendus de l'évolution de l'Univers restent inexpliqués : son organisation hiérarchique et la fragmentation d'un milieu *a priori* homogène en objets individuels.

L'Univers est organisé de façon hiérarchique dont les premiers éléments sont les étoiles ; 80 pour cent de ces étoiles vivent en couples. Puis il y a des amas d'étoiles, et ces amas d'étoiles

sont réunis en galaxies. La galaxie est à l'astronome ce que la molécule est au chimiste, l'élément de base ; elle comprend des étoiles, de la poussière, du gaz, des particules de haute énergie. Notre Galaxie, la Voie lactée, comprend une centaine de milliards d'étoiles ; des galaxies comme la nôtre, il en existe quelques centaines de milliards...

Les galaxies sont regroupées dans des amas de galaxies. Dans notre petit amas local, nous avons une trentaine de galaxies voisines, les plus proches étant les nuages de Magellan et la galaxie d'Andromède. Ensuite, il y a des amas d'amas, et peut-être des amas d'amas d'amas. Jusqu'où ira-t-on ? Chaque fois que l'on passe d'un niveau de la hiérarchie au niveau supérieur, la densité de



Camille Flammarion

1. CAMILLE FLAMMARION (1842-1925), popularisateur et visionnaire, n'avait, pour stimuler son imagination cosmique, que les observations de l'époque. Il rendit compte d'une rarissime aurore boréale à Paris, en 1868, et représenta un monde désolé avec quatre soleils et quatre lunes. Pas plus que les éminents prospectivistes actuels, Flammarion n'a pu imaginer les êtres cosmiques que les astronomes allaient découvrir avec les nouveaux moyens d'observation.



matière diminue; donc, si la hiérarchie se poursuivait indéfiniment, la densité de l'Univers serait quasi nulle. Cela est important, car, selon la valeur de sa densité, l'Univers est en expansion indéfinie ou, au contraire, retombe sur lui-même.

Le Soleil a une densité de l'ordre de l'unité, mais, si l'on considère cette masse dans le volume du Système solaire, la densité correspondante est très faible. La densité de la galaxie est encore inférieure, car les étoiles sont distantes. Et ainsi de suite. Pour savoir ce que devient la densité à l'infini, il faut faire un inventaire qui n'est pas terminé.

La fragmentation est le second inattendu inexplicable : à partir d'un univers homogène au moment du Big Bang, comment se fait-il que des entités -étoiles, galaxies, amas- se soient constituées? Comment ces objets de masse très particulière se sont-ils isolés? Grand mystère. Toutes les galaxies ont des masses du même ordre de grandeur ; il faut donc savoir comment ces objets se sont individualisés.

L'ÉVOLUTION DES ÊTRES STELLAIRES

Un autre sujet d'étonnement est la variabilité du monde céleste. Les étoiles, comme chacun de nous, pauvres hères, naissent, vivent et meurent. Tout évolue dans l'Univers. Évidemment, pas beaucoup à l'échelle humaine, mais, en regardant finement, les astronomes savent rendre compte de cette évolution. Ce n'est qu'à la fin des années 1930 et au milieu des années 1940 que l'on a compris pourquoi les étoiles brillaient et pourquoi elles évoluaient en épuisant leur combustible.

La durée de vie d'une étoile dépend de sa masse. Une étoile massive, par exemple dix fois la masse du Soleil, vit bien ; elle fait la fête tous les jours, elle est très lumineuse, elle rayonne beaucoup, mais ne dure pas longtemps. À l'inverse, une petite étoile, par exemple un dixième de la masse solaire, fait des économies, ne dépense pas beaucoup, n'émet pas beaucoup d'énergie, vit tristement, mais longtemps. Ces scénarios n'expliquent toutefois pas la répartition actuelle des masses des étoiles ni la fragmentation initiale. Nous sommes limités au constat de l'évolution.

Ce constat n'allait pas de soi : avant 1644, avant Descartes, le dogme était la fixité d'un monde créé par un dieu. Dans le ciel, seuls les nuages évoluaient. Dogme fort, car les contradicteurs, comme Giordano Bruno, finissaient sur le bûcher. Newton aurait pu imaginer une évolution du monde en raison de l'attraction des masses, mais, conservateur prudent,

n'osa pas franchir le pas. 1644 est la date clef. Descartes écrit que le Système solaire a dû être formé à un moment donné et évoluer. Pendant presque deux siècles, deux écoles anglaise et française se sont combattues.

L'école anglaise disait : le Système solaire a été formé par une catastrophe. Une étoile s'est approchée du Soleil, a arraché de la matière qui a constitué les planètes. La probabilité qu'une étoile passe près d'une autre dans la Galaxie est extrêmement faible, l'événement doit se produire une fois tous les 7 à 8 milliards d'années. Cela signifiait que le Système solaire est unique. Conclusion : nous sommes unique(s)!

Les Français, derrière Laplace, raisonnaient différemment : quand une étoile se forme, argumentaient-ils, la périphérie de l'étoile est un milieu plus froid où se forment les planètes. Pour une fois, les Français auront raison : pas de catastrophisme, une évolution banale, et donc nous ne sommes pas uniques : il doit y avoir des planètes autour d'autres étoiles.

Bien plus tard, une autre polémique a opposé les écoles soviétique et américaine : les Américains soutenaient qu'une planète se forme par la contraction d'une protoplanète géante ; les Soviétiques affirmaient qu'elle se constitue par accumulation de corps plus petits. La suite a donné raison aux Soviétiques : une planète se forme par agglomération de planétoïdes, de petits objets de 500 mètres de dimension en moyenne. Quand le choc de deux planétoïdes est violent, les objets se cassent et redonnent de la poussière. Quand le choc est doux, les objets fusionnent. De cette succession de divorces et de mariages sont nées les planètes du Système solaire. Là encore, selon ce raisonnement, il doit exister des planètes hors du Système solaire.

La difficulté est que l'on ne peut expérimenter. L'astronome ne peut casser la Terre en deux, tordre le plan de la Galaxie, ni augmenter la température du Soleil. Heureusement l'exploration spatiale supplée, dans une certaine mesure, à nos manques. Grâce à elle, nous voyons des objets qui sont plus gros que la Terre, d'autres plus petits, d'autres plus chauds, d'autres plus froids, certains plus denses, d'autres moins denses. Cette variation des paramètres physiques, impossible à reproduire en laboratoire, existe naturellement dans la variété des objets observés.

Ainsi le volcanisme n'est pas spécifique de la Terre, et l'on peut mesurer les paramètres sur les autres planètes pour mieux comprendre les mécanismes qui le régissent. Autre exemple, la climatologie. On sait mal modéliser les échanges océan-atmosphère et l'effet de la rotation

rapide de la Terre sur le climat. Sur Vénus, il n'y a pas d'océan, et la rotation de l'astre est lente. En étudiant Vénus, on isole les paramètres importants sur Terre.

Ce n'est pas en restant le nez au niveau des marguerites qu'on comprend les problèmes : relevons la tête, la diversité des objets de l'Univers est la richesse de demain.

Un progrès qui a été à la source de découvertes inattendues est l'observation à d'autres longueurs d'onde que le visible. Le rayonnement électromagnétique couvre un large spectre, et les informations captées dans chaque domaine de longueur d'onde sont d'égale importance. Mais nous n'avions que nos yeux pour voir, et les observations se sont, pendant des siècles, cantonnées au visible. L'histoire de notre reconstitution de l'Univers ressemble au monde perçu par un enfant qui, à la naissance, serait affublé de lunettes vertes. Il n'aurait vu que les feuilles et n'aurait pas imaginé que les arbres ont un tronc. Imaginez sa joie quand, débarrassé de ses lunettes, il verrait le bleu, le rouge, le marron, découvrirait que les feuilles s'accrochent aux branches, qu'il existe des voitures rouges.

LES QUASARS

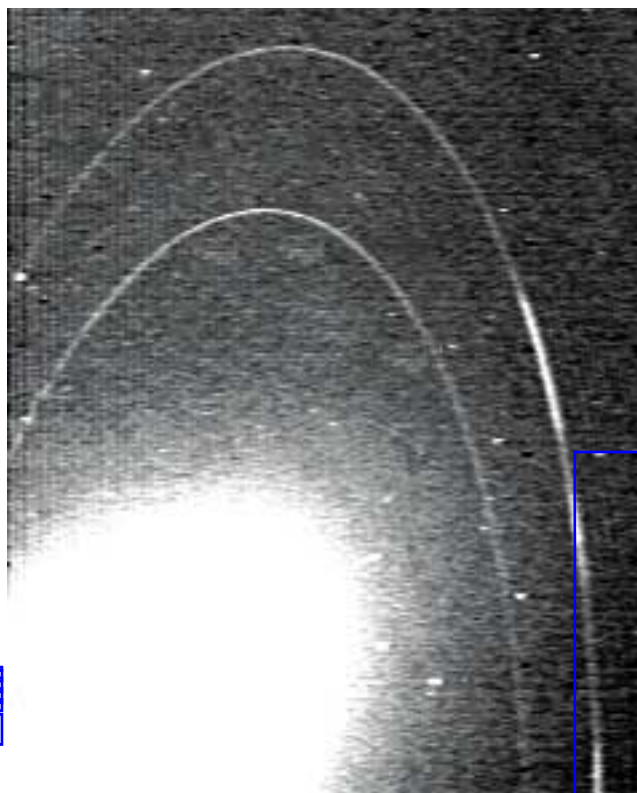
Les astronomes ont vécu cet émerveillement au cours des 20 dernières années : ils ont découvert l'Univers en rayons X, en rayons gamma, en ultraviolets, en infrarouges et vu que le visible ne rend compte que d'une partie de l'Univers. Les quasars ont été découverts par un tel élargissement de notre champ de vision.

Nombre de techniques mises en œuvre en astronomie sont des retombées des recherches militaires. Les astronomes sont de grands récupérateurs de matériel de guerre : la lunette astronomique de Galilée en est le premier exemple. De même, les Anglais, durant la Seconde Guerre mondiale, avaient remarqué que les radars chargés de détecter les avions de la *Luftwaffe* étaient troublés quand on les pointait en direction du Soleil : le Soleil est un émetteur radio.

Les astronomes ont récupéré les radars militaires et ont cartographié les sources radio de l'Univers. Certaines sources sont très violentes, très brillantes, très puissantes, mais la technique de résolution des radiosources n'était pas bonne et leur localisation imprécise. Un jour, une de ces sources est occultée par la Lune, dont on connaît la position à 14 décimales près, et l'on obtient ainsi sa position. À cet endroit, on trouve une petite source visible, de magnitude 14, et ce que les

Anglais appelaient un *quasy stellar object*, un quasar, dont l'essentiel de l'énergie est émise dans les longueurs d'onde radiométriques.

Des théories, des scénarios s'échafaudent pour expliquer la nature de ce nouvel être stellaire. La meilleure explication du moteur des quasars, c'est un immense trou noir, un Gargantua qui mange la matière qu'il attire. Ces quasars sont jeunes parce qu'ils sont loin, et que plus on regarde loin, plus on regarde dans le passé, la vitesse de la lumière étant limitée à 300 000 kilomètres par seconde ; certains quasars sont à neuf milliards d'années-lumière. Nous avons des nouvelles qui datent de neuf milliards d'années. Comment est cet objet aujourd'hui ? Nous le saurons dans neuf milliards d'années.



vite compris que la source du signal était une étoile à neutrons en rotation rapide, et que son rayonnement balayait la Terre comme le faisceau d'un phare balaie les flots. Hélas pour la morale, les deux patrons de Jocelyne ont eu le prix Nobel, et la jeune fille n'a pas obtenu de poste immédiatement. Toutefois, l'humanité se souviendra que c'est Jocelyne Bell, étudiante très consciencieuse, qui a fait une découverte fondamentale. Beaucoup d'astronomes l'envient.

Les trous noirs n'ont pas grand-chose d'inattendu, du moment où vous comprenez la loi de Newton. Pour un objet de masse et de rayon donnés, il y a une vitesse d'évasion : elle est de 11 kilomètres par seconde pour la Terre. Pour un rayon très petit et une masse très grosse, cette vitesse de libération atteint la vitesse de la lumière. Donc un trou noir ne laisse rien échapper, même pas la lumière ; en revanche, il avale tout ce qui passe à sa portée.

Laplace savait cela, et dans sa deuxième édition du *Système du monde*, il imagine ces trous noirs. C'était pendant la Révolution française ; quand la réaction revient au pouvoir, ce passage hardi est supprimé.

La grande difficulté est d'observer ces objets invisibles. On voit les disques d'accrétion de la matière en train de tomber, on voit les trous noirs en train de manger et l'on voit les plats qu'on leur apporte, mais on ne voit pas le convive. Actuellement, les présomptions d'existence sont tout de même assez fortes.

Finalement, rares sont les objets que l'on a imaginés avant de les observer ; plus rares encore ceux qui sont prévus, comme les trous noirs, et que l'on n'a pas vus. Et la plupart des êtres astronomiques sont imprévus : Uranie, muse de l'astronomie, ne dévoile que lentement ses attraits.

LES ANNEAUX DES PLANÈTES

La structure et la physique des anneaux autour des planètes sont des problèmes ouverts qui datent de Galilée, le premier à avoir vu les anneaux de Saturne. La loi de Kepler énonce qu'un objet tourne d'autant plus vite autour d'un corps central qu'il est plus proche ; l'objet éloigné tourne moins vite. La partie interne d'un petit objet irrégulier dans un anneau tournant plus vite que la partie externe, cet objet s'étale et redonne un anneau bien circulaire. L'extraordinaire inattendu est qu'il y ait des arcs de matière autour de Neptune. J'ai eu la chance de les découvrir en 1984 avec William Hubbard, et cette découverte a été confirmée par les observations de la sonde spatiale *Viking*. Ces arcs sont fort intéressants : ils sont peut-être le siège de processus de confinement qui ont joué un rôle important dans la formation des planètes. Soit ces arcs sont instables et, telles les vagues au bord du rivage, ils sont détruits et recréés sans arrêt, mais comment et pourquoi ? Soit ils sont stables, ce que nous ne savons pas encore expliquer.

Nous avons inventé des accélérateurs de particules de plus en plus puissants ; hélas, le jour se pointe où les États n'auront plus assez d'argent pour les construire. Les crédits pour l'accélérateur américain a été coupé et le superaccélérateur qui sera en place au CERN, à Genève, en 2005 n'aura peut-être pas de successeur immédiat.

2. Les arcs des anneaux de Neptune, découverts en 1984. On distingue à droite, de bas en haut, les arcs nommés Liberté, Égalité, Fraternité. Certains astronomes avaient prédits qu'en raison des perturbations du satellite Triton, il ne pouvait pas y avoir d'anneaux autour de Neptune. Tous les astronomes pensaient que des arcs seraient rapidement détruits. Comprendre leur formation et leur stabilité est une des tâches prioritaires des astronomes.

Le futur de la physique est l'astrophysique, et une nouvelle discipline vient de naître : la physique des astroparticules. La compréhension de la physique subatomique passe par les messages du ciel, les rayons cosmiques qui nous arrivent gratuitement. Il n'est donc pas toujours nécessaire de construire des accélérateurs, là où des détecteurs d'astroparticules appropriés suffiraient.

En même temps, nous espérons découvrir le mécanisme de production d'énergie de ces sources extrêmement puissantes. Il faut continuer l'inventaire du magasin astronomie. Une des difficultés est d'intéresser le contribuable et ses élus pour une discipline qui n'est pas enseignée à l'école.

LES PULSARS

Un autre inattendu total fut la découverte des pulsars. Jocelyne Bell, étudiante en stage, découvre un petit parasite dans un signal. Son patron de stage n'y croit guère. Jocelyne insiste, et le parasite continue à se manifester. Les astrophysiciens de Cambridge sont émus, certains pensent à des signaux envoyés par des petits hommes verts : les extraterrestres nous téléphonent-ils ? On a très

André BRAHIC est professeur à l'Université de Paris VII-Denis Diderot et astrophysicien à l'Observatoire de Paris et au CEA Saclay.

Ce texte est une transcription par la revue du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture, le 10 septembre 1997, à 9h05.

Vers des ingénieurs entrepreneurs

JEAN-CLAUDE LEHMANN

L'ingénieur moderne doit se préoccuper de marchés pour créer des emplois.



En cette fin de siècle, il est patent que les techniques évoluent plus vite en France que l'enseignement. L'échelle de temps d'une évolution technique importante est de l'ordre de dix ans, parfois beaucoup moins. Cette accélération de l'histoire a un corollaire : les entreprises demandent aux ingénieurs de créer la vague des innovations plutôt que la suivre.

Ainsi le métier de l'ingénieur moderne ne consiste plus seulement à perfectionner des produits existants afin d'améliorer leurs performances et de les fabriquer à moindre coût. Les entreprises les plus dynamiques, grandes ou petites, souhaitent que leurs ingénieurs retrouvent le goût d'entreprendre, comme à l'époque où des Gustave Eiffel, des Fulgence Bienvenüe, des Georges Claude, portés par leur imagination technique, imposaient leur dynamique, allant même souvent jusqu'à créer leur propre entreprise. Plus proche de nous, un Bernard Maitenaz a su développer *Essilor*, à partir d'un remarquable exploit technique, la lentille à focale progressive.

Les grandes écoles françaises forment de bons professionnels, le plus souvent de bons gestionnaires, mais forment-elles des entrepreneurs ? S'il est souhaitable que, dans un premier emploi, un ingénieur « apprenne le métier » en faisant tourner une usine ou en améliorant les techniques, cette solide formation théorique (à l'école), puis pratique (dans l'entreprise) doit être le socle sur lequel asseoir ensuite son essor créateur. Hélas, cet « épaulé-jeté » n'est pas souvent la marque des ingénieurs français. Bons techniciens, bons gestionnaires, il leur manque le plus souvent la volonté de faire bouger leur entreprise ou, mieux encore, d'en créer une eux-mêmes. Les ingénieurs français seraient-ils mieux formés à supprimer des emplois qu'à en créer ? Quelle école d'ingénieurs, en

France, peut se comparer, toutes proportions gardées, à un Institut de technologie du Massachusetts, qui vient de publier le résultat d'une enquête estimant à plus de un million le nombre d'emplois existant dans des entreprises créées par d'anciens élèves ?

Comment faire passer la culture d'entreprendre dans la formation de nos ingénieurs ? On devra probablement commencer l'action très tôt, dès l'enseignement secondaire, où les connaissances de base doivent s'accompagner d'un apprentissage de l'initiative personnelle. Plus tard, les élèves ingénieurs devraient être mieux à même de mesurer ce qu'une véritable carrière d'entrepreneur, quel que soit le sens exact que l'on accorde à ce terme, peut leur apporter d'enrichissement et de satisfaction personnels. Cet apprentissage devrait notamment donner aux ingénieurs le goût de s'intéresser au marché : c'est là où le marché peut se développer, là où il manifeste de nouvelles demandes, là où naissent également de nouveaux marchés, que se trouvent les possibilités de croissance interne des entreprises (par opposition à la croissance géographique ou par acquisition), de création de valeur pour les actionnaires et de créations d'entreprises nouvelles ; c'est là où de nouveaux emplois peuvent être créés... et c'est là que le goût de l'ingénieur-entrepreneur peut trouver le mieux à s'exprimer.

Comment expliquer que notre pays soit en grande partie passé à côté des extraordinaires dynamiques de création d'emplois qu'ont été les marchés de la communication, de l'informatique, des biotechnologies... alors que les idées et les techniques étaient présentes en France ? Les structures de financement, le rôle de l'État, les contraintes administratives et fiscales ont certainement joué un rôle, mais, avant tout, c'est

la volonté d'entreprendre de nos ingénieurs qui manquait ; c'est d'elle que l'on doit attendre une évolution de la situation.

S'il fallait illustrer cette dynamique par l'exemple d'un grand groupe, comme *Saint-Gobain*, et pour se limiter à l'un de ses métiers, celui du verre pour le vitrage des bâtiments et des automobiles, on peut dire que la technique de base, dite du verre flotté (*float glass*), si elle est de plus en plus complexe et perfectionnée, a tendance à se banaliser. C'est donc en regardant vers le marché que l'on trouvera des opportunités pour enrichir ce métier, le développer et créer plus de valeur ajoutée, et donc d'emplois. Vitrages à transparence variable, protections solaires et thermiques variables, vitrages autonettoyants, répartissant la lumière dans l'intérieur des bâtiments... Voilà autant d'idées nouvelles qui offrent aux ingénieurs à la fois des défis techniques et des marchés à développer et à conquérir.

Les ingénieurs de demain ne devront pas être simplement des ingénieurs gestionnaires. Il faut retrouver le moule de fabrication des ingénieurs-entrepreneurs.

Jean-Claude LEHMANN est directeur de la recherche du Groupe Saint-Gobain.

A l'occasion de son Forum de l'anticipation, le Conservatoire national des arts et métiers organise dix carrefours « emploi-formation » pour aider ses futurs élèves à définir leur projet de formation en fonction des besoins de compétence des entreprises : EDF (16 septembre), Saint-Gobain (17 septembre), La Poste (18 septembre), Axa (19 septembre), Ministère de la défense (22 septembre), Air liquide (23 septembre), Renault (25 septembre), Accor (26 septembre), Elf (29 septembre), Thomson (1^{er} octobre). Entrée libre de 14 heures à 17 heures (renseignements au 01 40 27 29 16).

Cuisine rénovée

HERVÉ THIS

Comment utiliser le vide en cuisine.

Les cuisiniers et les cuisinières filtrent comme au Moyen Âge : ils mettent leurs fonds dans des chinois, et foulent à l'aide d'un pilon ou d'une louche, afin de récupérer le maximum de liquide. Naturellement l'efficacité de l'opération est limitée par la taille des mailles du chinois. Ne pourrait-on rénover cette pratique quasi millénaire ? Des instruments tirés des laboratoires de chimie seraient utiles ; ils mettraient en outre sur la piste d'innovations culinaires amusantes.

Le problème de la filtration se pose avec acuité à propos du bouillon : comment le rendre limpide quand il est trouble ? Traditionnellement les chefs le clarifient : au bouillon froid, ils ajoutent quelques blancs d'œufs, mélangent, puis chauffent doucement, de sorte que les blancs, en coagulant, emprisonnent les particules solides en suspension ; une filtration dans un chinois garni d'un linge achève la clarification.

Cette opération n'est pas satisfaisante, car elle fait perdre du goût au liquide ; de fait, les chefs qui clarifient un bouillon ajoutent des légumes et des viandes frais, coupés en petits morceaux, avec le blanc d'œuf, de sorte que ces matières régénèrent le bouillon gustativement appauvri par la clarification. Coûteuse pratique ! On se donne la peine de confectionner un bon bouillon, pendant plusieurs heures, puis on le réenrichit parce qu'on l'a appauvri.

Les chimistes, pour qui la filtration est une opération quotidienne, ont résolu la question depuis longtemps, à l'aide d'appareils adaptés aux diverses situations : le catalogue d'un des principaux vendeurs de matériel de laboratoire consacre plus de 40 pages à ces appareils. Dans un des plus courants, les matières à filtrer sont déposées dans un entonnoir muni d'une plaque de verre fritté (qui ne perce pas, contrairement aux filtres en papier), aux pores de taille contrôlée, et cet entonnoir est disposé sur une fiole conique où l'on fait le vide, à l'aide d'une trompe à eau (un appareil peu coûteux que l'on branche directement sur le robinet d'eau courante).

Avec Antoine Westermann, chef du restaurant *Buerehiesel*, à Strasbourg, nous avons testé cet appareillage sur

un consommé de tomates, qu'il cherche à obtenir parfaitement limpide. La recette initiale consistait en une cuisson de tomates dans l'eau directement additionnée de blanc d'œuf. Après une demi-heure de cuisson lente, la filtration dans un chinois garni d'un linge donne un liquide doré. L'appareil de laboratoire, lui, procure une limpidité supérieure et un goût plus prononcé : quand des fabricants de matériel électroménager se lanceront-ils dans la fabrication en grande série de ce matériel peu coûteux ? Ils n'auront qu'à augmenter la capacité de filtration de l'appareil de laboratoire, et à remplacer la verrerie par du métal, résistant aux vicissitudes des cuisines.

Sur la lancée d'une telle modernisation, rêvons à des usages culinaires



Fiole à vide surmontée d'un filtre en verre fritté.

des trompes à vide. À l'Université d'Oxford, Nicholas Kurti a imaginé de produire des meringues d'un genre nouveau. Classiquement on fabrique des meringues en ajoutant du sucre à des blancs d'œufs battus en neige, puis en cuisant la préparation obtenue à feu très doux : la coagulation des protéines des blancs conserve la structure alvéolaire de la mousse de blancs en neige, tandis que l'eau s'évapore lentement, laissant le sucre sous forme vitreuse. N. Kurti a eu l'idée de remplacer le chauffage par un stockage de la préparation sous vide : l'eau s'évapore tandis que la dilatation de l'air initialement présent dans les bulles fait considérablement gonfler les meringues. Le produit fini est léger... comme un cristal de vent.

DE LA MERINGUE AU SOUFFLÉ

Cette expérience, qui a le mérite de montrer comment utiliser le vide en cuisine, n'est pas culinairement satisfaisante, car les meringues sous vide manquent de mâche. Comment conserver l'idée d'un fort gonflement et avoir, néanmoins, quelque chose à se mettre sous la dent ? Il suffit de choisir une préparation dont les parois entre bulles soient plus épaisses que dans les meringues : les soufflés ou les pâtes à choux sont ainsi de ces préparations culinaires que les cuisiniers et cuisinières s'évertuent à faire bien gonfler.

Que donne l'usage du vide, dans ce cas ? Une préparation pour soufflé placée dans une cloche où l'on fait le vide gonfle considérablement quand on pompe l'air, car les bulles d'air présentes dans la préparation se dilatent. Mais ce soufflé retombe quand on le remet sous la pression atmosphérique. Pour conserver le gonflement, il suffit de cuire dans l'état gonflé, par exemple à l'aide d'une résistance électrique chauffante qui entoure le ramequin à soufflé, dans la cloche : la cuisson coagule les protéines et emplit les bulles de vapeur d'eau, de sorte que le soufflé conserve sa structure quand on le remet à la pression atmosphérique.

Voilà quelques jeux avec le vide : nul doute que les cuisiniers et cuisinières inventifs en trouveront d'autres, si on leur permet de travailler avec des méthodes de notre temps.

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science* le 23 septembre 1997, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

Prévoir les feux de forêts

*La composition du feuillage,
indicateur d'inflammabilité.*

Depuis 1989 et 1990, où avaient brûlé des dizaines de milliers d'hectares de forêt méditerranéenne, le feu avait épargné le Midi de la France. Les moyens considérables qui avaient été réunis pour la prévention et la lutte contre les feux (information du public, vigies et patrouilles, nouvelle flotte de bombardiers d'eau) semblaient efficaces. Pourtant, la saison 1997 restera marquée par un spectaculaire incendie qui, en 15 jours, a entièrement brûlé 3 500 hectares autour de Marseille. Pourquoi des

trophes, les deux pour cent des feux non maîtrisés produisent 90 pour cent des surfaces brûlées. Dans le département du Var, la banque de données *Prométhée* enregistre chaque année 400 à 600 feux de forêts, mais les dégâts varient considérablement : 404 hectares brûlés en 1988, 12 973 hectares en 1989, et 26 000 hectares en 1990.

Dans le massif de l'Etoile, qui a brûlé du 25 au 27 juillet 1997, le risque n'était apparemment pas élevé : la végétation avait bénéficié des pluies des semaines précédentes. Deux jours avant l'incendie, le dernier prélèvement de chêne kermès et de pin d'Alep, représentatifs de la garrigue de cette zone, révélait une concentration en eau supérieure de dix pour cent au seuil de stress hydrique, indicateur d'un risque d'incendie. Ce résultat était corroboré par les relevés réalisés à Luminy.

posant des gaz inflammables. Leur combustion dégage en outre beaucoup de chaleur.

Les proportions relatives de ces deux constituants du bois dépendent des conditions environnementales et, notamment, des quantités de rayonnement ultraviolet reçues par les arbres. Nous avons mis au point des modèles qui, à partir de l'activité solaire et des conditions de la haute atmosphère, déterminent la quantité de rayonnement ultraviolet reçu par la végétation et expliquent pourquoi de grands feux se sont produits certaines années, dans le passé. Nous tentons, de la même façon, de prévoir les prochaines années à haut risque. Dès le début de l'année 1996, nous avons exprimé nos inquiétudes pour 1997, en alertant la Délégation à la protection de la forêt méditerranéenne, sans résultat apparent. Le risque sera aussi élevé en 1999 et en 2002.

Pour passer de l'évaluation globale du risque à sa quantification spatiale, nous mettons en place un réseau de collecte d'informations météorologiques et climatologiques, et de mesures de la composition des végétaux. Nous avons ainsi sollicité plusieurs communes touchées par de grands feux entre 1985 et 1991, ainsi que le Bataillon de marins pompiers de Marseille. Même si la question de la responsabilité des départs de feux doit être soulevée, ne devrait-on pas renforcer nos méthodes de prévision ? Il n'est pas non plus inutile d'améliorer les modèles de propa-

gation d'un feu, pour mieux prévoir l'évolution de son périmètre et les moyens de lutte à mettre en œuvre, mais il serait déraisonnable d'investir des millions d'écus sur ce thème en abandonnant des pans entiers de la science du feu : biologie végétale, climatologie... On ne commande à la Nature qu'en lui obéissant.

Michel BERNARD,
Université de Provence, Marseille



Le sommet de l'Etoile domine la scène de désolation où les branches d'arbres ont quelquefois été figées par le feu, dans la posture qu'ils avaient prises sous le Mistral.

années «catastrophes», telles 1986, 1989, 1990 et 1997, entrecouperont-elles les années calmes ?

Sans contester l'importance des moyens de prévention et de lutte mis en œuvre pour la protection des biens et des personnes, force est de constater que nous arrivons à la limite des possibilités : nous maîtrisons 98 pour cent des feux qui se produisent sur le territoire, mais, lors des années catas-

Cette seule mesure de l'humidité ne prend toutefois pas en compte un autre élément essentiel à la propagation et à l'entretien du feu : le combustible. L'inflammabilité du bois et des feuillages dépend de leur composition : la lignine, constituant principal du bois, ne brûle qu'à haute température et intervient très peu dans les premiers stades de la combustion ; en revanche, les sucres, telle la cellulose, produisent en se décom-

La fureur de vivre

La théorie des jeux appliquée au comportement des délinquants.

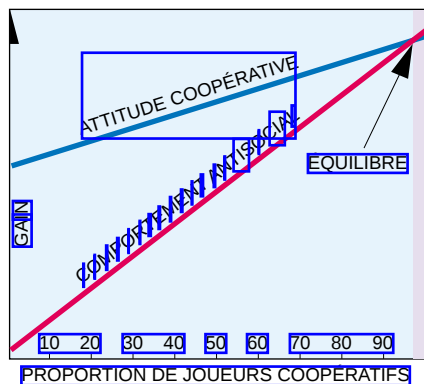
Pour diminuer la criminalité, doit-on tolérer la petite délinquance ? Andrew Colman et Clare Wilson, du département de psychologie de l'Université de Leicester, ont appliqué la théorie des jeux pour modéliser l'évolution d'une population qui comprend des individus asociaux. Ils montrent que l'on ne peut réduire le nombre d'individus asociaux en les enfermant : d'autres personnes occupent alors la « niche écologique » abandonnée. En revanche, on réduirait la criminalité en augmentant les peines.

Bien que la définition précise d'un comportement asocial varie selon les cultures, ses principales caractéristiques sont claires : rejet des normes sociales, agressivité, absence de remords, etc. Deux pour cent de la population des États-Unis, dont près de la moitié de la population incarcérée, présenterait ce comportement.

Pour modéliser le comportement des individus asociaux, A. Colman et C. Wilson utilisent un jeu analogue à celui auquel joue James Dean dans le film *La fureur de vivre* : deux voitures foncent vers un précipice et le dernier à sauter de la voiture l'emporte. De même, dans le modèle, chaque joueur peut choisir entre une attitude coopérative et prudente (attitude C), ou bien une attitude asociale et dangereuse (attitude D). Selon les attitudes relatives, les gains (avantages personnels, possibilité de se reproduire) varient (voir la figure 1). Le gain d'un joueur est maximal quand il choisit une attitude dangereuse et que son adversaire choisit de coopérer ; le gain est inférieur lorsque les deux joueurs coopèrent, et il est encore inférieur pour un joueur qui coopère tandis que son adversaire choisit l'attitude dangereuse ; enfin le gain est minimal

J1 \ J2	C	D
C	3, 3	0, 4
D	4, 0	1, 1

1. Gains dans un jeu à deux joueurs J1 et J2 qui peuvent choisir de coopérer (C) ou non (D). Par exemple, quand le joueur J1 coopère et que le joueur J2 ne coopère pas (en haut, à droite), J1 reçoit 0 tandis que J2 reçoit 4.



J1 \ J2	C	D
C	99, 99	0, 100
D	100, 0	1, 1

2. Gain moyen (en haut) d'un joueur face à une multitude d'autres joueurs en fonction de la proportion d'adversaires coopératifs (les gains des interactions pour chaque couple de joueurs sont indiqués dans le tableau). Les gains d'un joueur coopératif sont représentés par la droite bleue, et les gains d'un joueur asocial par la droite rouge.

lorsque les deux joueurs ne coopèrent pas. Ce jeu paraît adapté pour modéliser le comportement asocial, car, dans la vie quotidienne, les interactions avec prises de risques sont fréquentes. De surcroît, on est obligé de jouer, car le refus de confrontation revient à adopter une attitude prudente.

Pour modéliser correctement l'évolution d'une population comprenant une minorité d'individus antisociaux, on utilise une version de ce jeu à plusieurs joueurs. On suppose que les membres d'une communauté interagissent par paires, chaque personne interagissant soit avec tous les membres de la communauté, soit avec un échantillon choisi au hasard. En outre, on donne aux individus qui gagnent le plus la possibilité de se reproduire, c'est-à-dire d'augmenter la population avec des descendants ayant les mêmes comportements qu'eux.

Plaçons-nous du point de vue d'un joueur et considérons la proportion des autres joueurs qui choisissent l'attitude coopérative. On peut alors calculer, en fonction de cette proportion, le gain moyen d'un joueur, face à tous les autres joueurs. Selon que le joueur choisit plutôt une attitude coopérative ou plutôt une attitude dangereuse, on obtient deux droites.

Première constatation, ces deux droites sont sécantes : pour une certaine proportion de joueurs coopératifs, les gains de ceux qui sont en général coopé-

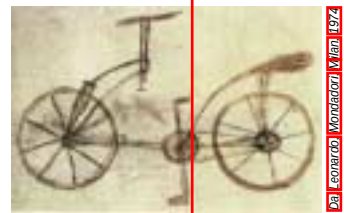
BRÈVES

Poignée de main fatale

Sur la scène d'un crime, les policiers n'auront plus besoin de rechercher des cheveux, ou de sang du criminel : Roland van Orschot et Maxwell Jones des laboratoires de la police de MacLeod, en Australie, ont montré que le simple fait de toucher un objet avec ses mains laissait des cellules dont on pouvait séquencer l'ADN. Des objets tenus par différents individus ont ainsi révélé les profils d'ADN de tous les porteurs de l'objet. De même, lors d'une poignée de mains, on échange de l'ADN. Attention à qui vous serrez la main !

La bicyclette de Léonard

Dans les années 1960, les restaurateurs du *Codex Atlanticus* de Léonard de Vinci ont découvert un croquis de bicyclette, resté caché : au verso d'une feuille volante collée dans l'album, il montre deux roues de charrettes fixées à un châssis rudimentaire, avec des pédales trop longues reliées par une chaîne à une roue dentée.



Est-ce un faux ? Il est peu probable que quelqu'un ait pu décoller certaines feuilles du *Codex Atlanticus* pour dessiner derrière. En outre, un faux reproduirait probablement une bicyclette en état de fonctionnement, et non un véhicule sans guidon et dont les pédales sont impossibles à actionner. En outre, la feuille 10 du *Codex Madrid I* contient un dessin de chaîne et de roue dentée, identique à celui qui figure sur le croquis de bicyclette.

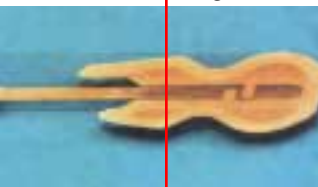
Jeune disque

Pour comprendre la formation des systèmes planétaires, les astrophysiciens recherchent, autour d'étoiles jeunes, des disques de gaz et de poussières susceptibles de donner naissance à des planètes. À l'aide d'une étude à des longueurs d'onde de quelques millimètres, une équipe américaine vient de découvrir un disque de gaz autour de MWC480, une étoile âgée de moins de six millions d'années. La masse de ce disque serait supérieure au minimum requis pour donner naissance à un système planétaire analogue au nôtre.

Suite page 22

Nanoguitare

Curieux d'explorer les limites des nanotechnologies, Dustin Carr et Harlod Craighead, de l'Université Cornell, ont



D. Carr/H. Craighead

fabriqué une guitare dont la largeur est le vingtième de l'épaisseur d'un cheveu. Pour réaliser ce mini-instrument, les physiciens ont sculpté du silicium cristallin sur un substrat à l'aide d'un canon à électrons. Puis, ils ont ôté chimiquement une partie du substrat, laissant six cordes de 100 atomes de large chacune. On joue de cette guitare avec la pointe d'un microscope à force atomique, mais l'oscillation des cordes est si faible et leur fréquence si élevée, que l'oreille n'entend rien.

Champs innocents

Les champs électromagnétiques créés par les équipements électriques ne sont pas à l'origine de leucémies infantiles. Une équipe américaine a, pour la première fois, mesuré les champs électromagnétiques auxquels avaient été exposés les enfants atteints. L'exposition dans les précédents domiciles et même celle de la mère pendant la grossesse ont été prises en compte, sans qu'aucune relation ne soit détectée.

Obésité et restauration rapide

Aux États-Unis, 33 pour cent des adultes et 20 pour cent des adolescents dépassent leur poids idéal de 120 pour cent. Le développement de la restauration rapide est souvent désigné comme coupable. C'est une erreur, selon J. Binkley, de l'Université Purdue : en comparant les données des 52 états des États-Unis, il n'a trouvé aucun lien entre le pourcentage d'obèses et la consommation moyenne de hamburgers, pizzas ou tacos.

Souvent vache variée...

Les qualités gustatives du Saint-Nectaire varient selon la race et l'alimentation des vaches. Au Laboratoire de recherches fromagères d'Aurillac, Isabelle Verdier et ses collègues ont montré que les fromages au lait de foin de seconde coupe se distinguaient de ceux réalisés avec du lait d'ensilage d'herbe ou de maïs, et un jury les a jugés meilleurs que les autres fromages. De même, les fromages réalisés à partir du lait de vaches Montbéliardes et Tarentaises ont été mieux notés que ceux produits par des vaches Holstein.

Suite page 24

ratifs et de ceux qui choisissent plutôt l'attitude dangereuse sont égaux. Ce point représente un équilibre stable : lorsque la proportion de personnes qui coopèrent est inférieure à celle du point d'équilibre, le gain moyen d'une attitude coopérative est supérieur au gain moyen d'une attitude dangereuse. La population de joueurs coopératifs se reproduit alors plus vite et, si l'on suppose que les caractères de ces personnes sont héréditaires ou imitables, leur proportion augmentera. En revanche, après ce point, le gain moyen de l'asocialité est supérieur, de sorte que la reproduction des asociaux réduit la proportion de coopératifs.

Le modèle décrit une particularité de l'asocialité qui était restée méconnue et qui résulte de la nécessaire relation entre le tableau des gains et la position d'équilibre : si la proportion

d'individus asociaux est faible, alors le gain d'une personne ayant un comportement asocial est en moyenne bien inférieur à la perte subie par ses victimes. Un voyou des rues, par exemple, gagne peu lorsqu'il agresse un passant au hasard, mais ce dernier perd beaucoup lors de cette agression (jusqu'à la vie).

De surcroît, dans l'hypothèse où ce modèle s'applique bien au monde réel, on n'éliminera pas les individus asociaux en retirant de la société un nombre croissant de délinquants, car la proportion d'individus asociaux correspond à un point d'équilibre fixé par la matrice des gains relatifs. En revanche, tout changement social ou législatif qui augmente les gains de l'attitude coopérative ou qui diminue les gains associés aux comportements asociaux réduira la proportion d'individus antisociaux à l'équilibre.

Cristal livresque

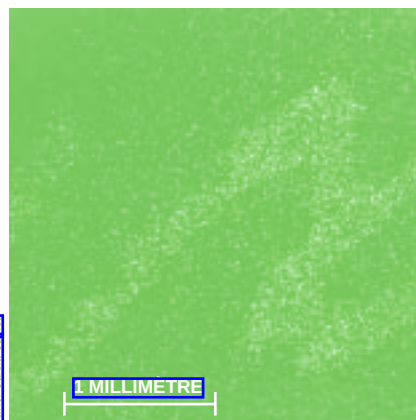
Des amas de pyrite retrouvés dans des livres anciens.

Les pyrites framboïdales sont de petits agrégats sphériques de microcristaux de sulfure de fer. Ces framboïdes sont abondants dans diverses formations géologiques, telles les veines hydrothermales ou les roches sédimentaires, mais on les trouve aussi dans des livres. Lors d'un programme de restauration d'ouvrages du XVI^e et du XVII^e siècle, Javier Garcia-Guinea et ses collègues du Muséum de sciences naturelles de Madrid ont découvert des framboïdes qui se sont formés à partir de l'encre ancienne.

On ignorait les conditions de formation des framboïdes. La détection du

mécanisme de minéralisation des pyrites, dans les livres restaurés, montre que des framboïdes de grande taille peuvent être formées à l'issue de siècles d'alternance entre des conditions riches en oxygène et pauvres en oxygène.

Les responsables du programme de restauration avaient remarqué la présence d'une poussière noire et brillante sur les coutures, entre les pages et le dos de certains livres. L'étude de cette poudre révéla qu'il s'agissait de restes d'encre solide, ce qui fut corroboré par la présence de cette même poussière sur les pages, aux endroits écrits (voir la figure 1). Cette poussière contient de nombreux cristaux, dont le quartz, l'hématite, le feldspath, le gypse, des additifs utilisés naguère pour améliorer l'aspect de l'encre. En plus de ces cristaux, les cristallographes ont découvert des pyrites framboïdales.



1. Analyse d'une page d'un livre ancien. Les poussières, visualisées à l'aide d'un microscope électronique, suivent le contour des lettres.



2. Framboïde de pyrite trouvée au cœur de livres anciens, dans des archives madrilènes.

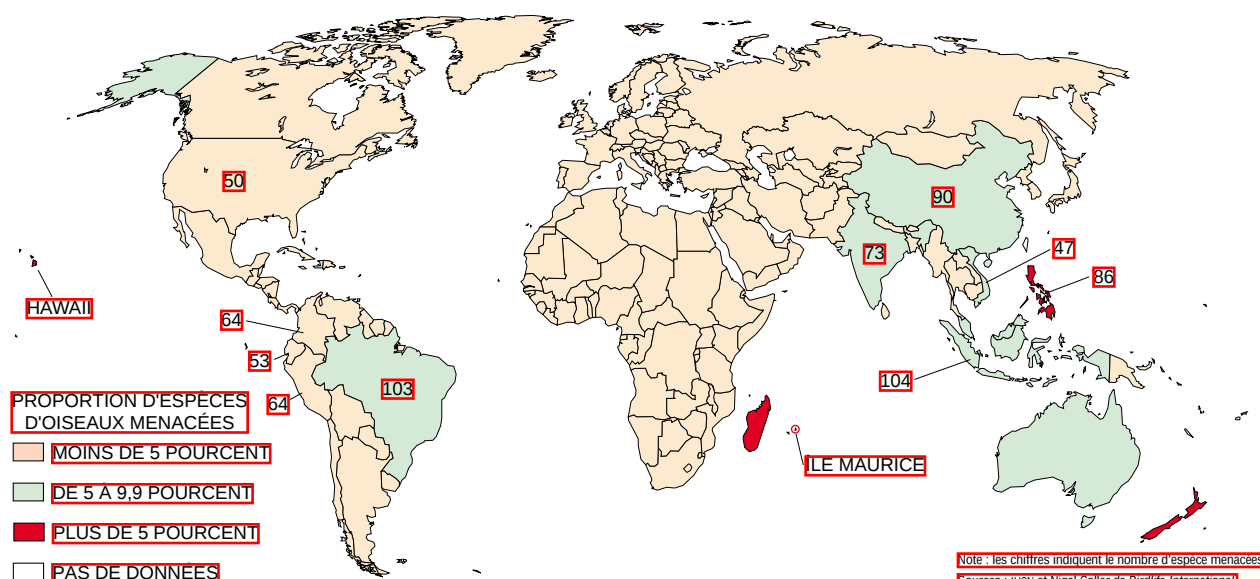
Ces framboïdes sont sphériques, avec une surface légèrement irrégulière due à la coalescence des micro-cristaux de pyrite, c'est-à-dire de sulfure de fer (voir la figure 2). Durant le stockage des livres, l'absence d'oxygène a favorisé la réduction des sulfates de fer contenus dans l'encre. Ceux-ci se sont alors transformés en cristaux de sulfure, qui se sont agrégés.

À quelle vitesse croissent ces agrégats ? Dans les milieux marins sans circulation verticale, où les eaux pro-

fondes ne sont donc pas réapprovisionnées en oxygène, des framboïdes se forment en moins de trois mois ; leur diamètre augmente de quatre micromètres par an. La grande taille des agrégats retrouvés dans les livres (140 micromètres) indique que les conditions de croissance optimales, déterminées par une très faible quantité d'oxygène, se sont maintenues durant des dizaines d'années, peut-être en raison des variations de températures à Madrid (entre -10 °C et 40 °C).

Les éléments chimiques de ces pyrites framboïdes proviennent certainement des constituants de l'encre : tannin, gomme arabique, sels de fer, additifs et solvants (les encres au fer gallique utilisées autrefois s'obtenaient par la réaction de tanins, dérivés de l'acide gallique, avec du sulfate de fer). De plus, la cellulose du papier et la gomme arabique utilisée dans l'encre alimentent des bactéries qui réduisent le fer et les sulfates. Ces bactéries contribueraient ainsi à la formation des framboïdes.

Les oiseaux menacés



Les oiseaux doivent être protégés pour plusieurs raisons, mais rappelons-nous surtout l'empereur de Chine et son rossignol ! Or, 1 107 espèces d'oiseaux, soit onze pour cent des espèces du Globe, sont en voie de disparition.

Ce constat émane de deux études publiées par le Fonds pour la nature (IUCN) et par Birdlife International, l'organisme le plus important qui s'occupe des oiseaux en voie de disparition. Les données recueillies montrent que, pour 168 espèces, la menace est grave : nous risquons de les voir disparaître de l'habitat naturel dans un « futur immédiat ».

Comme pour les autres espèces animales, le danger de disparition est supérieur dans les habitats insulaires : parmi les 104 espèces qui ont disparu depuis 400 ans, 90 pour cent vivaient sur des îles. Comme les espèces insulaires, particulièrement dans la zone intertropicale, sont souvent uniques, on ne peut éviter l'extinction par l'importation de nouveaux individus. Ces espèces sont en général sensibles à des prédateurs importés, comme les chiens et les chats, et leur habitat peut être réduit par des herbivores non indigènes, tels les chèvres. De surcroît, ces oiseaux sont sensibles aux maladies introduites. Ainsi, il n'est pas surprenant que les deux pays où le risque d'extinction est maximal soient la Nouvelle-Zélande et les Philippines. Dans ces pays, 15 pour cent des espèces sont menacées. Cependant, de toutes les îles comprenant une population d'oiseau importante, Hawaii possède, avec 33 pour cent, la proportion d'espèces menacées la plus élevée.

Des espèces sont également menacées dans les zones continentales, comme l'Amérique du Sud, où le déboisement fait rage. Bien que la proportion d'espèces menacées y soit relativement faible, cette région contient un grand nombre d'espèces d'oiseaux, de sorte que le nombre absolu d'espèces menacées est élevé (voir la carte). Les proportions importantes enregistrées en Chine et en Inde résultent probablement de la pression démographique.

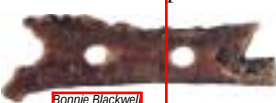
Sur les autres continents, le risque est faible, ce qui ne signifie pourtant pas l'absence d'inquiétudes majeures. En Europe, par exemple, où seulement quelques pour cent des espèces sont menacées, un quart de toutes les espèces recensées comme étant non menacées ont décliné de manière notable ces 20 dernières années.

Dans certains ordres d'oiseaux, plus de 20 pour cent des espèces sont menacées. Ainsi le faisan, la caille, le perroquet ou l'ara sont tous menacés par la restriction de leur habitat, par la chasse et par le commerce. L'albatros et le pétrel, qui se reproduisent sur de petits îlots océaniques, sont également en danger. De nombreuses espèces, telles le râle, la grue et le cagou sont menacées en raison de la longueur de leur cycle reproductif : ils sont ainsi très sensibles aux perturbations sur les lieux de reproduction et sur les zones d'hivernage. Les oiseaux chanteurs qui représentent presque 60 pour cent de toutes les espèces, tirent leur épingle du jeu : leur risque d'extinction est légèrement inférieur à la moyenne ; la leçon du rossignol a porté.

Do ré mi

Les spécialistes de la préhistoire ont étudié un os, découvert en 1995, qui pourrait être une partie de flûte utilisée par les Néandertaliens il y a 43 000 ans.

En étudiant l'espacement des trois trous, Bob Fink de l'Université de Saskatoon au Canada, a conjecturé que les trois premières notes de la gamme néandertalienne étaient *do-ré-mi*. Selon le musicologue, la flûte complète aurait jouée toute la gamme.



Bonnie Blackwell

Rhododendrons envahissants

Le rhododendron, apprécié des jardiniers, l'est moins des exploitants forestiers : il entrave le développement des jeunes plants d'arbres, tels le chêne ou le pin du Canada. Ces derniers extraient du sol les nutriments nécessaires à leur croissance grâce à une association symbiotique avec des champignons présents sur leurs racines. Une équipe dirigée par B. Clinton et O. Miller, de l'Université technique de Virginie, a démontré que le rhododendron nuit à la relation symbiotique, limitant l'alimentation des arbres et leur développement.

Canne guide

Une canne guide d'aveugle a été mise au point par une équipe du Laboratoire de robotique du Michigan. Munie d'un sonar, la canne roulante détecte les obstacles situés sur le chemin et surtout, les contourne automatiquement. Cette canne de quatre kilogrammes, est moins lourde, moins onéreuse et procure un meilleur guidage que les systèmes existants de la présence d'un obstacle.



Johann Borestein

L'odeur des tigres

La population de tigres de Sibérie a été surestimée d'un facteur deux par les recensements fondés sur le décompte des traces dans la neige que l'on aurait compté plusieurs fois. Les scientifiques ont entraîné des bergers allemands à reconnaître les odeurs spécifiques émanant de la dizaine de tigres de la réserve de Lazovsky, en Sibérie. En décomptant les traces et en les comparant aux nombres détectés par les odeurs, les naturalistes ont extrapolé cette étude au recensement des tigres de Sibérie orientale et ont estimé que la population totale s'élevait à 250 individus et non 450.

La musique des mers

Les sismologues entendent une note pure dans l'océan

Lorsque Jacques Talandier, du Commissariat à l'énergie atomique, et Émile Okal, de l'Université Northwestern, examinèrent les enregistrements sous-marins enregistrés par le réseau de stations sismiques de Polynésie française, il découvrirent avec surprise une onde acoustique monochromatique – une note pure – qui se propageait dans l'océan. Provenait-elle d'un animal? D'une expérience militaire secrète? Ces suppositions furent rapidement rejetées, et les chercheurs se perdaient en conjectures. Aujourd'hui, les géophysiciens célèbrent l'explication... mais ils auraient peut-être dû le faire plutôt, car l'ouverture d'une bouteille de champagne les aurait aidés à résoudre le mystère.

Les signaux qui attirèrent leur attention étaient composés chacun d'une seule fréquence, comprise entre 3 et 12 hertz, et dépourvus d'harmoniques (à des fréquences multiples de la fréquence du son fondamental). Ils étaient ainsi plus purs qu'une note d'un instrument de musique, laquelle, en plus de la fréquence fondamentale, contient plusieurs harmoniques (les intensités relatives des différents harmoniques distinguent une note jouée par un hautbois d'une même note jouée par un piano, par exemple). Ces ondes sonores sous-marines étaient particulièrement nombreuses et intenses en 1991 et durant les premiers mois de 1992. Chaque émission durait entre quelques secondes et plusieurs minutes. Les séismes auraient produit des signaux plus complexes, tandis que les baleines auraient émis des signaux de fréquences

supérieures, avec des variations saisonnières (les baleines se déplacent).

Bien que des signaux similaires, nommés tremblements, proviennent de magma qui se presse sous certains volcans, ils sont toujours riches en harmoniques. La pureté observée résultait-elle d'une insuffisance des instruments de mesure, qui n'auraient pas capté les signaux de fréquences supérieures? Pour s'en assurer, les géophysiciens utilisèrent des réseaux militaires de microphones sous-marins, conçus pour étudier les hautes fréquences, telles celles produites par les sous-marins : aucun harmonique ne fut décelable.

Un premier indice fut toutefois donné par la position de la source : une région peu étudiée du Pacifique Sud. D'anciens relevés indiquant la présence d'une ride volcanique en cet endroit, les sismologues demandèrent à des collègues de se rendre sur place pour effectuer de nouveaux sondages : ceux-ci révélèrent une chaîne continue de volcan, dont le sommet était situé à 130 mètres sous la surface de l'océan. Cette chaîne continue ne montrait pas de signes d'activité au moment de l'exploration, mais des échantillons prélevés contenaient de la lave solidifiée depuis peu, révélant une activité volcanique récente.

Les volcans sous-marins sont plus profonds que cette chaîne très originale, de sorte que des bulles ne se forment pas au-dessus de leur lave brûlante : en profondeur, la pression gêne la vaporisation. En revanche, dans le cas de la chaîne continue qui culmine à 130 mètres de profondeur, on observe une effervescence sous-marine : de la vapeur semble se former.

Spécialiste des tremblements, Bernard Chouet suggéra d'étudier la propagation des ondes acoustiques dans un mélange d'eau et de vapeur. Les ondes sonores, qui se propagent à 1 500 mètres par seconde dans l'eau, sont



szil rabin

D'étranges sons ont été enregistrés sous la mer. Proviennent-ils d'ondes acoustiques produites par les volcans sous-marins et piégées dans une colonne de vapeur?

considérablement ralenties en présence de vapeur, ce qui isole acoustiquement la colonne effervescente du reste de l'océan : l'effet est le même que dans une fibre optique, où les ondes – lumineuses – sont confinées.

Une telle colonne pouvait-elle se comporter comme une cavité résonante, à la manière d'un tuyau d'orgue ? B. Chouet modélisa le comportement de ces ondes sonores en présence de vapeur et il montra qu'elles montent et descendent entre

la surface de l'océan et le volcan à une vitesse fixée. De plus, l'énergie reste concentrée et la fréquence fondamentale demeure constante, quelle que soit l'étendue latérale de la colonne. Ce résonateur à bulles produirait, comme un instrument de musique, des harmoniques, mais celles-ci seraient dissipées sous forme de chaleur. Les prochaines campagnes sismiques de la région confirmeront si, tels des géants sous-marins, certaines structures volcaniques font de la musique.

Des embryons de dinosaures carnivores

Découverte d'une centaine d'œufs de dinosaures.

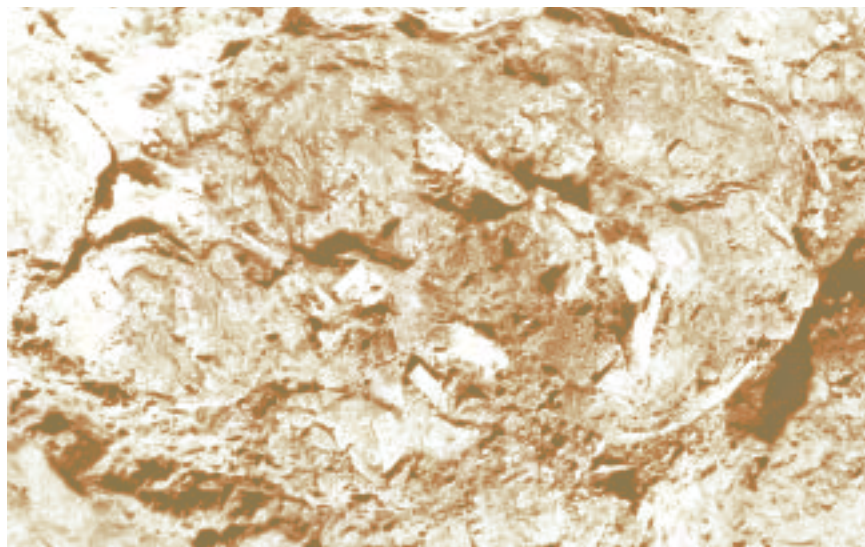
Les paléontologues traquent les œufs de dinosaures depuis plus d'un siècle. Sauf exception, ces œufs ne contiennent pas d'ossements. Pour identifier les pondeuses, on se fonde alors sur une difficile taxinomie des coquilles d'œufs. En revanche, au Portugal, des œufs contenant des os de dinosaures anciens ont permis une identification directe : les os étaient ceux de petits dinosaures carnivores, ou théropodes.

C'est après la découverte de nombreux fragments de coquilles, à Paimogo, en 1993, qu'Isabel et Horatio Mateus entreprirent la fouille d'un niveau sédimentaire datant du Jurassique supérieur (entre 140 et 150 millions d'années). En 1995 et 1996, ces fouilles révélèrent plusieurs pontes qui renfermaient une centaine d'œufs bien conservés, tandis que le lavage du sédiment livrait un grand

nombre de petits os provenant des œufs, mais aussi des restes de vertébrés contemporains des pontes.

Au Muséum d'histoire naturelle de Paris, Philippe Taquet a analysé ces œufs. Leur coquille est noire, lisse sur sa face externe et percée de pores bien visibles. La face interne est rongée, résultat, semble-t-il, d'une dissolution comparable à celle qui se produit chez les oiseaux actuels, lorsque les substances de la coquille sont utilisées pour la construction du squelette de l'embryon. Des dizaines de petits os ont été récoltés à proximité immédiate des œufs, et l'un des œufs fracturés contenait des os des membres ainsi qu'une vertèbre en place, à l'intérieur. Les caractéristiques des os et, en particulier, les arcs des vertèbres, non encore soudés à leur corps vertébral, témoignent de l'état juvénile des individus auxquels ils appartenaient.

La solidité et l'épaisseur des parois de ces os les ont fait attribuer à des reptiles. La forme des extrémités, l'allure rectiligne des fémurs et des tibias, ainsi que d'autres caractéristiques permettent d'affirmer que ces éléments osseux sont ceux d'un théropode.



Œuf de dinosaure où l'on distingue les restes osseux d'un embryon.

La découverte portugaise est exceptionnelle à plus d'un titre. C'est d'abord la première fois que l'on trouve un embryon de dinosaure en Europe. Ensuite, les œufs retrouvés ont 50 millions d'années de plus que la plupart des œufs connus. Enfin, à l'intérieur de plusieurs œufs, les restes osseux caractéristiques et liés montrent que des

embryons sont présents dans cette ponte. À l'aide de ces éléments, on a reconstitué l'histoire de ces œufs.

À Paimogo, il y a près de 140 millions d'années, des théropodes ont pondu leurs œufs dans un sol meuble, propre à l'incubation et à l'éclosion de leur progéniture. Suite à une inondation, les pontes ont été recouvertes d'un sédi-

ment qui fit périr les embryons peu avant l'éclosion des œufs. Le dégagement d'autres œufs et la comparaison avec des restes de dinosaures retrouvés récemment dans la même région devraient permettre de comparer les os des théropodes adultes à ceux des embryons et de préciser l'espèce exacte à laquelle appartiennent ces embryons.

Les petits corps du Système solaire

Une planète éloignée et un compagnon de la Terre

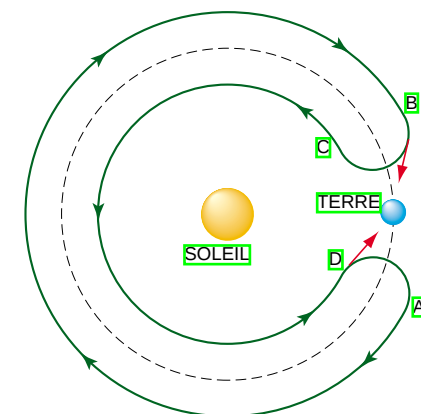
Les Grecs identifiaient les cinq astres Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne, parce que ceux-ci se déplaçaient par rapport aux étoiles : ils les nommèrent planètes, ce qui signifie «astre errant». Par la même technique de recherche, des astronomes viennent de découvrir deux nouveaux corps. L'un d'eux, 1996TL66, tourne très loin du Soleil, au-delà de l'orbite de Pluton. Le second est beaucoup plus proche, puisqu'il suit la Terre dans son mouvement autour du Soleil et peut ainsi

être considéré comme un compagnon de la Terre.

Depuis la découverte de Pluton, en 1930, les astronomes ont recherché une dixième planète à notre Système solaire. En 1992, leurs efforts ont été récompensés par la découverte des premiers objets de la ceinture de Kuiper : de petites planètes gelées situées au-delà de l'orbite de Neptune. On estime que 35 000 objets de la ceinture de Kuiper ont un diamètre compris entre 100 et 400 kilomètres. Ces objets sont beaucoup plus petits que Pluton ou que son satellite Charon (2 300 kilomètres et 1 100 kilomètres de diamètre), mais l'excentricité de leurs orbites sont semblables. C'est pourquoi les astronomes considèrent aujourd'hui que Pluton fait partie de la ceinture de Kuiper, plutôt que du cortège planétaire.

En octobre 1996, lorsque Jane Luu et ses collègues du Centre d'astrophysique d'Harvard découvrirent 1996TL66, ils pensèrent que cet objet appartenait à la ceinture de Kuiper, mais ils remarquèrent bientôt ses particularités : son orbite allongée s'éloigne à plus de 130 unités astronomiques du Soleil, soit le triple de la distance de Pluton au Soleil. De plus, cet astre réfléchit bien la lumière solaire ; c'est même l'objet le plus brillant découvert dans le Système solaire depuis la découverte de Charon en 1978.

D'où provient-il ? Selon Martin Duncan, de l'Université Queens, au Canada, il serait le premier d'une nouvelle ceinture d'objets, distincte de la ceinture de Kuiper, ayant des orbites plus allongées et inclinées par rapport à l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil). Au cours de la formation du Système solaire, des perturbations gravitationnelles avec Neptune auraient éjecté de nombreuses petites planètes présentes dans ce voisinage sur des orbites allongées et inclinées sur l'écliptique. Cette nouvelle population d'objets s'étendrait jusqu'au nuage de Oort, le réservoir de

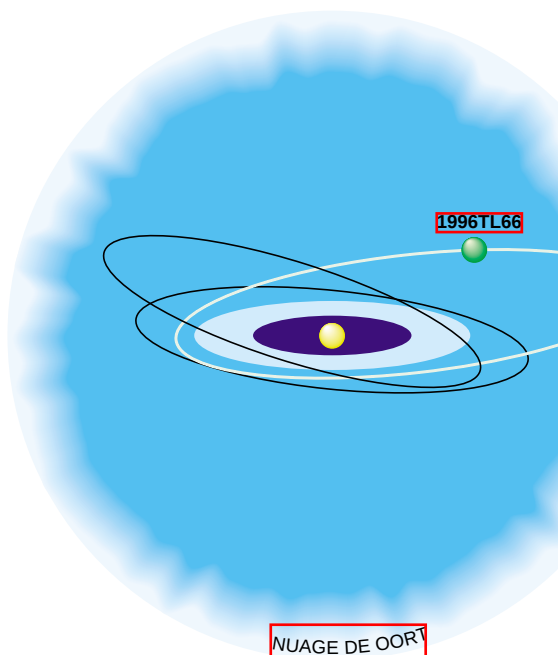


2. Orbite en fer à cheval idéalisée (toutes les trajectoires sont circulaires) du nouvel astéroïde, représentée dans un référentiel tournant avec la Terre (la Soleil et la Terre y sont fixes).

comètes qui entoure le Système solaire, à plusieurs centaines d'unités astronomiques de la Terre (plusieurs dizaines de milliards de kilomètres).

Le second objet découvert, un astéroïde de cinq kilomètres de diamètre, est à une distance du Soleil voisine de celle de la Terre, dans le disque contenant les neuf planètes. Pour représenter son mouvement, plaçons-nous dans un référentiel centré sur le Soleil et qui tourne avec une période de un an. Dans ce référentiel tournant, la Terre et le Soleil sont fixes, et l'astéroïde tourne autour du Soleil en suivant une orbite en forme de fer à cheval (voir la figure 2).

Pourquoi une telle trajectoire ? Selon la troisième loi de Kepler, la période de révolution d'un corps augmente avec le rayon de l'orbite. Ainsi, sur la partie extérieure de la trajectoire (arc de cercle AB), l'astéroïde tourne autour du Soleil sur une orbite circulaire dont la période est légèrement supérieure à un an. L'astéroïde rattrape donc la Terre et arrive au point B. Là, attiré par la Terre, il est transféré sur une orbite circulaire de rayon inférieur, dont la période est alors légèrement inférieure à un an (arc CD). Cette fois il est rattrapé par la Terre et arrive au point D, où, attiré par la Terre, le rayon de son orbite augmente. Finalement l'astéroïde rejoint le point A et l'orbite est bouclée.



1. Plus éloignés du Soleil que les planètes (qui sont dans le disque violet), des milliers de petits corps sont confinés dans la ceinture de Kuiper (disque bleu clair). Les astronomes soupçonnent l'existence d'objets aux orbites allongées et inclinées entre la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort ; 1996TL66 serait le premier de ces nouveaux objets.

Dans le référentiel «naturel» (Soleil fixe et Terre en révolution autour du Soleil) on verrait l'astéroïde rattraper la Terre sur une orbite circulaire, puis se faire rattraper par elle sur une orbite circulaire de rayon inférieur.

Ce type d'orbite en fer à cheval est très stable lorsque les parties de l'orbite sont toutes circulaires : un objet peut y demeurer durant des millions d'années sans risque de collision avec la Terre, même s'il accomplit en moyenne une révolution autour du Soleil lorsque la Terre en accomplit une. En

réalité, le compagnon actuel de la Terre possède une trajectoire plus excentrique : les parties de l'orbite ne sont pas des cercles, mais des ellipses, ce qui diminue sa stabilité. Paul Wiegert et ses collègues de l'Université York dans l'Ontario ont montré qu'un croisement pourrait se produire avec la Terre dans 2 750 ans. Cet astéroïde est le premier découvert avec une orbite en fer à cheval, mais les milliers de petits corps qui entourent la Terre contiennent peut-être d'autres objets aux caractéristiques orbitales analogues.

Parasites indicateurs

La parenté du capelan et du tacaud rétablie par leurs parasites.

Une ressemblance morphologique fait parfois conclure abusivement à des cousinages évolutifs. La similarité des parasites, en revanche, est un indicateur beaucoup plus sûr : étroitement dépendants des caractéristiques biologiques de leurs hôtes, les parasites gardent des traces de l'évolution de ceux-ci. L'étude des vers qui parasitent le capelan et le tacaud, cousins de la morue, a ainsi révisé les liens de parenté entre eux.

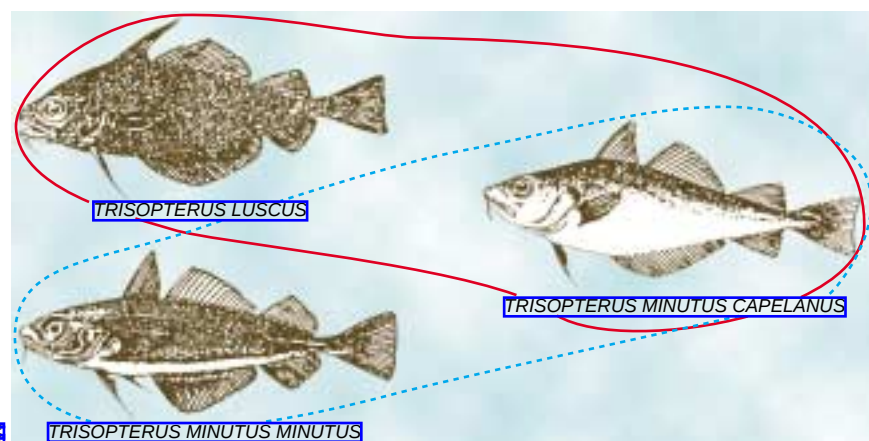
Le capelan, *Trisopterus minutus capellanus*, est un poisson osseux qui vit en Méditerranée. Ce serait une relique des dernières glaciations, où des faunes de l'Atlantique ont colonisé la Méditerranée : sur des critères morphologiques et écologiques, les zoologistes l'avaient classé comme une sous-espèce de *Trisopterus minutus minutus*, qui vit dans

l'océan Atlantique. *Trisopterus minutus minutus* est rassemblée par les pêcheurs avec une autre espèce, *Trisopterus luscus*, sous le nom commun de tacaud.

Les branchies des *Trisopterus* hébergent un parasite, ver plat du genre *Diclidophora*. La morphologie indiquait que le même ver parasitait les trois espèces de poisson, mais l'analyse génétique réalisée au Laboratoire de parasitologie comparée de Montpellier a révélé l'existence de deux espèces distinctes de vers *Diclidophora* : l'une parasite *Trisopterus luscus* et *Trisopterus minutus capellanus*, et l'autre est hébergée par *Trisopterus minutus minutus*.

Les biologistes ont alors examiné 16 gènes codant des enzymes chez les *Trisopterus*. Leurs résultats concordent avec les choix des parasites : *Trisopterus luscus* et *Trisopterus minutus capellanus* sont similaires génétiquement, et distincts de *Trisopterus minutus minutus*. La ressemblance morphologique n'est qu'une convergence, due au hasard de l'évolution.

Catherine PERRIN



Le capelan *Trisopterus minutus capellanus*, morphologiquement plus proche de *Trisopterus minutus minutus* que de *Trisopterus luscus*, est en fait une sous-espèce de ce dernier, avec lequel il partage le même parasite.

La migraine

MARIE-GERMAINE BOUSSER • HÉLÈNE MASSIOU • ANNE DUCROS

Les mécanismes de cette maladie aux multiples facettes s'éclairent et les composantes génétiques se précisent ; des médicaments mieux ciblés devraient naître des découvertes récentes.

« **C**elui qui n'a pas de Dieu, lorsqu'il marche dans la rue, le mal de tête le couvre comme un vêtement ; celui qui n'a pas de déesse gardienne, le mal de tête torture son corps. Le mal de tête, du désert il fond ; comme le vent, il fait irruption. Le mal de tête, comme de l'ouragan puissant, personne ne connaît sa marche. » Mal de tête, malédiction divine, en témoigne ce texte mésopotamien datant de quelque 6 000 ans et première évocation de la migraine.

L'histoire de la migraine se précise avec Hippocrate qui, au V^e siècle avant notre ère, souligne déjà quelques caractères essentiels de l'affection : la douleur évolue par crises et envahit soit l'hémisphère droit, soit l'hémisphère gauche ; le malade, qui ne supporte ni la lumière, ni le bruit, a des troubles visuels et digestifs : « Quand de l'eau se forme dans l'encéphale, une douleur aiguë se fait sentir aux tempes, tantôt en un point, tantôt en un autre ; la région des yeux est douloureuse. Le plus souvent, il voit comme une lumière devant ses yeux [...]. Il ne supporte ni le vent ni le soleil. Les oreilles lui tintent, le bruit lui cause de l'impatience. »

Il semble que les Égyptiens aient considéré le mal de tête comme insufflé par les mauvais esprits. C'est Arétée de Cappadoce qui, au II^e siècle de notre ère, a livré la première description détaillée (probablement une auto-observation) de la crise de migraine : « Dans certains cas, la tête tout entière est douloureuse ; d'autres fois, la douleur siège à droite ou à gauche ; parfois le point d'origine de ces accès douloureux peut varier au cours d'une même journée. C'est ce que l'on nomme l'hétérocrânie. Elle provoque des nausées, des vomissements de matières bilieuses, l'effondrement du patient : les malades sont plongés dans une

grande torpeur, ils ont la tête lourde, sont angoissés, la vie leur devient un fardeau. L'obscurité seule apaise leur mal, et ni leurs yeux ni leurs oreilles ne souffrent aisément le contact des choses agréables. Parfois surviennent des éclairs pourpres ou noirs barrant la vue ou des couleurs mélangées au point de présenter l'aspect d'un arc-en-ciel déployé dans les cieux. » Quelques décennies plus tard, Galien nommera hémicrânie ce qui deviendra migraine au XV^e siècle.

La fin de l'Empire romain et le début du Moyen Âge n'apportent guère de nouveautés sur le sujet. Durant le Moyen Âge, les principales nouveautés viennent d'Orient : Abulcasis, chirurgien arabe du califat de Grenade, au XI^e siècle, s'interroge sur la possibilité de traitements chirurgicaux appliqués à la migraine, et le chirurgien turc Charas Ed Din préconise une cautérisation au point douloureux. Avec la Renaissance, des notions nouvelles apparaissent en Europe et surtout en France : Ambroise Paré (vers 1510-1590), dont l'œuvre chirurgicale a porté ombrage aux écrits consacrés à la migraine, la décrit comme une « douleur poignante et pulsatile... Elle est si cruelle que le malade ne peut endurer qu'on lui touche la tête ; il ne peut souffrir de bruit en sa chambre, ni parler haut ni voir la clarté, ni sentir aucune chose odorante, ni faire mouvements de son corps, et estime qu'on lui rompt et lui brise la tête avec un maillet, [...] et ne peut boire de vin. »

Ambroise Paré résuma en une phrase étonnante de concision et de lucidité un mécanisme possible de la céphalée migraineuse : « La cause de cette douleur peut venir des veines ou des artères tant internes qu'externes, ou des méninges ou de la substance même du cerveau. » Ces hypothèses de

la physiopathologie de la maladie sont toujours d'actualité.

Silence et obscurité

Au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, les descriptions des différentes variétés cliniques de la migraine se multiplient, et diverses hypothèses sont proposées pour l'expliquer. C'est aussi l'époque où la migraine apparaît comme alibi féminin chez Balzac : « Voilà la migraine, vraie ou fausse [...], qui commence alors à jouer son rôle au sein du ménage. C'est un thème sur lequel une femme sait faire d'admirables variations [...]. La migraine prend à Madame quand elle veut, où elle veut, autant qu'elle le veut. Il y en a de 5 jours, de 10 minutes ou d'intermittentes. Vous trouvez quelques fois votre femme au lit, souffrante, accablée ; les persiennes de sa chambre sont fermées. La migraine a imposé le silence à tout [...]. Sur la foi de cette migraine vous sortez ; mais à votre retour on vous apprend que Madame a décampé !... Bientôt Madame rentre fraîche et vermeille : le Docteur est venu dit-elle, il m'a conseillé l'exercice et je m'en suis très bien trouvée ! » Cette conception, encore solidement ancrée dans l'inconscient collectif, a certainement accrédité l'idée d'une fausse maladie, plus propice à inspirer les romanciers que les scientifiques.

Quels ont été les traitements proposés ? Ils ont souvent allié recettes et incantations. Selon les Mésopotamiens, il fallait prendre « des racines de concombres sauvages et une toison de chevrete vierge et [lier] la tête du malade. » [...] « Le mal de tête qui est dans le corps de l'homme, qu'il soit enlevé comme un fétu. Au nom du ciel, qu'il soit exorcisé ! ». Les Égyptiens proposaient un traitement à base d'imposi-

tion des mains et d'incantations magiques associées au port d'un bandeau serré autour de la tête et à la prise d'une décoction à base de coriandre, de genévrier, de miel et d'opium. L'anatomiste anglais Thomas Willis (1621-1675) fut le premier à traiter la migraine par du café fort. Progressivement d'autres substances sont venues enrichir la pharmacopée, comme nous le verrons.

Bien que la migraine touche des millions de personnes de par le monde et qu'elle soit connue depuis des millénaires, elle est encore souvent considérée comme une fatalité, avec laquelle il faut apprendre à vivre, en attendant une éventuelle disparition après 50 ans. Pourtant, cette conception défaitiste, très répandue, ne devrait plus être de mise : les premiers gènes associés à la migraine viennent d'être identifiés et des médicaments plus efficaces peuvent aujourd'hui, sinon guérir définitivement le migraineux, du moins alléger ses souffrances en diminuant la gravité et la fréquence des crises.

Une maladie qui commence tôt

La migraine est une affection très répandue : elle touche environ 12 pour cent des adultes, surtout les femmes, deux à trois fois plus souvent atteintes que les hommes. La migraine commence avant 40 ans dans 90 pour cent des cas, et certains tout jeunes enfants (dès l'âge de un an) en souffrent déjà. Environ cinq pour cent des enfants seraient migraineux. Les garçons sont aussi souvent atteints que les filles jusque vers 12 ans, puis on observe que le nombre de cas de migraines chez les filles augmente notablement aux alentours de la puberté, ce qui aboutit à une prépondérance féminine à l'âge adulte. Des rémissions, qui peuvent durer plusieurs années, se produisent quelquefois chez l'adulte jeune, surtout chez l'homme. Toutefois, à 30 ans, 60 pour cent des patients qui ont eu des crises de migraine dans l'enfance continuent à en souffrir : la migraine est une maladie de toute la vie ; toutefois, la fré-

quence et la sévérité des crises diminue généralement après 60 ans.

La migraine est une maladie capricieuse. La fréquence et l'intensité des crises varient d'un patient à l'autre et, chez un même patient, d'une période à l'autre de sa vie. Les patients souffrent en moyenne d'une ou deux crises par mois, mais la variabilité est extrême : certains n'ont que quelques crises dans leur vie, d'autres plus de dix par mois. Chez les patients souffrant de crises de migraine avec aura, la céphalée qui suit l'aura tend à disparaître avec l'âge.

Qu'est-ce que la migraine ? Ce n'est pas n'importe quel mal de tête. C'est une maladie qui évolue par crises entre lesquelles le patient se sent parfaitement bien. Comme l'examen clinique est normal et que le médecin ne dispose pas de test biologique ni d'examen radiologique lui permettant de dire si un sujet est migraineux ou non, il fonde son diagnostic sur l'interrogatoire du patient. Il fallut attendre 1988 pour que des critères diagnostiques précis définissant la migraine soient admis par



1. LA MIGRAINE, d'après une gravure du début du XIX^e siècle.

Les symptômes de la migraine

Migraine sans aura

Hémicrânie : douleur d'un seul côté de la tête. La douleur est pulsatile et augmente à l'effort.

Photophobie : le malade ne supporte pas la lumière.

Phonophobie : le malade ne supporte pas le bruit.

Osmophobie : le malade ne supporte pas certaines odeurs.

Troubles digestifs : nausées, aversion pour toute boisson et toute nourriture, vomissements.

Durée : de quelques heures à quelques jours.

Migraine avec aura

Troubles de la vision : phosphènes (taches, éclairs ou zigzags brillants), flou d'une partie du champ visuel, scotome scintillant (flou visuel central entouré d'une ligne scintillante en zigzag).

Troubles sensitifs : sensations d'engourdissement dans les doigts, l'avant-bras, le visage.

Troubles du langage : rares, ils commencent quand l'engourdissement atteint le visage.

Ensuite, symptômes identiques à ceux d'une migraine sans aura.

la communauté scientifique internationale. D'après ces critères, il existe plusieurs types de crises de migraines. La plus fréquente est la migraine sans aura, ou migraine commune. Elle est caractérisée par une douleur qui siège en général d'un seul côté de la tête, souvent toujours le même bien que, de temps en temps, elle survienne du côté opposé, où elle est alors moins intense.

La douleur peut aussi être bilatérale, diffuse, ou seulement ressentie au front, aux tempes, à la nuque, ou même à la face. Son intensité est variable : souvent intense, obligeant à interrompre toute activité, elle est aggravée par les efforts. Elle est souvent pulsatile, battant au rythme du cœur. Elle s'accompagne fréquemment de nausées et de vomissements, ce qui n'indique pas que la migraine ait une origine alimentaire, ou qu'il s'agisse d'une « crise de foie » (terme spécifiquement français qui correspond en fait à une « crise de migraine »). Ces troubles digestifs sont fréquents et contribuent à la détresse du malade. Ce dernier ne supporte pas le bruit (il souffre de phonophobie), ni la lumière (photophobie), ni les odeurs (osmophobie) ; il n'aspire qu'au repos, au calme et à l'obscurité.

Le patient ressent parfois une grande faiblesse, des troubles de l'humeur ; il est pâle ; les artères de ses tempes font saillie ; on constate plus rarement un larmolement, une obstruction ou un écoulement nasal. La crise dure de quelques heures à quelques jours, et s'achève souvent par un vomissement ou surtout par un sommeil réparateur ; dans certains cas, le patient reste épuisé durant encore 24 à 48 heures.

Les crises de migraine peuvent être annoncées par des symptômes nommés prodromes, que chaque patient apprend à reconnaître : fatigue, bâillements, troubles de l'appétit, irritabilité, tendance dépressive ou au contraire euphorie. La migraine peut aussi survenir sans prévenir, en pleine nuit ou au petit matin. Chez l'enfant, la douleur est plutôt frontale et bilatérale, et les signes digestifs sont fréquents. La crise est généralement plus courte que chez l'adulte.

Les migraines avec aura

La deuxième variété de migraine est la migraine avec aura, ou migraine accompagnée, ou encore migraine ophthalmique. Elle est moins fréquente que la migraine sans aura, et un même individu peut avoir alternativement les deux types de crises. L'« aura » est un ensemble de troubles neurologiques qui précèdent ou accompagnent les maux de tête ; elle dure en moyenne une trentaine de minutes.

Les auras les plus fréquentes sont visuelles : la vision devient floue, le malade perçoit des formes brillantes ou colorées (nommées phosphènes) ; ou une tache noire entourée d'un bord brillant, en dents de scie, dont le diamètre s'élargit progressivement, du centre vers la périphérie (c'est un scotome scintillant) ; ou une amputation partielle, voire totale, de son champ de vision. Les deux yeux sont concernés : même quand un patient croit voir mal de l'œil droit, c'est en fait la partie droite du champ visuel des deux yeux qui est anormale. Les auras visuelles prennent parfois des allures

fantastiques, notamment chez l'enfant : l'image est inversée, grossie ou rapetissée, éloignée, morcelée.

Plus rarement, les auras sont sensitives : le patient ressent des engourdissements, des fourmillements, qui touchent généralement un seul côté de l'organisme, et qui commencent souvent dans une main pour gagner l'avant-bras, puis le visage. On constate quelques rares troubles du langage et de la motricité (faiblesse d'un bras ou d'une moitié du corps). Ces troubles suivent généralement une aura visuelle.

L'aura migraineuse s'installe en moins de 30 minutes (entre 5 et 30 minutes). Les symptômes évoluent au fil des minutes, au rythme de la « marche migraineuse » ; ils disparaissent également progressivement (nous reviendrons sur ce phénomène lorsque nous aborderons les mécanismes physiopathologiques de la maladie).

Une aura laisse généralement la place à un mal de tête, souvent moins long et moins pénible que lors d'une migraine sans aura. Dans certains cas, les patients n'ont pas mal à la tête après une aura : c'est alors une aura isolée.

Il existe d'autres formes plus rares de crises de migraine. Les auras peuvent commencer très brusquement, durer très longtemps, comporter des symptômes inhabituels tels que des troubles de la conscience, avec parfois perte de connaissance. Dans la migraine hémiplégique familiale, l'aura s'accompagne d'une paralysie complète ou partielle d'un côté du corps (une hémiplégie). Dans la très rare migraine ophthalmoplégique, les céphalées de plusieurs jours sont suivies d'une paralysie d'un des nerfs des muscles de l'œil, ce qui entraîne un dédoublement de la vision.

Chez l'enfant, certains symptômes qui surviennent par crises, tels des douleurs abdominales récidivantes, des vomissements cycliques et des vertiges, ont été considérés comme des équivalents de la migraine, diagnostic qui ne doit être porté qu'après avoir éliminé les autres causes possibles de ces troubles. Exceptionnellement, les symptômes de l'aura persistent plus ou moins durablement après une crise de migraine avec aura, en raison d'un manque d'irrigation d'une zone du cerveau.

Certains migraineux voient parfois s'installer, au fil du temps, après une période de crises fréquentes, un mal de tête quotidien, qui ne ressemble plus que par intermittence à une migraine.

Cette situation, qui survient généralement quand le patient est anxieux ou dépressif, est entretenue par un abus de médicaments destinés à soulager les crises. Le patient en prend tous les jours, dès qu'il a mal à la tête, voire avant, pour éviter la crise.

Cette surconsommation entraîne une accoutumance, avec nécessité d'augmenter les doses de médicaments, qui deviennent de moins en moins efficaces. On assiste alors à une céphalée chronique quotidienne avec abus médicamenteux. Un sevrage, parfois très pénible, est indispensable pour sortir de ce cercle vicieux.

Lorsqu'un patient décrit des crises de migraine typiques et que son examen clinique est normal, il est inutile de prescrire des examens complémentaires. En revanche, dans les formes rares où les crises sont atypiques ou bien lorsque l'examen neurologique n'est pas parfaitement normal, le neurologue demande des examens complémentaires, tel un scanner cérébral ou une imagerie par résonance magnétique. Ces examens permettent la détection de malformations vasculaires cérébrales qui peuvent provoquer – exceptionnellement – des crises d'allure migraineuse.

Les facteurs déclenchants

Divers facteurs peuvent déclencher une crise migraineuse : des facteurs psychologiques (une contrariété ou une émotion forte), des aliments (le chocolat, l'alcool...), des modifications du rythme de vie (une grasse matinée, le dimanche), un repas qui n'a pas été pris, le bruit, la lumière, un effort physique, des odeurs, etc. Pourtant, ce n'est pas parce que les crises surviennent après une contrariété que la migraine est une maladie psychologique, et ce n'est pas parce le chocolat déclenche les crises que la migraine est une maladie digestive ! En moyenne, un migraineux a quatre variétés différentes de facteurs déclenchants. Inversement, une crise migraineuse peut tout aussi bien survenir de façon imprévisible, aggravant le handicap que constitue la migraine pour la vie familiale, sociale et professionnelle.

Outre les facteurs déclenchants mentionnés, la vie hormonale des femmes agit sur le cours de la maladie migraineuse. La prépondérance féminine de la migraine n'apparaît qu'après la puberté. Environ 30 pour cent (entre



2. PHOSPHENE dessiné par un patient : au cours d'une migraine avec aura, le patient, dont la vision devient floue, perçoit des formes brillantes dans son champ visuel.

20 et 45 pour cent selon les études) des patientes souffrent de migraines menstruelles, et 5 pour cent des migraineuses ont uniquement ce type de migraines associées aux règles. Durant une grossesse, les crises de migraine s'estompent, voire disparaissent, chez près de 70 pour cent des femmes, surtout quand les crises sont menstruelles. Enfin, contrairement à une idée reçue, la migraine ne disparaît pas toujours à la ménopause et elle a même tendance à s'aggraver temporairement.

La pilule contraceptive peut modifier l'évolution de la maladie migraineuse. En cas d'aggravation ou d'apparition des migraines, l'arrêt des contraceptifs n'améliore pas toujours immédiatement les crises, lesquelles persistent parfois durant un ou deux ans ; la maladie peut même s'installer définitivement. Plusieurs études récentes ont montré que les femmes migraineuses de moins de 45 ans qui fument et qui prennent des contraceptifs oraux ont notablement plus de risques d'avoir un accident vasculaire cérébral que les femmes non migraineuses (chez qui le risque, infime, est égal à 6 pour 100 000 par an).

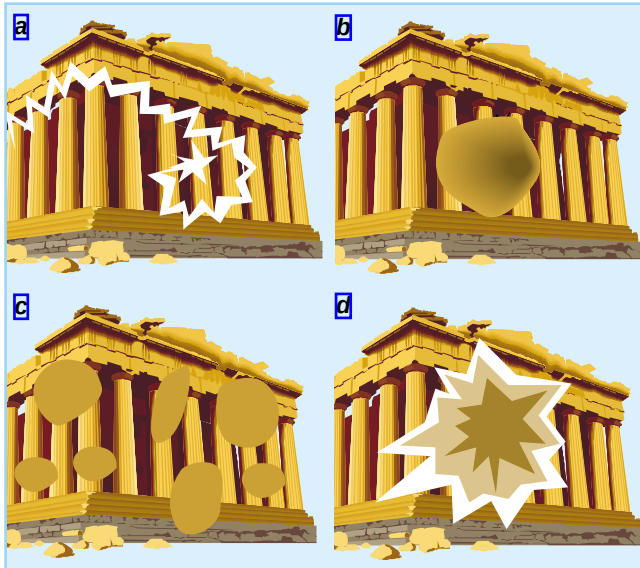
Ainsi, les femmes migraineuses peuvent prendre des contraceptifs oraux, à condition de respecter quelques règles de prudence, telles que s'arrêter de fumer et choisir les contraceptifs les moins dosés en œstrogènes. Toute aggravation des migraines sous contraceptifs nécessite de consulter un spécialiste. La consultation est souvent suivie d'un arrêt des estro-progestatifs, surtout s'il s'agit de crises avec aura.

Les mécanismes physiopathologiques

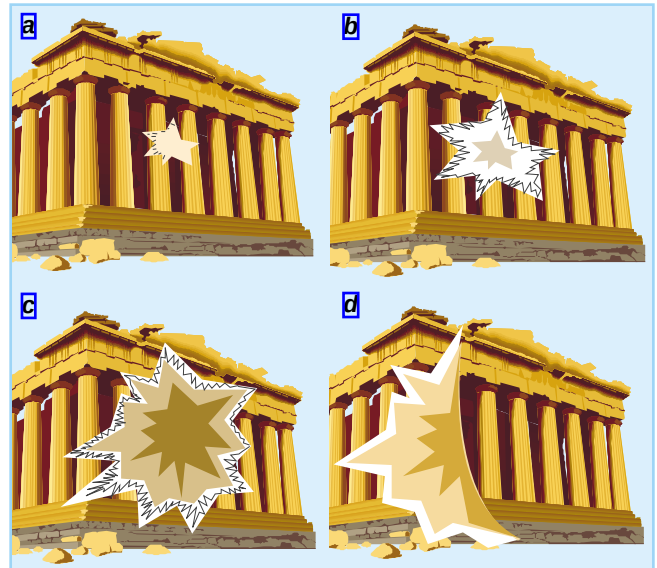
Si l'on sait diagnostiquer la migraine, si l'on en connaît bien les signes cliniques et si l'on sait souvent comment la juguler (et nous y reviendrons), on ignore encore sa cause exacte. Un point est établi : le cerveau migraineux subit des troubles de la régulation de la douleur et du tonus des vaisseaux.

On admet généralement que la céphalée migraineuse résulte d'une dilatation des artères tant à l'intérieur du crâne que sous la peau du front. Cette vasodilatation entraîne la libération de nombreuses substances, parmi lesquelles des peptides algogènes (c'est-à-dire qui déclenchent la douleur), des agents de l'inflammation et des neuromédiateurs dont la sérotonine, qui intervient dans la transmission de la douleur. Elle stimule les fibres nerveuses de la paroi des vaisseaux qui transmettent les messages douloureux. Toutefois, la sérotonine a aussi une action vasoconstrictrice, quand elle agit sur certains récepteurs localisés sur la paroi des vaisseaux (elle s'oppose alors à la vasodilatation et entraîne une diminution du diamètre des vaisseaux).

Selon le modèle de Michaël Moskowitz, à Boston, la vasodilatation pourrait résulter d'une hyperexcitation du nerf trijumeau (qui véhicule la sensibilité et la douleur sur le crâne et sur la face). En effet, chez l'animal, la stimulation de ce nerf entraîne une inflammation de la dure-mère (l'enveloppe du cerveau), qui se manifeste précisément par une vasodilatation et par la



3. QUELQUES MANIFESTATIONS d'une aura : phosphènes (a), scotome central (b), scotomes multiples (c), scotome scintillant (d).



4. UN SCOTOME SCINTILLANT, une tache masquant le champ visuel et entourée de zigzags scintillants, évolue au cours du temps (de a à d).

libération de peptides algogènes. Chez l'homme, la concentration en certains de ces peptides augmente dans le sang veineux jugulaire au moment de la crise migraineuse, du côté de la céphalée.

Les noyaux d'origine du nerf trijumeau et des fibres qui contiennent la sérotonine sont situés dans le tronc cérébral (qui relie le cerveau à la moelle épinière). Or, C. Weiller et ses collègues de l'Université d'Essen, en Allemagne, ont récemment montré, par imagerie par tomographie par émission de positons, qu'il existe une zone activée dans le tronc cérébral des patients migraineux : un «générateur de la migraine» pourrait y siéger.

Le mécanisme de l'aura migraineuse diffère de celui de la céphalée. L'aura résulterait d'une vasoconstriction (ou contraction excessive des artères cérébrales) ; le cerveau serait, localement, insuffisamment irrigué.

L'aura évolue au cours du temps. Ainsi, un scotome scintillant est d'abord une petite tache dans le champ visuel. Puis, la tache s'élargit, les scintillements sur les bords s'intensifient. La plage anormale continue à s'étendre, mais progressivement la gêne visuelle s'estompe. Or, la zone où l'irrigation est insuffisante progresse des régions postérieures du cerveau, où se trouvent les zones de la vision, vers l'avant, à une vitesse de l'ordre de deux à trois millimètres par minute. Cette progression, caractéristique de la marche migraineuse, évolue à la même vitesse que la «dépression corticale propagée». L'aura migraineuse pourrait être l'équivalent

chez l'homme de cette dépression corticale propagée décrite, en 1944, par le neurologue brésilien A. Leao : en stimulant le cerveau d'un animal par des excitations chimiques, électriques ou mécaniques, il avait observé une très brève excitation, suivie d'une grande onde de dépolarisation se manifestant par une diminution du débit sanguin cérébral et de l'activité métabolique ; or cette onde se propage à la même vitesse que la marche migraineuse.

De surcroît, certains travaux de l'équipe de M. Moskowitz montrent que cette dépression corticale (responsable de l'aura) stimulerait le nerf trijumeau et déclencherait l'inflammation neurogène, elle-même responsable de la douleur.

Parmi les autres anomalies découvertes, signalons une diminution de la concentration en magnésium dans le cerveau. Or, tout déséquilibre ionique de part et d'autre des membranes neuronales modifie le seuil d'excitabilité des neurones, ce qui peut faciliter leur décharge, c'est-à-dire la transmission d'un message douloureux : les neurones deviennent hyperexcitables. On note également une élévation de la concentration en certains neuromédiateurs excitateurs, et une formation excessive d'oxyde nitrique. Quand un patient a un «seuil migraineux» bas, peut-être déterminé génétiquement, divers stimuli internes ou externes déclenchent aisément une crise.

Quel est le lien entre toutes ces anomalies vasculaires, neuronales et biochimiques ? Quelles sont les causes et

quelles sont les conséquences du phénomène migraineux ? Ces questions restent parmi les énigmes que pose encore la migraine aujourd'hui. La découverte de nouveaux médicaments antimigraineux, dont on connaît les cibles (et sur lesquels nous reviendrons), devrait éclairer les mécanismes physiopathologiques de cette maladie.

Génétique de la migraine

La connaissance des mécanismes physiopathologiques de la maladie devrait aussi progresser grâce à la découverte récente des premiers gènes de la migraine. La migraine a un caractère familial évident, mais, bien qu'on la considère depuis longtemps comme une maladie héréditaire, aucun argument fondé n'étayait cette hypothèse. En effet, qu'une affection soit familiale ne signifie pas nécessairement qu'elle est héréditaire, car les facteurs d'environnement, tels que le mode de vie ou le contexte psychologique, peuvent jouer un rôle déterminant. De surcroît, dans le cas d'une maladie aussi répandue, la survenue de plusieurs cas dans une même famille pourrait n'être que fortuite.

Pour analyser le rôle des facteurs génétiques, on étudie notamment les familles des sujets migraineux, mais l'absence de critères diagnostiques internationaux et la difficulté de recueillir des informations comparables ont longtemps entravé ces recherches. Toutefois, si la plupart de ces études ont permis aux neurologues de suggérer que la migraine avec aura

a bien une composante génétique, le mode de transmission et les gènes impliqués restaient mystérieux.

Les progrès de la génétique ont autorisé les neurologues à aborder, il y a quatre ans, la recherche des gènes de la migraine. L'étude a commencé par celle de la migraine hémiplégique familiale. Cette maladie suit un mode de transmission autosomique dominant : il suffit qu'une seule des deux copies du gène responsable soit anormale (copie transmise soit par le père, soit par la mère) pour que le sujet porteur soit atteint et qu'il transmette la maladie à la moitié de sa descendance.

En 1993, en collaboration avec notre équipe, Anne Joutel et Elisabeth Tournier-Lasserre, de l'Unité INSERM U25, à la Faculté Necker-Enfants malades, ont localisé un premier gène de la migraine hémiplégique familiale sur le chromosome 19. Toutefois, l'étude d'autres familles atteintes a montré que ce gène n'est pas le seul en cause : il n'est pas impliqué dans la moitié des familles atteintes de migraine hémiplégique familiale.

En 1996, l'équipe hollandaise de Roel Ophoff, de Michel Ferrari et de Rune Frantz, à l'Université de Leiden, a découvert que ce gène situé sur le chromosome 19 code un canal calcique, nommé CACNL1A4. Ce canal est une protéine de la membrane cellulaire qui contrôle le flux des ions calcium et dont l'activité dépend de la différence de potentiel qui règne de part et d'autre de la membrane.

Uniquement

présents dans le système nerveux central (sur les neurones), ces canaux calciques participent à l'excitabilité des neurones et à la libération de neuromédiateurs. Bien que l'on ignore encore les mécanismes qui conduisent des altérations moléculaires à une crise de migraine hémiplégique, on suppose que les mutations de ce gène perturbent le seuil d'excitabilité des neurones et la libération de certains neuromédiateurs.

Il y a quelques mois, l'une des auteurs (A. Ducros) et l'équipe de l'INSERM ont localisé un deuxième gène de la migraine hémiplégique sur le chromosome 1. Ce gène n'est pas encore identifié, mais nous connaissons deux gènes codant des canaux ioniques (un canal calcique et un canal potassique) localisés dans la région qui contient le gène anormal. Nous cherchons actuellement si l'un de ces deux gènes est le nouveau gène de la migraine hémiplégique localisé sur le chromosome 1.

Dans certaines familles, ni le gène situé sur le chromosome 19, ni celui qui est localisé sur le chromosome 1 ne sont responsables de la maladie : il existe au moins un troisième gène pour la migraine hémiplégique familiale. Si l'on dénombre trois gènes (au moins) pour la migraine hémiplégique familiale, combien en identifiera-t-on pour les formes plus courantes de la migraine ? L'hétérogénéité génétique de la migraine

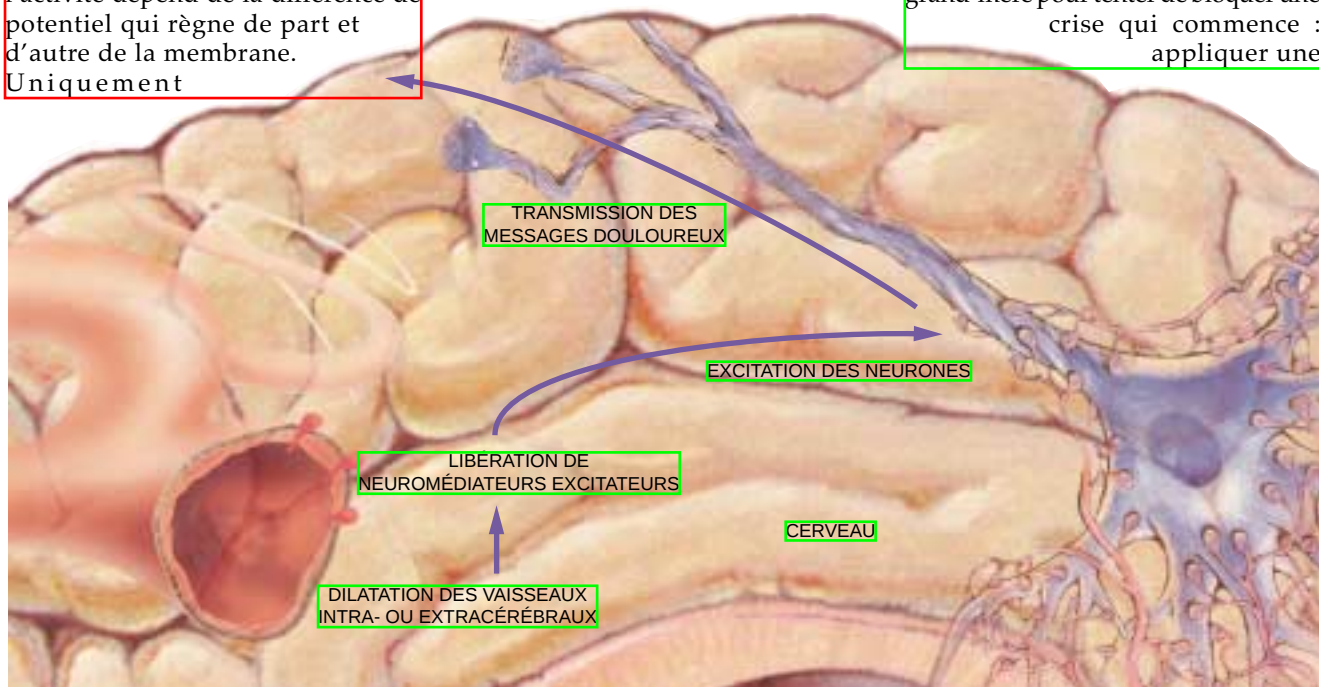
hémiplégique semble présager de la complexité des facteurs génétiques des formes usuelles de la maladie. Des recherches à grande échelle ont été entreprises : elles devraient révéler si le canal calcique du chromosome 19 et les autres gènes de la migraine hémiplégique familiale sont aussi ceux des migraines avec ou sans aura. La connaissance du produit de ces gènes et celle des conséquences physiopathologiques de leurs mutations seront les premières étapes vers l'élaboration de traitements spécifiques de la maladie.

Traitement de fond, traitement de crise

S'il est vrai qu'aujourd'hui les médecins ne savent pas guérir la migraine, ils soulagent la majorité des migraineux, grâce à une panoplie de traitements qui espacent et estompent les crises.

Généralement, le premier thérapeute est le migraineux lui-même : il modifie son mode de vie en évitant les facteurs qui déclenchent les crises, supprimant de son alimentation le vin, le chocolat, le fromage ou tout autre aliment qu'il incrimine, se levant le dimanche matin à la même heure que les autres jours de la semaine ou réduisant le temps qu'il passe devant sa télévision.

En plus de ces mesures préventives, les migraineux utilisent des «trucs» souvent hérités de leur mère ou de leur grand-mère pour tenter de bloquer une crise qui commence : appliquer une



5. LES MIGRAINES résulteraient de la dilatation des vaisseaux localisés dans le cerveau ou à la périphérie, entre le cerveau et le crâne. Au cours de cette dilatation, des substances sont libérées. Il s'agit

notamment de neuromédiateurs excitateurs activant certains neurones, lesquels émettent des messages douloureux ; ces derniers ne sont pas inhibés, car les mécanismes de rétroaction sont insuffisants.

Les traitements de la migraine

Les traitements de crise :

Les antalgiques : Aspirine, paracétamol, Optalidon®, etc. ; ils agissent contre la douleur.

Les AINS : Cébutid®, Voltarène®, Brufen®, Ponstyl®, Profénid®, Apranax®, Naprosine®, etc. ; ils agissent contre l'inflammation et contre la douleur.

Les dérivés de l'ergot de seigle : Gynergène caféiné®, Migwell® ou Dihydroergotamine® (en spray nasal ou injectable) ; vasoconstricteurs qui luttent contre la vasodilatation.

Les agonistes (5 HT_{1D}) de la sérotonine : Sumatriptan (Imigrane®) et autres triptans. Ils agissent comme la sérotonine, qui lutte contre la vasodilatation et qui inhibe la transmission des messages de la douleur.

Les traitements de fond :

Les médicaments spécifiques de la migraine : Sanmigran®, Nocertone®, Désernil®, Vidora®

Les médicaments non spécifiques de la migraine : Avlocardyl® et autres bêta-bloquants (hypertension), Sibelium® (vertiges), Laroxyl® (dépression), Dépakine® (épilepsie), Aspirine.

Acupuncture
Relaxation

compresse glacée ou au contraire bouillante sur la tempe, se frotter le front avec une boule de menthe, boire du café fort, respirer de la menthe fraîche, avaler un morceau de sucre, etc. Le plus souvent, lorsque cela lui est possible, le migraineux se couche à l'abri du bruit et de la lumière en attendant la délivrance par le sommeil. Tous ces petits moyens, bien connus des migraineux, ne sont pas toujours applicables et le soulagement est généralement instable et temporaire.

Le deuxième thérapeute est le médecin généraliste, le spécialiste n'intervenant qu'en cas d'incertitude diagnostique ou de difficultés thérapeutiques. La migraine est la compagne de toute une existence, elle touche souvent plusieurs membres d'une même famille, peut perturber la vie professionnelle, voire la vie familiale ; dans ces conditions, le médecin généraliste qui traite le migraineux pendant longtemps et qui connaît son entourage joue un rôle fondamental. Après avoir établi le diagnostic de migraine et vérifié que l'examen clinique est normal, il se consacre à l'approche thérapeutique de son patient. Il se montre rassurant, explique qu'il n'y a pas lieu de craindre une maladie grave telle qu'une tumeur ou une hémorragie cérébrale, et qu'il comprend le caractère éprouvant et invalidant de la maladie.

Aucun examen complémentaire ne peut déceler la cause de la maladie, ni une quelconque anomalie permet-

tant de confirmer le diagnostic. Quel traitement choisir ? Le médecin doit d'abord annoncer au patient qu'il ne doit pas s'attendre à une guérison totale, mais qu'il peut espérer une amélioration notable. Il existe deux traitements : celui de la crise, épisodique, destiné à interrompre la crise ou à en réduire l'intensité, et le traitement de fond, quotidien, qui vise à diminuer la fréquence des crises.

Un traitement de crise doit interrompre la crise aussi vite que possible ou, du moins, en diminuer la durée et l'intensité. On utilise quatre grandes classes de médicaments : les antalgiques, tels que l'Aspirine, le paracétamol ou l'Optalidon®, qui luttent contre la douleur ; les anti-inflammatoires non stéroïdiens (les AINS) qui inhibent l'inflammation ; les dérivés de l'ergot de seigle, dont il existe deux variétés : le tartrate d'ergotamine administré sous forme de Gynergène caféiné® ou de Migwell®, ou la Dihydroergotamine®, administrée en spray nasal ou injectable ; une nouvelle classe de médicaments, les agonistes de la sérotonine (5 HT_{1D}) dont le chef de file est le sumatriptan (Imigrane®). Ces quatre variétés d'antimigraineux de crise appartiennent en fait à deux catégories : les antimigraineux non spécifiques de cette maladie (les antalgiques et les AINS), et les antimigraineux spécifiques, qui regroupent les dérivés de l'ergot de seigle et le sumatriptan ; ces derniers ont en commun d'être des vasocons-

trictors, c'est-à-dire des produits qui diminuent le calibre des artères.

L'efficacité des antalgiques a été largement démontrée, de même que celle de certaines associations, par exemple celle de l'Aspirine et du métoclopramide (Primpéran®). Bien qu'ils soient plus utilisés aux États-Unis qu'en France, les anti-inflammatoires sont également efficaces. Qu'en est-il de la Dihydroergotamine® et du sumatriptan ?

De l'ergot de seigle au sumatriptan

Le tartrate d'ergotamine est un dérivé de l'ergot de seigle, un champignon parasite de l'épi de seigle. Cette moisissure, longtemps considérée comme un poison, a été responsable, au Moyen Âge, d'intoxications massives et d'ergotisme. Ce mal était dû à la présence d'ergot dans la farine de seigle dont on faisait le pain ; il se manifestait par une gangrène des membres. En 1883, on découvre que des extraits d'ergot de seigle soulagent la migraine. En 1918, le chimiste suisse A. Stoll isole l'ergotamine, le premier alcaloïde actif de l'ergot de seigle obtenu à l'état pur, et en 1926, l'efficacité dans le traitement de la crise migraineuse est démontrée.

Le sumatriptan est une innovation thérapeutique récente. Après avoir découvert que la concentration en 5-hydroxytryptamine, un produit de dégradation de la sérotonine, augmente dans les urines des patients au cours des crises de migraine, les biologistes ont étudié l'action de la sérotonine sur les migraines. Effectivement, l'injection de sérotonine calme les crises, mais, étant donné le nombre de cibles de ce neuromédiateur, les effets secondaires sont trop importants pour que l'on utilise la sérotonine à des fins thérapeutiques. En effet, ce neuromédiateur a plusieurs fonctions : il participe au contrôle de l'humeur, des émotions, du sommeil, de l'appétit, du comportement sexuel, de la douleur, de la vasodilatation et de la vasoconstriction !

Le sumatriptan est un agoniste spécifique des récepteurs 5 HT_{1D} de la sérotonine, c'est-à-dire qu'il reproduit les effets de la sérotonine, mais uniquement ceux qu'elle produit quand elle se fixe sur ce sous-type de récepteurs (le sumatriptan ne perturbe pas les autres effets de la sérotonine médiés par les autres sous-types de ses récep-

teurs). Il inhibe l'inflammation neurogène et a une action vasoconstrictrice directe, notamment sur les artères des méninges. Le sumatriptan est le chef de file de la famille des «triptans» (zolmitriptan, naratriptan, rizatriptan, etc) qui seront prochainement commercialisés en France.

Les divers médicaments ne doivent pas être mélangés, et ils doivent être pris le plus tôt possible, dès que le migraineux sait qu'une crise commence. Un traitement de crise ne doit jamais être prolongé, au risque de devenir dangereux : certains médicaments vasoconstricteurs entraînent des complications vasculaires, l'Aspirine et les anti-inflammatoires des troubles gastriques, etc. De surcroît, le risque de survenue d'une accoutumance existe, et un mal de tête de sevrage se déclenche entre les prises médicamenteuses : la céphalée chronique quotidienne avec abus médicamenteux est une toxicomanie.

La quête d'un traitement efficace

La majorité des migraineux gèrent la maladie avec les moyens simples évoqués et l'utilisation judicieuse des divers traitements de crise. Quand les crises sont de plus en plus fréquentes au fil des semaines et des mois, un traitement de fond tente d'empêcher leur survenue. Divers traitements de fond non médicamenteux sont proposés aux migraineux. Leur évaluation scientifique est difficile, en raison de la variabilité de la migraine et de l'importance de l'effet placebo. L'acupuncture et la relaxation ont été étudiées avec quelque rigueur, et méritent d'être essayées en cas d'échec des médicaments ou si les patients migraineux préfèrent ce type de traitement.

Plusieurs médicaments sont aussi disponibles, les uns spécifiques de la migraine tels que le Sanmigran®, le Nocertone®, le Désernil®, le Vidora® ; les autres, utilisés aussi pour le traitement d'autres maladies : l'Avlocardyl et d'autres bêta-bloquants, habituellement utilisés pour lutter contre certaines maladies cardiaques et contre l'hypertension, le Sibelium® contre les vertiges, le Laroxyl® contre les dépressions, la Dépakine® contre l'épilepsie et l'Aspirine (notamment dans les migraines avec aura).

Quel que soit le médicament retenu, le patient doit éviter d'en associer plusieurs, noter la survenue des crises,



6. L'ERGOT DE SEIGLE, (l'excroissance noirâtre sur les épis) est un champignon qui fut responsable, au Moyen Âge, de nombreuses intoxications. Depuis, on en a extrait l'ergotamine, une substance qui soulage les migraines.

augmenter très progressivement la dose de médicament pour éviter les intolérances, prolonger le traitement pendant trois mois avant de juger de son efficacité et, s'il est efficace, le maintenir pendant six mois à un an, puis essayer de l'arrêter. Ce programme de traitement doit être précisé avant la mise en route de la thérapie, sinon le patient risque de l'arrêter dès la première crise, déçu que ses crises ne disparaissent pas.

Le recours aux manipulations cervicales est fréquemment proposé aux migraineux, mais généralement sans succès. De surcroît, ces manipulations ne sont pas dénuées de risque et peuvent, exceptionnellement, provoquer un infarctus cérébral par lésion des artères vertébrales qui irriguent la partie postérieure du cerveau.

Seuls 0,5 pour cent des migraineux sont soulagés par ce type de manipulations, ceux dont la migraine est d'origine cervicale : ils souffrent de crises de migraine sans aura neurologique, déclenchées par certains mouvements du cou. Ce sont des personnes qui ont eu, antérieurement, un accident d'automobile et qui ont subi le «coup du lapin». La douleur commence invariablement en un point précis, en haut du cou, et elle remonte ensuite vers l'œil ; elle se limite toujours au même côté de la tête et s'accompagne alors des autres symptômes

de la migraine, tels que nausées et vomissements.

Certaines femmes souffrent de crises de migraine uniquement au moment des règles, le plus souvent dans les deux jours qui les précèdent. Les estrogènes percutanés soulagent ce type de migraine : on applique sur la peau un gel hormonal, Cestroge1®, que l'on fait pénétrer par massage ; on commence les applications 48 heures avant le début présumé de la crise et on continue pendant une semaine. Ce procédé évite souvent la survenue des crises liées aux règles.

Enfin, chez l'enfant, le médecin prescrit généralement des antalgiques et des anti-inflammatoires pour soulager les crises, mais pas, habituellement, de traitement médicamenteux de fond.

La migraine est une maladie fréquente et invalidante. Le diagnostic clinique est suffisamment rigoureux pour que le recours à des examens complémentaires soit presque toujours inutile. Ses mécanismes se précisent à mesure que l'on découvre des médicaments spécifiques et que l'on identifie des gènes impliqués dans la maladie. Contrairement à une opinion répandue, on peut soigner la migraine, en essayant de façon raisonnée, progressive et tenace les médicaments qui écourtent les crises et en instaurant, si nécessaire, un traitement de fond. Le pessimisme et le nihilisme thérapeutique ne devraient plus avoir cours aujourd'hui.

Marie-Germaine BOUSSER dirige le service de neurologie de l'Hôpital Lariboisière, à Paris. Hélène MASSIOU est médecin dans ce service. Après avoir fait une thèse dans l'équipe de M.-G. Bousser, Anne DUCROS poursuit ses recherches dans l'équipe d'Élisabeth Tournier-Lasserre, Unité INSERM U25, Hôpital Necker-Enfants malades, à Paris.

M.-G. BOUSSER et H. MASSIOU, *La migraine*, éditions Hermann, collection Ouverture médicale, 1992.

M. LAURITZEN et al, *Pathophysiology of the Migraine Aura*, in *Brain*, vol. 117, pp. 199-210, 1994.

C. WEILLER et al, *Brain Stem Activation in Spontaneous Human Migraine Attacks*, in *Nature Medicine*, vol. 7, pp. 658-660, 1995.

R. OPHOFF et al, *Familial Hemiplegic Migraine mutations in the Ca⁺⁺ channel gene*, in *Cell*, vol. 87, pp.543-552, 1996.

Les voiles de course

BRIAN DOYLE

Les tissus en matériaux composites mis au point pour les voiles des bateaux de course pourraient être utilisés pour les parachutes et les ballons stratosphériques.

Le 22 août 1851, le voilier *America* participe à une régate autour de l'île de Wight et l'emporte haut la main : il coupe la ligne d'arrivée quelques minutes avant un yacht plus petit, l'*Aurora*. Aujourd'hui, ce dernier serait déclaré vainqueur, car les règles incluent un handicap de manière que les petits voiliers, plus lents, ne soient pas pénalisés. Toutefois la vitesse de l'*America* était si impressionnante pour l'époque, que le trophée, la Coupe des Cent Guinées, devint la Coupe de l'*America* en son honneur.

L'*America* dut sa victoire à sa conception novatrice. Avec sa proue étroite et sa coque élancée, il fendait mieux les vagues que les bateaux britanniques plus arrondis, caractéristiques de cette époque. En outre, l'*America* arborait des voiles inhabituelles, en coton, alors que la plupart des bateaux britanniques utilisaient des voiles de lin. Bien que moins résistantes que les voiles de lin, les voiles de coton conservaient mieux leur forme sous la pression du vent. Ainsi, selon le récit de la régate publié par le *Times*, les voiles de l'*America* restèrent remarquablement tendues et plates.

Aujourd'hui, les concurrents de la Coupe de l'*America* recherchent encore les avantages apportés par les innovations techniques. D'une part, les concepteurs mettent au point des coques plus rapides, dont les plans sont jalousement gardés secrets. D'autre part, les ingénieurs trouvent sans cesse de nouveaux moyens de renforcer et d'alléger les voiles. Ils ont ainsi perfectionné leurs formes et mis au point des textiles peu extensibles. Les toiles les plus récentes sont constituées de couches de fibres résistantes et de minces films en plastique. Ces voiles en matériaux laminés ont changé les courses.

Sharon Greer

1. LES VOILES EN MATERIAU LAMINE, constituées de minces films plastiques et de couches de fibres résistantes comme le Kevlar, sont plus légères et se détendent moins que les voiles en tissus classiques. Ces deux propriétés augmentent la vitesse des bateaux : le poids total du bateau est réduit, et la voile conserve mieux sa forme aérodynamique. La voile tridimensionnelle en laminé (3DL) présentée ici est constituée de fibres résistant à la traction placés dans la direction des contraintes qui s'exercent sur la voile lors de son utilisation. On minimise ainsi le poids de la voile tout en lui conférant une solidité optimale en chaque point.





ΑΕ

3Α

Le fonctionnement d'une voile

Chacun comprend le déplacement d'un voilier par vent arrière. La brise soufflant sur la voile exerce une force qui pousse le voilier. Pour produire une puissance maximale dans ce sens, les marins orientent les voiles perpendiculairement au vent et ajustent leur forme (schémas de droite).

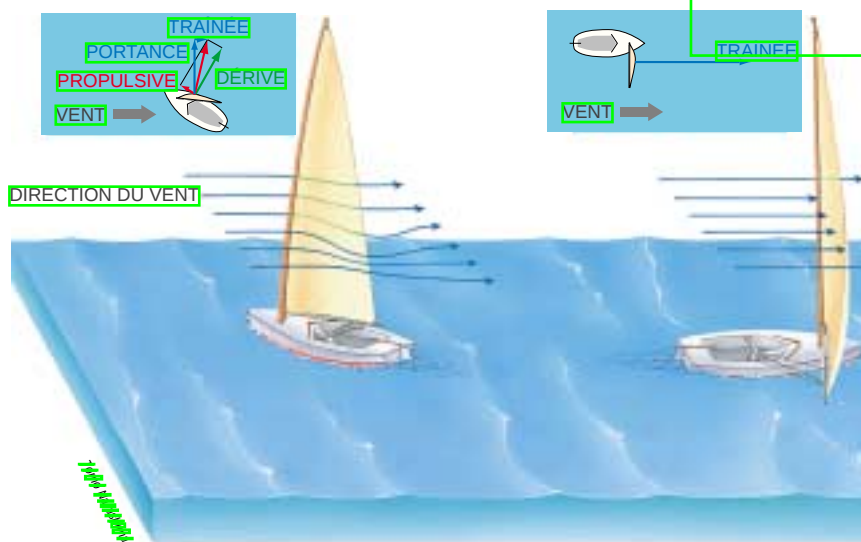
Avancer contre le vent est un peu plus compliqué. Livrés à eux-

mêmes, de nombreux bateaux s'orientent face au vent et restent sur place. En cas de vents forts, ils peuvent même se bloquer et être «bout au vent». Un voilier ne peut progresser dans la direction du vent, car les voiles ne se gonflent pas (les sortir d'un côté ou de l'autre ne sert qu'à faire reculer le voilier, ce qui n'est d'aucune utilité, sauf si vous êtes bout au vent et que vous n'avez pas d'autres solutions). Un voilier peut cependant remonter au vent jusqu'à un angle de 35° environ, si les voiles sont orientées de façon à produire une

portance.

Le vent crée une portance autour d'une voile de la même manière qu'autour d'une aile d'avion. La voile dévie le vent, de sorte que la pression diminue le long de sa surface externe et augmente le long de sa surface interne. La différence de pression entre les deux côtés crée une force de portance, perpendiculaire à la voile (schémas de gauche).

Le vent crée également une force de traînée sur la voile. La force aérodynamique totale s'exerçant sur la voile résulte de la combinaison de la



nautiques et sont utilisées dans d'autres domaines. De ce point de vue, l'invention de deux entrepreneurs suisses mérite une attention particulière.

Il y a sept ans, Luc DuBois, géologue, et Jean-Pierre Baudet, fabricant de voiles, inventèrent un ingénieux système de moulage des voiles laminées en une seule pièce. La suppression de l'opération de coupe permet d'obtenir des voiles sans coutures, moins sujettes à l'étirement. Les couches extérieures en plastique sont collées (le matériau est fourni en rouleau de un mètre et demi de largeur) pour former une membrane couvrant toute la surface du moule. Entre ces films plastiques, les fibres du tissu courent d'un angle à l'autre pour former l'armature de la voile. Leur disposition prend en compte les forces dues au vent : l'étirement est minimisé parce que les fibres solides sont orientées dans la direction des contraintes. La voile conserve ainsi, à l'emploi, une forme optimale. Dès leur apparition, ces voiles tridimensionnelles laminées (3DL) ont surpassé toutes les autres. Aujourd'hui, des ingénieurs de l'aéronautique envisagent d'utiliser ces membranes composites souples pour les parachutes et pour les enveloppes de ballons stratosphériques.

Des performances accrues

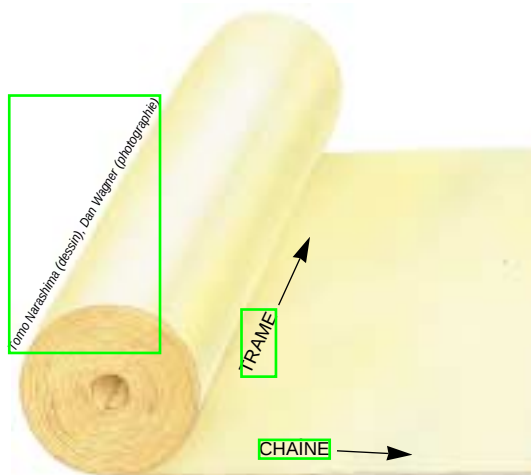
On pense souvent, à tort, que les voiles se distendent pour prendre leur forme optimale. En fait, les fabricants de voile rêvent d'une extensibilité minimale des tissus. Ce n'est qu'en considérant les voiles comme inextensibles qu'ils peuvent concevoir des voiles aux formes précises une fois gonflées par le vent : une voile doit se courber et se vriller de manière que l'air qui passe crée une portance, comme sur une aile d'avion.

L'efficacité d'une forme de voile dépend des conditions d'utilisation. Pour remonter au vent, il faut des voiles plates ; pour naviguer par vent arrière, une voile plus creuse donnera plus de puissance. Les voiles plates sont plus rapides par vent fort, tandis que les performances des voiles plus grandes et plus creuses sont meilleures par vent faible. Pour répondre à ces différents besoins, les fabricants créent des voiles spécifiques, adaptées aux diverses conditions de vent.

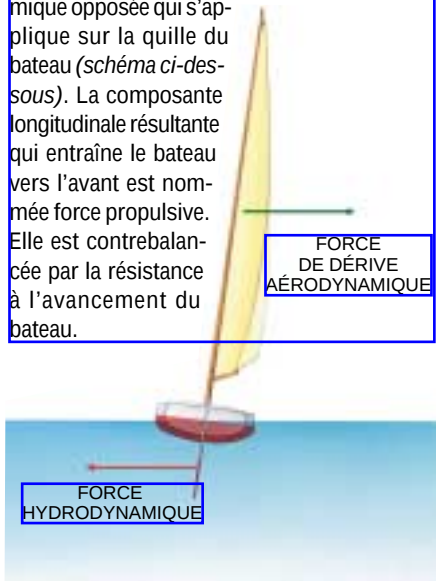
Pendant des siècles, dans les voileries, les artisans ont cousu des pièces de tissus coupées en bandes nommées laizes pour produire des voiles de formes et de tailles variées. Les laizes ont des bords légèrement incurvés,

de sorte qu'une fois assemblées et fixées au gréement, les voiles aient un léger creux.

L'une des caractéristiques principales d'une voile est sa courbure globale, ou cambrure (voir l'encadré de la page 45). De plus, les ingénieurs choisissent en quel point de la voile il faut placer le creux maximal, ou point vélique. En principe, le vent augmente et change de direction à mesure que l'on s'élève au-dessus de l'eau. Aussi, pour s'assurer que l'angle entre la direction du vent et la voile reste constant



portance et de la traînée. Cette force aérodynamique totale est orientée légèrement vers l'avant du bateau, d'autant plus que la forme de la voile est performante. La composante latérale de cette force, la dérive (flèche verte), est contrebalancée par une force hydrodynamique opposée qui s'applique sur la quille du bateau (schéma ci-dessous). La composante longitudinale résultante qui entraîne le bateau vers l'avant est nommée force propulsive. Elle est contrebalancée par la résistance à l'avancement du bateau.



sur toute sa longueur, un vrillage de la voile est nécessaire.

Alors que la plupart des autres surfaces portantes, telles les ailes d'avions, sont rigides et ont donc une forme fixe,

les forces externes (dues au vent et au gréement) et la coupe d'une voile déterminent sa forme. Or la forme de la voile détermine l'écoulement de l'air. Les concepteurs de voiles se sont longtemps heurtés à cette interdépendance de la forme de la voile et de l'écoulement de l'air. Avec l'informatique, le calcul des différents paramètres d'une voile s'est considérablement simplifié. À l'aide d'un programme géométrique, on calcule d'abord sa forme statique, puis, en tenant compte des caractéristiques mécaniques de la voile, on calcule les modifications de cette forme qu'entraînent le vent et la tension du gréement. On compare cette forme dynamique à la forme idéale que doit avoir la voile pour être le plus efficace possible. Si la forme dynamique diffère trop de la forme idéale, on modifie la voile initiale et l'on recommence le calcul.

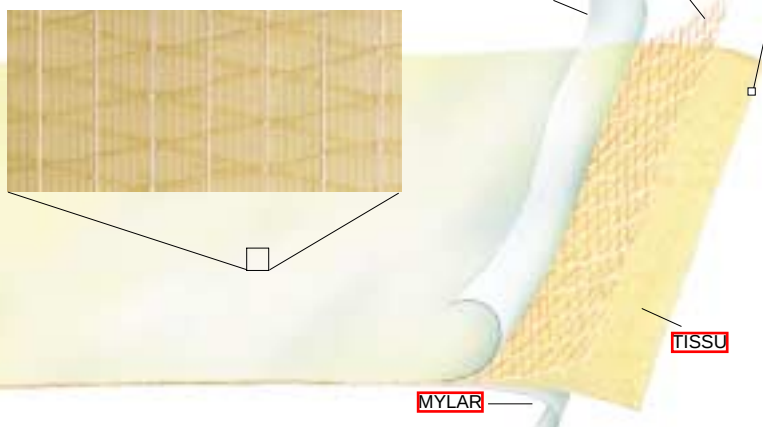
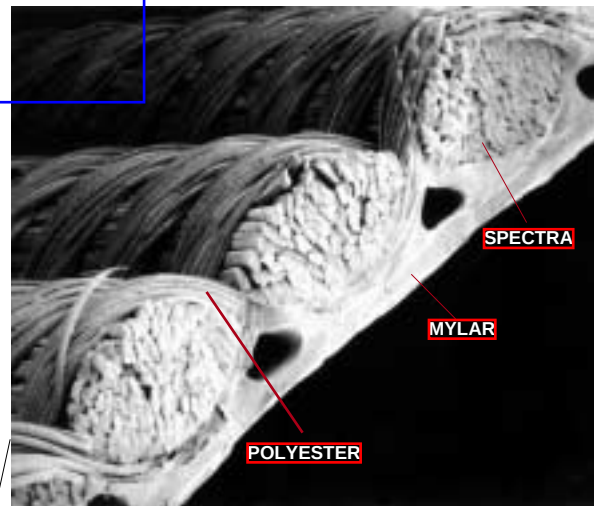
Grâce aux ordinateurs, les concepteurs prévoient également la construction d'une voile de la dimension voulue en utilisant un moule virtuel. Cet outil informatique aide à la détermination de la forme et de la configuration des différentes laizes de la voile. Un programme spécialisé permet également de calculer la courbure des coutures d'assemblage des panneaux. Les fabricants utilisant des

systèmes récents entrent directement ces données calculées dans des ordinateurs qui pilotent des coupeuses, d'où résulte une accélération de la fabrication de voiles plus précises.

Un poids réduit

Ayant décidé du mode d'assemblage des diverses pièces d'une voile, le concepteur doit choisir le type de tissu. Celui-ci devra être le plus léger possible, car les performances du bateau en dépendent. Par vent faible, les voiles se déforment sous l'effet de leur propre poids. En outre, les voiles lourdes contribuent au «moment de gîte», ce qui nécessite, pour éviter le chavirement, d'équilibrer le poids des voiles et du mât par une quille plus massive. Des voiles légères permettent donc d'alléger les bateaux, qui seront ainsi plus rapides. Sur une mer agitée, des voiles lourdes accroissent également le moment d'inertie, ce qui augmente l'enfoncement de la proue dans les vagues et ralentit la progression (même les voiles de réserve augmentent le poids ; c'est pourquoi, en course, l'équipage cherche toujours à les regrouper vers le centre du bateau). Enfin

	Résistance à la rupture relative	Module d'élasticité relatif	Nom générique
Polyester Vectran	1,0 2,9	1,0 6,0	Polymère de cristaux liquides Aramid Polyéthylène au poids moléculaire élevé
Kevlar Spectra	3,1 4,5	9,0 11,8	
Carbone PBO	2,8 5,3	15,0 22,0	



2. LES TOILES DES VOILES MODERNES sont composées de plusieurs couches de films plastiques, de fibres et de tissus (photographie de gauche). En général, une couche de tissu et une toile de fibres sont prises en sandwich entre deux films dont les chaînes de polymères sont orientées, le Mylar (schéma de gauche). Dans le tissu, les fils de chaîne (longitudinaux) sont parfaitement rectilignes à l'échelle microscopique (micrographie ci-dessus). Les fibres de renforcement principales sont constituées de matériaux résistants, tels que le Kevlar, le Spectra ou le carbone. En fabriquant des voiles en toiles composites, les ingénieurs alignent des panneaux de manière que les fils de chaîne du tissu et les fibres de renforcement supportent l'essentiel des forces s'exerçant sur la voile. Les fibres de renforcement secondaires s'entrecroisent avec les fibres primaires et protègent ainsi la voile contre les dommages qu'occasionnent les efforts qui s'exercent lorsque la voile claqué au vent lors des manœuvres.

l'équipage manipule des voiles légères plus rapidement, plus efficacement et avec un risque d'accroc moindre. Malgré cela, on ne peut trop alléger les voiles, sans risque de déformation et de déchirement.

Depuis longtemps déjà, on cherche à mettre au point des matériaux à la fois légers et résistants. Les artisans voiliers utilisèrent des tissus de coton et de lin bien avant la victoire de l'*America* en 1851, jusqu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale. Puis, au cours des années 1950, ils abandonnèrent les fibres naturelles au profit des nouveaux textiles synthétiques comme le polyester et le *Nylon*. Lorsque l'on cherche la durabilité à faible coût, on utilise des voiles principales et des focs (petites voiles situées à l'avant du mât) en fibres de polyester tissées très serrées. Les spinnakers, ces voiles triangulaires, légères et creuses, utilisées pour naviguer par vent arrière, sont très souvent en *Nylon* léger ou en polyester.

La plupart des voiles de course modernes sont toutefois constituées de matériaux laminés souples encore plus légers. Ces toiles composites comprennent plusieurs couches de tissu, des fibres de renforcement telles que le *Kevlar* (utilisé pour les gilets pare-balles) et du *Mylar*, un film de polyester (*Mylar* et *Kevlar* sont des marques déposées de la Société Du Pont de

Nemours). Grâce à des techniques de tissage adaptées, les fabricants veillent à ce que les fils principaux soient rigoureusement droits. Des fibres de renforcement confèrent à la voile davantage de résistance à la traction, et le film de *Mylar* assure la liaison, tout en résistant au cisaillement. En sélectionnant chaque couche, les artisans voiliers choisissent les propriétés mécaniques des matériaux composites créés et, en particulier, la résistance du tissu à l'étirement et à la déchirure, deux paramètres essentiels de la voile. La limite élastique est un paramètre crucial, car même si, au-delà de ce seuil, les voiles ne sont pas déchirées, elles sont irrémédiablement déformées.

Du Kevlar au carbone

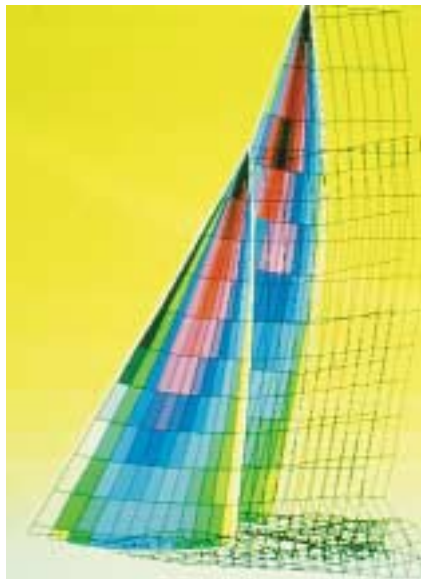
Au fil des ans, les concepteurs ont utilisé divers types de fibres, avec plus ou moins de succès. Les couches de renforcement en polyester apparurent dans les années 1970. Puis on essaya le *Kevlar*, qui venait d'être mis au point. Les premières tentatives échouèrent, car les fabricants de voiles et de tissus pour voiles n'étaient pas habitués à travailler des fibres aussi solides, mais intrinsèquement cassantes. Les tissages obtenus étaient auto-abrasifs : les fibres de *Kevlar* qui se croisaient et s'usaient mutuellement. En outre, certaines

La courbure et le vrillage des voiles

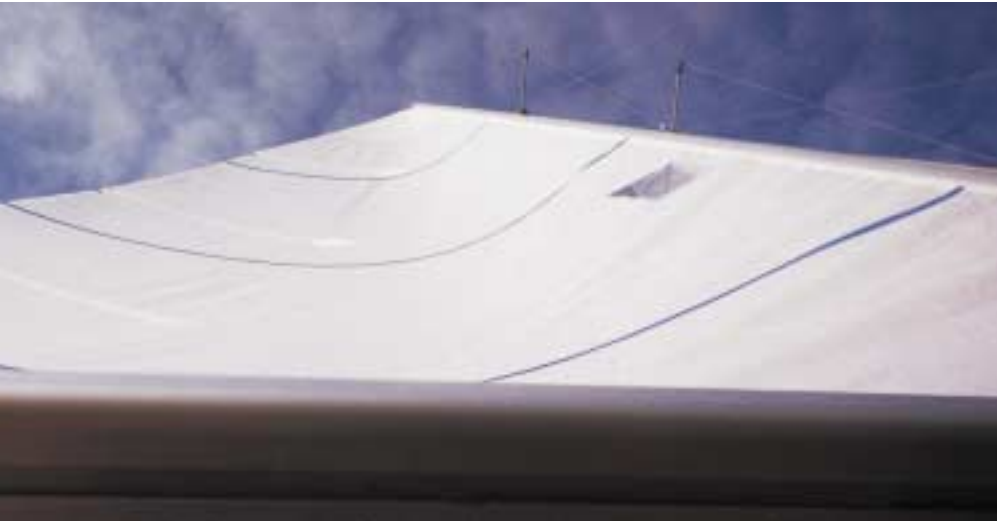
des premières voiles renforcées au *Kevlar* étaient si solides qu'elles pouvaient arracher le gréement.

Durant les années 1970 et 1980, les concepteurs continuèrent à expérimenter le *Kevlar*. Pour supprimer l'abrasion des voiles uniquement en *Kevlar*, ils essayèrent d'autres types de fibres de renforcement, ainsi que des revêtements pour les fibres. La solidité du matériau fut compensée par une meilleure répartition des contraintes qui s'appliquent sur les voiles. Les constructeurs de bateaux apprirent aussi à renforcer gréements, afin que ceux-ci résistent à des efforts supérieurs. Finalement des voiles en *Kevlar* très efficaces apparurent. Ainsi, en 1980, un bateau équipé d'une voile principale en matériau laminé renforcé au *Kevlar* remporta la Coupe de l'*America*, et, en 1983, lorsque les États-Unis perdirent la Coupe, le gagnant australien avait utilisé ce composite au *Kevlar* pour l'ensemble des grand-voiles et des focs.

Le renforcement au *Kevlar* n'était toutefois pas encore tout à fait au point. En 1987, à Freemantle, en Australie, un vent très fort et une mer agitée attendaient les concurrents de la Coupe de l'*America*. La plupart des concepteurs pensaient que le matériau laminé au *Kevlar* serait performant dans de telles conditions, mais ces voiles, qui avaient coûté plus de 150 000 francs, ne résistèrent que quelques heures. Personne ne sut tout d'abord expliquer cet échec, car les matériaux utilisés avaient des limites d'élasticité suffisantes pour supporter les vents prévus. Toutefois on découvrit vite que les efforts aléatoires, dont personne n'avait tenu compte, étaient responsables : les voiles résistaient bien lorsque le vent les gonflait, mais s'endommageaient quand elles fasaient ou lorsqu'elles battaient, au cours des manœuvres. Pour remédier à cette situation, les concep-



3. LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR a révolutionné la fabrication des voiles. Certains programmes calculent une répartition approximative de la pression de l'air sur la voile au cours de son utilisation, en fonction de sa forme et de ses caractéristiques mécaniques (à gauche). Les couleurs chaudes correspondent à des pressions élevées. En tenant compte de ces forces, le programme révisé ensuite la forme de la voile et recommence l'ensemble des calculs jusqu'à la convergence vers la voile optimale. Grâce à ces résultats, les ordinateurs permettent aux concepteurs de voiles de déterminer comment couper et aligner les diverses pièces de tissus, comment assembler les panneaux et les renforcer pour créer la surface portante désirée (à droite).



La manière dont une voile tourne et se vrille au vent aide à définir sa forme tridimensionnelle. La courbure, ou cambrure, de la voile est un paramètre important. Les fabricants de voiles photographient souvent les voiles par dessous pour mieux faire ressortir leur courbure (à gauche). La zone de courbure maximale (ou partie de la voile présentant le creux maximum) détermine en partie la puissance que peut développer la voile (schéma du bas). Un autre paramètre crucial pour une voile est son vrillage (les deux schémas du haut). En principe, plus on s'élève au-dessus de l'eau, plus le vent est fort et change de direction. Grâce au vrillage de la voile, l'angle sous lequel le vent frappe la voile reste constant.

teurs de tissus pour voiles ajoutèrent au composite une seconde couche de renforcement avec des fibres croisées par rapport aux fibres primaires supportant les efforts.

Le Kevlar reste la fibre la plus couramment utilisée pour les voiles de bateaux de course, mais bien d'autres matériaux ont été adoptés dans des cas spécifiques. La fibre Spectra, produite par la Société Allied Signal, est un matériau en polyéthylène qui apparut vers le milieu des années 1980. Plus résistant que les autres matériaux de hautes performances, il dure en général plus longtemps. Néanmoins, comme il se détend progressivement sous l'effet des contraintes, on utilise des tissus plus lourds, qui se détendent moins ; c'est pourquoi on limite l'utilisation de cette fibre aux bateaux de croisière dont la durabilité prime sur la performance.

Le Vectran, un polymère de cristaux liquides mis au point récemment par la Société Hoechst Celanese, était initialement trop cher, excepté pour les bateaux de course les plus spécialisés. La baisse progressive de son prix le rend maintenant accessible aux plaisanciers. La fibre de carbone fit son apparition dans les tissus laminés lors de la préparation de la Coupe de l'America de 1992. Le carbone pèse environ 40 pour cent de moins que le Kevlar pour une résistance égale, mais il est trop cassant et difficile à incorporer dans les tissus des voiles. En s'usant, les premières voiles à fibres de carbone laissaient sur le pont une sorte de suie noire. Aujourd'hui encore, le coût élevé et la fragilité de la fibre de carbone limitent son utilisation aux bateaux les plus chers.

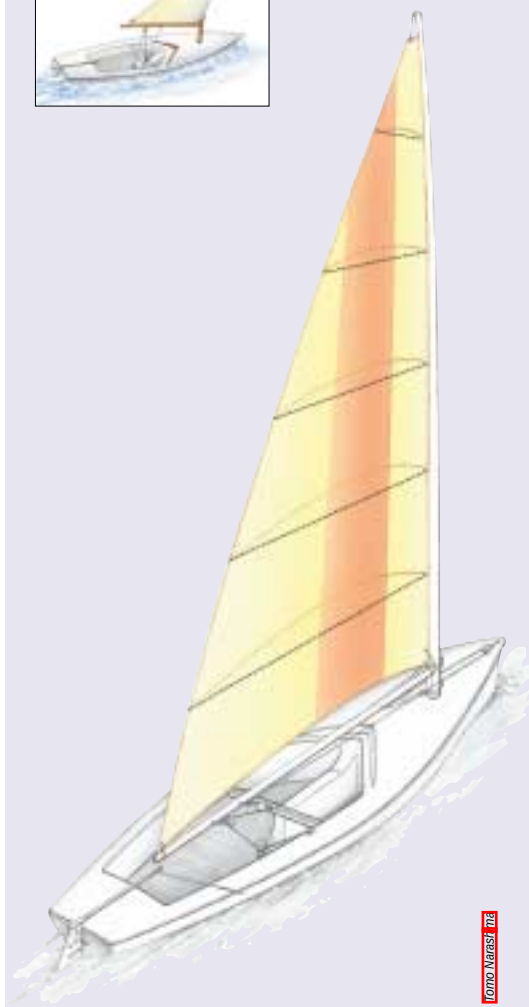
Durant les années 1980 et jusqu'au début des années 1990, les tissus laminés se sont constamment améliorés, mais les techniques de fabrication des voiles ont pris du retard. Les fabricants ont continué à couper, à coudre

ou à coller les nouveaux composites laminés renforcés par des fibres, compromettant ainsi leur résistance exceptionnelle par l'introduction de raccords fragiles. Alors que les performances mécaniques des tissus augmentaient, il devenait de plus en plus difficile de réaliser des coutures suffisamment résistantes. C'est pour y remédier que L. DuBois et J.-P. Baudet ont inventé leur nouvelle technique de fabrication, le 3DL. La technique est simple : en donnant à la voile sa forme et en façonnant le film de composite sur des moules préformés, on élimine toutes les coutures.

Des structures plus solides

En 1990, ils présentèrent le concept à la Société North Sails, où j'étais consultant. Le projet était séduisant, mais se heurtait à des difficultés de mise en œuvre. Les voiles étant pratiquement toujours faites sur mesure, les moules, dont certains seraient gigantesques, devraient être transformables facilement et rapidement. Les bords des voiles attachés au gréement devraient comporter des parties correspondant aux points de fixation des mâts. Pour que la profondeur du moule soit réglable, il fallait donc que sa surface varie en longueur entre ces points fixes. De surcroît, le robot utilisé pour appliquer les fibres sur le moule devait «reconnaître» la forme du moule pour ne pas le heurter. Enfin, le système de collage et de feuillette devait être compatible avec le reste du processus.

Malgré ces difficultés, la Société North Sails invita les inventeurs à montrer la faisabilité de leur idée et leur fournit un local et un financement. Ils construisirent un moule en contre-plaqué et, suspendus au plafond par un harnais mobile, posèrent les fibres à la main. Il leur fallut près de trois semaines pour



4. LA FABRICATION 3DL (à droite) est plus complexe que l'ancienne méthode de coupe et de couture (ci-dessous). Les concepteurs définissent tout d'abord la forme d'une voile à l'aide d'un ordinateur. La machine transmet les paramètres à de petits moteurs situés sous un moule géant pour lui donner la forme désirée. On dépose ensuite une couche de Mylar. Les ouvriers suspendus dans un harnais mobile vérifient l'absence de plis ou de déchirures dans le film de plastique. Puis un portique applique les fibres de renforcement dans le sens des contraintes qui s'exerceront sur la voile. On étend ensuite une seconde couche de Mylar et l'on crée un vide entre les deux films pour coller le feuillette.



terminer leur première voile : elle était si légère et si solide que la Société *North Sails* décida de construire la première installation fondée sur ce principe, dans l'espoir de fabriquer les voiles pour la Coupe de l'*America* de 1992. L. DuBois et J.-P. Baudet travaillèrent secrètement avec une petite équipe d'ingénieurs et de techniciens sur l'usine prototype et parvinrent à monter une usine avec deux moules surmontés d'un portique équipé d'outils robotisés.

La production en une seule fois de toutes les pièces se révéla délicate. Ainsi, il fallait sans cesse coordonner les ordinateurs qui commandaient les moules et le portique. Même lorsque les fils étaient disposés correctement, le feuillette échouait souvent, gâchant ainsi une voile entière. Le système de plastification consistait à créer un vide entre les films pour les presser ensemble sans bulles. Le moindre trou dans le Mylar empêchait de faire le vide. On parvint finalement à produire des voiles utilisables, mais trop tard pour la Coupe de l'*America* de 1992.

Après cette usine prototype, la Société *North Sails* construisit une usine de plus grande production. Située dans le Nevada, cette seconde usine produit maintenant des voiles depuis près de deux ans. Pour fabriquer une voile, le concepteur définit d'abord, à l'aide

d'un ordinateur et d'un logiciel spécialisé, la forme désirée pour le produit fini. L'ordinateur commande les mouvements des moteurs qui ajustent la surface d'un énorme moule en bois (dont la surface totale peut atteindre 300 mètres carrés) de façon à prendre la forme souhaitée. On dépose d'abord sur le moule une feuille de Mylar qui épouse sa forme.

Un portique géant dispose ensuite les fibres de renforcement suivant un schéma préétabli. Ces dernières sont recouvertes d'un adhésif à mesure qu'elles sont déposées, afin d'être maintenues en place. Les fibres suivent des trajectoires courbes correspondant à la direction des contraintes auxquelles la voile sera soumise. On produit ainsi des voiles en utilisant toutes sortes de

combinaisons de fibres. On dépose ensuite deux autres couches de Mylar sur les fibres, puis on crée un vide entre les films, et la pression atmosphérique les presse l'un contre l'autre. En chauffant, on active un adhésif appliqué sur la face interne des premier et second films. Le troisième, qui ne sert qu'à coller le feuillette, est ôté. Les deux premières couches de Mylar constituent ainsi les deux surfaces externes de la voile finie.

Les voiles 3DL sont plus légères que celles fabriquées selon l'ancienne méthode de coupe et de couture, et leur forme varie moins, même quand les contraintes appliquées sont importantes. Il n'est donc pas surprenant que les voiles 3DL dominent maintenant le marché des voiles pour la course. Elles



North Sails



doivent leur supériorité à la disposition des fibres de renforcement, qui suivent des courbes continues d'un bord à l'autre de la voile. La densité et l'orientation des fibres varie légèrement sur l'ensemble de la surface de la voile pour s'adapter aux contraintes, conférant ainsi une résistance maximale en chaque point pour un minimum de poids.

Des parachutes et des ballons légers

En janvier 1996, au cours d'une conférence de l'Institut américain d'aéronautique et d'astronautique, j'ai rencontré plusieurs ingénieurs de la NASA qui travaillaient sur des ballons stratosphériques à hélium, destinés à emporter des instruments scientifiques à des altitudes d'environ 45 000 mètres lors de missions qui devaient durer 100 jours. Connaissant l'intérêt qu'ils portaient aux tissus très résistants, je les ai invités à visiter l'usine 3DL, afin qu'ils sachent s'ils pourront adapter les techniques de fabrication de voiles à leurs ballons. Un autre groupe travaillant sous contrat avec la NASA souhaite utiliser les techniques de fabrication 3DL dans la mise au point des parachutes ultra-légers. Selon leurs estimations, des toiles sans coutures ne pèseraient que le tiers des parachutes actuels en Nylon. Certains scientifiques ont même envisagé d'utiliser la technologie 3DL pour fabriquer des antennes gonflables destinées à être envoyées dans l'espace.

Dans un proche avenir, les concepteurs ont de nombreux objectifs plus «maritimes»... Aujourd'hui, les fabricants cousent et collent des pièces élaborées sur les angles des voiles pour y attacher les filins de fixation. On allègerait et on renforcerait les voiles en produisant des voiles laminées souples à accessoires intégrés. Les ingénieurs envisagent de réaliser des voiles 3DL de croisière qui durent plus longtemps en utilisant des nouveaux films qui résistent mieux à l'exposition aux rayons ultraviolets. Ils prévoient d'introduire des voiles de compétition moins exotiques, accessibles pour un grand nombre de bateaux, en travaillant sur des structures plus solides et plus durables tissées à partir de combinaisons de plusieurs types de fibres. De telles améliorations diminueront le prix des voiles laminées souples, les mettant ainsi à la disposition des nombreux passionnés de voile.

Brian DOYLE est consultant pour la Société North Sails.

John ROUSMANIERE, *America's Cup Book*, W.W. Norton, 1983.

Manfred CURRY, *L'aérodynamique de la voile*, Chéron-FFV, 1991.

Une révolution nommée 3DL, in *Voiles et voiliers*, mai 1995.

Emiliano MARINO, *The Sailmaker's Apprentice: A Guide for the Self-Reliant Sailor*, illustré par Christine Erikson, International Marine, Camden, Me., 1994.

Grandeur et décadence de l'amiante

JAMES ALLEMAN • BROOKE MOSSMAN

Minéral aux applications universelles, des mouchoirs à la pâte dentifrice en passant par les matériaux de construction, l'amiante est aujourd'hui proscrit. On ne lui connaît toutefois pas de remplaçant.

L'avenir industriel de l'amiante est compromis. Cette étrange fibre, qui fait régulièrement la une des journaux depuis une vingtaine d'années, est l'un des polluants les plus redoutés de la planète. C'est aussi celui dont la suppression et le remplacement sont le plus coûteux : en 1997, plusieurs dizaines de milliards de francs seront dépensés aux États-Unis pour l'élimination de l'amiante dans les bâtiments et dans les produits d'utilisation courante (le seul déflo-cage du campus universitaire de Jus-sieu, à Paris, a été évalué à un milliard de francs ; les industries qui utilisent l'amiante disparaissent ou se recon-vertissent. L'ampleur de cette crise est à la mesure de l'enthousiasme suscité par l'amiante au cours des siècles passés : on ne connaissait pas

de produit garantissant une meilleure sécurité.

Le nom d'amiante désigne une famille de silicates, minéraux contenant du silicium et de l'oxygène, de structure fibreuse (voir l'encadré de la page 51). Malléable, flexible et résistant au feu, l'amiante fut d'abord tissé pour la fabrication de capes, de nappes, de rideaux de théâtre et de combinaisons ignifugées. Les produits d'isolation en amiante ont permis d'économiser l'énergie et ont protégé contre les risques d'incendie. Les plaquettes de frein et les garnitures d'em-

brayage en amiante ont amélioré la sécurité à bord des voitures

course et de tourisme ; des filtres à air en amiante étaient utilisés avec succès dans les ventilateurs d'hôpitaux, dans les cigarettes et dans les masques à gaz militaires.

Malheureusement, les mêmes propriétés de résistance et de flexibilité des fibres en font des ennemis redoutables de la santé humaine. L'inhalation d'amiante, à des concentrations même faibles, mais de façon prolongée, déclenche divers types de cancers. Dans de nombreux pays, l'utilisation de l'amiante est donc aujourd'hui interdite, sauf pour quelques applications où aucun matériau de substitution n'a été trouvé.

Des fibres minérales ignifuges

Vers 300 avant notre ère, Théophraste, disciple et successeur d'Aristote à la tête des péripatéticiens, mentionne, le premier, l'amiante dans son traité *De lapidibus* (Sur les pierres) : une substance semblable à de la laine pourrie, et qui brûle sans se consumer lorsqu'on l'imbibe d'huile. Au cours

Au 1^{er} siècle, Dioscoride décrit des mouchoirs en amiante réutilisables, nettoyés et blanchis au feu.

Pliny l'Ancien le nomme *asbestinon* dans l'*Histoire naturelle*.

Les hauts et les bas de l'histoire de l'amiante

En 300 avant notre ère, Théophraste, disciple d'Aristote, mentionne l'amiante : une substance qui ressemble à du bois pourri. On l'imprègne d'huile qui y brûle sans dégrader le support.

300 AVANT J.-C.

50 APRÈS J.-C.

des quatre siècles suivants, plusieurs savants grecs et romains recueillent des informations sur cette pierre inhabituelle et sur ses utilisations, toujours plus nombreuses. Au I^{er} siècle, le géographe Strabon identifie la première carrière grecque d'amiante sur l'île d'Evvoia ; là, des artisans peignent et traitent comme la laine des fils de pierres fibreuses pour la confection de vêtements ignifuges.

À la même époque, le médecin grec Dioscoride rapporte que des mouchoirs réutilisables en amiante sont vendus aux habitués de certains théâtres : après utilisation, on les nettoie et on les blanchit en les passant au feu. Dioscoride décrit également une carrière d'amiante située sur le Mont Olympe, à Chypre. C'est lui qui cite pour la première fois le nom de la substance, *amiantos*, qui signifie incorruptible, en référence à sa résistance au feu. Au moins trois autres auteurs, notamment Plutarque, nous apprennent que les mèches des lampes permanentes de l'Acropole sont en amiante.

Toujours au I^{er} siècle, l'*Histoire naturelle* de Pline l'Ancien contient l'un des exposés les plus complets de l'époque sur ce minéral. Pline le nomme *asbestinon*, qui signifie inextinguible, ce qui donnera le nom ancien *asbeste* (et *asbestos* en anglais). L'amiante entre dans la composition de divers produits tissés, nappes faciles à laver, serviettes de table ou linceuls royaux (les corps sont incinérés, mais les linceuls restent intacts).

Au cours du millénaire suivant, l'amiante intrigue toujours les rois et les chimistes, de l'Europe occidentale à la Chine. Selon un récit populaire,

Charlemagne jette un jour au feu une serviette de table en amiante pour impressionner ses invités.

Toutefois, à mesure que le temps passe, la nature minérale de l'amiante est oubliée, et son origine fait l'objet d'affabulation. Des alchimistes médiévaux nomment *salamandra* la fibre qu'ils croient être des poils de salamandre, animal qui résisterait au feu (une salamandre entourée de flammes sera plus tard l'emblème de François I^{er}, accompagnée de la devise *Nutrisco et extinguo*, Je me nourris du feu et je l'éteins). D'autres pensent qu'elle provient d'écailles de lézard ou de plumes d'oiseau. Ces diverses origines supposées conduisent à une nomenclature étrange. Des noms différents sont attribués aux différentes formes de l'amiante : cuir des montagnes, lin incombustible, fil de roche ou alun plumé. À la fin du XIII^e siècle, c'est Marco Polo qui, par hasard, dissipe ces mystères : dans le *Livre des merveilles*, il décrit l'extraction d'amiante en Chine, certifiant son origine minérale.

Les premières études scientifiques

Dans la première moitié du XVI^e siècle, Agricola, l'un des fondateurs de la minéralogie, fait considérablement progresser la compréhension scientifique de cette substance dans son ouvrage *De re metallica* (Sur les choses métalliques). Après l'étude et la mise à jour scrupuleuses des informations disponibles sur les différentes variétés d'amiante, leurs origines et leurs utilisations, il propose une expérience

inhabituelle : il est l'un des seuls à caractériser aussi l'amiante par son goût, prévenant ses lecteurs que l'amiante « pique un peu la langue ».

Au XVII^e siècle, l'intérêt pour l'amiante ne tarit pas. La *Royal Society* (équivalent de l'Académie des sciences en France), fondée en 1660, publie huit études et lettres sur l'amiante au cours de ses 40 premières années d'existence. En 1727, Franz Brückmann, minéralogiste allemand, rédige la première monographie entièrement consacrée à l'amiante. Cet ouvrage est suivi d'autres. En particulier, Martin Ledermüller détaille chacun des types connus de cette fibre dans un ouvrage illustré de gravures en couleur.

Parallèlement, les applications commerciales de l'amiante se diversifient. Des manteaux, des chemises et des manchettes ignifuges s'ajoutent au catalogue des vêtements confectionnés avec des fibres d'amiante. Le futur physicien et homme politique Benjamin Franklin vend, en 1724, son portemonnaie en amiante au bienfaiteur du *British Museum*, Hans Sloane : il avait choisi cette fibre afin, disait-il, que l'argent ne brûle pas entre ses doigts.

Des mystificateurs s'emparent aussi de l'amiante. Des escrocs vendent à des dévots crédules de fausses reliques en amiante, les plus populaires étant les restes miraculeux et ignifuges de la tunique du Christ ou de sa Croix. Des saltimbanques utilisent des gants et des capes ignifuges en amiante pour étonner leur public : les « Salamandres humaines » présentent un numéro populaire au cours duquel un homme cuit une tranche de viande en la tenant à la main au-dessus du feu.



Des vestales (à gauche) gardent la flamme éternelle au temple de Vesta, déesse du foyer ; la mèche de la lampe est en amiante.

Vers l'an 800, Charlemagne, afin d'impressionner des invités, jette dans le feu une serviette de table en amiante et l'en retire intacte.



Des alchimistes médiévaux croient que l'amiante est formé de poils de salamandres, insensibles au feu (à gauche).

Marco Polo décrit une mine d'amiante en Chine dans la seconde moitié du XII^e siècle. Il en conclut que l'amiante est une pierre.

100

1000

1850



Scientific American

Rouleau de revêtement de toiture en amiante.

1828 : Premier brevet américain décrivant l'utilisation de l'amiante pour l'isolation des machines à vapeur.

1834 : Brevet britannique pour l'utilisation de l'amiante dans les coffres-forts.

1853 : Brevet britannique pour l'utilisation de l'amiante dans des lubrifiants de coussinets.

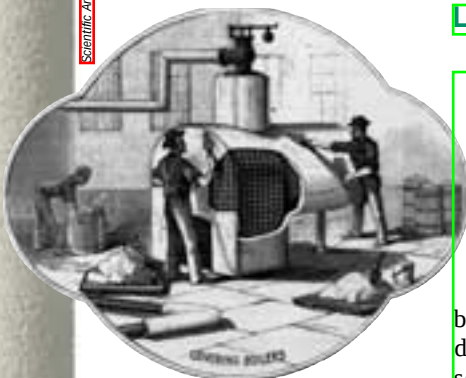
1859 : Brevet britannique pour des cheminées en amiante.

1865 : Brevet britannique pour l'utilisation de l'amiante dans l'isolation des fils électriques.

1868 : Brevet américain pour l'utilisation de l'amiante pour des revêtements de toiture.

1820

Scientific American



L'amiante est utilisé comme isolant thermique

Des décors et des rideaux ignifugés apparaissent dans les théâtres européens au début du XIX^e siècle.

Benjamin Franklin montre une bourse en amiante en Angleterre, en 1724.

1800



The Natural History Museum, Londres

La Royal Society, fondée en Angleterre en 1660, consacre à l'amiante quelques-uns de ses premiers articles scientifiques.

Au XVI^e siècle, Agricola décrit les propriétés de l'amiante et les endroits où l'on peut en trouver en Grèce, en Inde et en Égypte.

1500

L'entrée dans l'industrie

Dans les années 1820, l'Italien Giovanni Aldini s'inspire de cette utilisation et crée le premier commerce réellement lucratif fondé sur l'amiante : ses vêtements ignifugés pour les pompiers sont appréciés et attirent rapidement une clientèle nombreuse, de Paris à Genève. Peu après, des rideaux en amiante apparaissent sur les scènes des théâtres pour accroître la sécurité anti-incendie : on leur attribue la sauvegarde de nombreuses vies.

Les besoins des constructeurs de machines à vapeur, qui souhaitent améliorer les performances de ces engins, sont satisfaits de l'emploi de l'amiante dans l'industrie mécanique. L'amiante, trop grossier et trop abrasif, est inutilisable dans les parties mobiles, mais, mélangé à du caoutchouc, il permet la fabrication de composants internes plus résistants, tels des joints d'étanchéité.

En 1860, un jeune entrepreneur, Henry Ward Johns, soucieux de réduire le nombre d'incendies des bâtiments, introduit l'amiante dans les matériaux de construction, domaine qui en fera la plus grosse consommation jusqu'à aujourd'hui. Après avoir expérimenté des mélanges de peintures ignifugées, il fabrique des plaques de revêtement ignifugées, avec des fibres d'amiante, du goudron, de la toile et du papier d'emballage. Des mélanges d'amiante et de ciment sont ensuite mis au point. Des panneaux de construction légers et résistants, des bardeaux, des panneaux ondulés et des moulures décoratives sont ainsi fabriqués.

L'amiante entre dans la composition de dizaines d'autres produits inventés au cours de la première moi-

tié de ce siècle. L'industrie naissante du plastique est indissociable de l'amiante, dont les fibres renforcent les mélanges, réduisent le poids et améliorent la résistance thermique. L'amiante conserve ce rôle de liant et de renforçateur, même après l'invention de polymères plus performants. Les tuiles en vinyle-amiante, par exemple, sont longtemps utilisées pour les planchers ; des boutons, des téléphones et des compteurs électriques contiennent des alliages d'amiante et de plastique. Aujourd'hui, des plaquettes de frein à base d'amiante sont toujours vendues par des fabricants convaincus qu'aucun produit de remplacement satisfaisant n'a encore été trouvé.

La popularité de l'amiante culmine en 1939. À l'Exposition universelle de New York, une statue géante en amiante accueille les visiteurs du pavillon de la Société *Johns-Manville* qui célèbre les «services rendus à l'humanité» par ce minéral. Le site de l'Exposition lui-même regorge d'amiante, des toits aux canalisations souterraines.

Un pilier de la reconstruction de l'Europe

À l'aube de la Seconde Guerre mondiale, la demande en amiante est presque supérieure à la production mondiale. Dépourvues de réserves nationales, les grandes puissances militaires dépendent fortement des importations. L'Allemagne tente d'amasser une importante quantité d'amiante en le faisant venir d'Afrique du Sud par bateau. Les États-Unis n'ont qu'une seule source d'approvisionnement sûre, au Canada, les sources étrangères, tel le programme d'échanges conclu entre l'entrepreneur américain Armand Hammer et le dirigeant soviétique Lénine, étant



Publicité pour l'amiante dans les années 1870.

1880

1884 : Brevet britannique pour l'utilisation de l'amiante dans les panneaux de construction.

1885 : Brevet britannique pour des membranes en amiante utilisées dans la filtration, de jus de fruits par exemple.

ESS Photo Company Collection. Indiana Historical Society. L. Tra



Le Capitole de l'Etat de l'Indiana (à gauche) est mentionné en 1894 dans une brochure publicitaire pour les utilisations de l'amiante intitulée *Isolation thermique et protection contre le feu dans les bâtiments importants*.

considérées comme vulnérables. Le gouvernement impose alors des restrictions sévères aux applications non essentielles. Chaque jour, plusieurs centaines de tonnes d'amiante servent à la fabrication de moteurs de bateaux, de pièces de jeeps, de fusées éclairantes, d'obus ou de torpilles. Sur les champs de bataille, les médecins l'utilisent même comme pansement chirurgical facile à stériliser.

Après la guerre, la reconstruction de l'Europe est à l'origine d'une nou-

velle (et dernière) vague d'engouement pour l'amiante. La tenue aux efforts, au temps et au feu des produits à base de ciment et d'amiante suscitent de multiples utilisations dans le bâtiment. Les gratte-ciel ont été construits, en partie, grâce au flocage en amiante qui protège les structures en acier contre les déformations en cas d'incendie.

Dans les autres secteurs d'activité, les utilisations de l'amiante continuent de se diversifier : sacs postaux ignifu-

gés, filtres pour purifier des jus de fruits, du vin ou du sucre, fil chirurgical, dentifrice, pâte à modeler, neige artificielle. Hollywood lui donne aussi quelques petits rôles, dans le balais brûlant de la Méchante Sorcière de l'Ouest du *Magicien d'Oz* ou pour les toiles d'araignée du tombeau égyptien du film *La Momie*.

Lorsque l'Agence pour la protection de l'environnement américaine est créée, en 1970, le commerce de l'amiante porte sur des milliers de pro-

Qu'est-ce que l'amiante ?

On distingue six types d'amiante : actinolite, amosite, anthophyllite, crocidolite, trémolite et chrysotile. Tous contiennent de longues chaînes de silicium et d'oxygène qui déterminent la nature fibreuse du minéral. Cependant, tous diffèrent par leurs propriétés physiques et chimiques, en fonction des autres composants du minéral, tels le calcium, le magnésium ou le fer.

Les fibres ignifuges de l'amiante sont plus solides que l'acier et assez élastiques, qualités intéressantes pour un grand nombre d'applications industrielles. Cependant, cette résistance et cette élasticité représentent un danger pour la santé humaine : les



CROCIDOLITE

fibres d'amiante pénètrent les tissus des organes, en particulier les poumons, et déclenchent le développement de tumeurs.

Les cinq premières variétés d'amiante listées ci-dessus, regroupées sous le nom d'amphiboles, sont les plus solides et les plus raides, donc les plus dangereuses. Les



CHRYSTILE

deux amphiboles les plus courants, l'amosite et la crocidolite (souvent appelés respectivement amiante « brun » et amiante « bleu »), proviennent des mines d'Afrique du Sud. Ils furent mélangés à des matériaux isolants et à du ciment jusqu'à ce que des lois interdisent leur utilisation. Les autres amphiboles, l'anthophyllite, la trémolite et l'actinolite, n'ont jamais eu d'application commerciale.

Le sixième type d'amiante, la chrysotile, a représenté jusqu'à plus de 95 pour cent de l'amiante utilisé dans le monde. La structure, la composition et le comportement de la chrysotile sont

différents de ceux des autres types d'amiante. Sa structure cristalline a une forme de serpent (d'où son autre nom, la serpentine) et elle est plus souple que les autres types. À cause de cette souplesse, la chrysotile est plus facilement détruite par l'organisme, et elle n'endommage pas autant les tissus.



AMOSITE

Don. A. Underwood Purdue University

1900

Strasbourg Institution L. J. J. J.



Dame Amiante, dans une brochure publicitaire du début du siècle.

Des téléphones et d'autres objets ménagers sont fabriqués avec un mélange d'amiante et de plastique.

Les plaquettes de freins d'automobile sont faites en amiante.



1920

Des lois concernant l'industrie de l'amiante sont promulguées en Angleterre en 1931, en réaction aux inquiétudes concernant l'exposition à l'amiante et aux problèmes pulmonaires associés, particulièrement parmi les ouvriers du secteur textile.



Corbis-Bettmann



L'Homme-amiante (à droite), à l'Exposition universelle de 1939.

duits. En France, les importations d'amiante brut atteignent le pic de 170 000 tonnes en 1970. La consommation annuelle d'amiante aux États-Unis augmente jusqu'en 1973, où elle atteint un plafond historique de près d'un million de tonnes.

L'histoire de l'amiante prend alors un tour moins glorieux : la mise en évidence de ses propriétés cancérogènes conduit progressivement à son interdiction.

Certains problèmes liés à l'inhalation de quantités excessives d'amiante dans des ateliers de fraisage avaient été observés dès le début du siècle. Des rapports faisant état de lésions fibrotiques pulmonaires, connues sous le nom d'asbestose, parmi les ouvriers d'usines textiles britanniques amènent à la promulgation d'une législation sur l'industrie de l'amiante, en 1931, dans ce pays. Au cours des décennies suivantes, cependant, le sujet n'a guère retenu l'attention des services de médecine du travail qui se mettent en place. Les épidémiologistes ont pourtant aussi établi un lien inquiétant entre l'amiante et le cancer du poumon, surtout chez les fumeurs.

L'attitude change au milieu des années 1960, lorsqu'il apparaît qu'une faible exposition à l'amiante a de graves conséquences sur la santé quand elle est prolongée : de nombreuses personnes risquent des affections pulmonaires. Des résultats d'études réalisées dans le monde entier accusent particulièrement la variété d'amiante connue sous le nom d'amphibole, principale responsable du mésothéliome, tumeur de la plèvre, enveloppe du poumon. La plupart des

pays industrialisés promulguent donc des lois limitant l'exposition aux amphiboles. Face à une pression croissante des syndicats et au vu des études qui avancent le chiffre terrible de plus d'un million de victimes à prévoir, le gouvernement américain décide que la loi s'applique à toutes les formes d'amiante.

Cette interdiction a été levée en 1991, mais le climat politique et juridique qui entoure l'emploi de l'amiante aux États-Unis reste troublé. Peu de gens se souviennent de l'ancienne gloire de ce minéral, moins encore rêvent d'en généraliser à nouveau l'utilisation.

En France, l'utilisation de l'amiante est totalement interdite depuis le 1er janvier 1997, sauf dérogation exceptionnelle et temporaire pour certains produits. Les amphiboles avaient été interdits dès 1994.

Un rôle irremplaçable

Quel imprudent affirmerait aujourd'hui que l'amiante possède toujours des qualités qui compensent ses défauts ? Il semble ridicule de qualifier ce minéral de ressource internationale stratégique. C'est pourtant la réalité : la variété d'amiante connue sous le nom de chrysotile (plus malléable et moins dangereuse que les amphiboles) reste un matériau essentiel pour de nombreux domaines stratégiques.

Ainsi, les réservoirs de carburant de la navette spatiale américaine contiennent, comme les fusées plus anciennes, des bandes de caoutchouc imprégnées d'amiante pour protéger l'acier de la chaleur produite lors du décollage. La production autonome

d'oxygène dans les sous-marins militaires repose aussi sur des tissus d'amiante, indispensables au fonctionnement des cellules d'électrolyse qui dissocient l'eau de mer.

Nous trouvons aussi de l'amiante près de chez nous : au moins 75 pour cent du chlore utilisé aujourd'hui dans la production d'eau de Javel, de détergents ou de désinfectants proviennent d'industries chimiques dont les procédés de fabrication dépendent de produits en amiante. Les membranes en chrysotile résistent bien aux milieux basiques ; en France, elles font l'objet d'une dérogation au décret d'interdiction de la fibre. Aux États-Unis, l'eau du robinet est ainsi purifiée grâce à du chlore traité à l'amiante et acheminée à travers des conduites de ciment et d'amiante. Dans ce pays, ces canalisations ont été si utilisées depuis 1930 que, si on les mettait toutes bout à bout, on pourrait aller sur la Lune, revenir, et faire encore huit fois le tour de la Terre.

En France, les conduites en fibrociment, largement utilisées, sont progressivement remplacées par des éléments en béton vibré.

Toutes ces applications actuelles (qui reposent principalement sur l'utilisation de la chrysotile, la forme la moins nocive) ne requièrent pas une énorme quantité d'amiante. La consommation d'amiante a chuté de près de 95 pour cent depuis 1973 aux États-Unis. En France, les importations sont passées de 170 000 tonnes en 1970 à 35 tonnes en 1996. Toutefois de nombreux autres pays considèrent encore que l'amiante chrysotile est une ressource importante. En 1997, plus de deux millions de tonnes de cette sub-



1940

En 1939, la Méchante Sorcière de l'Ouest apparaît, dans *Le Magicien d'Oz*, sur un balai en amiante.

Après la guerre, l'industrie du bâtiment reposait fortement sur l'utilisation de l'amiante.



Le matériel militaire utilisé en période de guerre, y compris les combinaisons ignifugées (à gauche) et les fusées éclairantes, contenaient de l'amiante.



1970

L'utilisation de l'amiante culmine aux États-Unis en 1973.



L'élimination de l'amiante dans les écoles, les maisons et les bâtiments publics se poursuit.

1980

Les réservoirs de la navette spatiale (ci-dessous) sont isolés avec de l'amiante, une des nombreuses applications actuelles de ce minéral.



1990

stance seront utilisées à travers le monde. L'amiante est surtout mélangé à du ciment dans des matériaux de construction, employés en Asie, en Europe orientale et dans les pays en développement.

Les plans d'élimination systématique de l'amiante ont été à la fois mal préparés et mal conduits. La mortalité imputable à l'amiante, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments, est faible par rapport aux risques de la consommation excessive de tabac, de drogues ou d'alcool. La crainte irrationnelle «une seule fibre tue» n'a aucun fondement scientifique : elle a entraîné de nombreux travaux d'assainissement aux avantages incertains dans des écoles et dans d'autres bâtiments.

En 1988, afin d'évaluer le problème à sa juste mesure et de calmer les craintes infondées, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement, de concert avec le Congrès américain et d'autres institutions privées, a commandé un rapport à un organisme sanitaire indépendant. Ce rapport établissait l'inutilité et le coût d'un démantèlement exhaustif des structures contenant de l'amiante. En 1991, l'Association médicale américaine a

publié un second rapport qui parvenait aux mêmes conclusions. Ces deux documents soulignent que la pollution actuelle par l'amiante est partout faible comparée aux concentrations de poussières mesurées sur des lieux de travail mal réglementés, qui sont à l'origine de l'apparition de maladies pulmonaires associées à l'amiante.

En France, un rapport publié par l'Institut national de la recherche médicale en 1996 indique que dans 95 pour cent des bâtiments publics floqués, la concentration en amiante dans l'air est faible (environ deux fibres par litre d'air). Dans seulement trois pour cent des locaux examinés, le seuil d'intervention de 25 fibres par litre d'air était atteint. Les concentrations sont plus grandes dans les

milieux professionnels, mais la réglementation préventive y est aussi plus rigoureuse.

Le problème de l'amiante sera peut-être réglé autrement : les réserves actuelles s'épuisent. Les chimistes lui ont longtemps cherché un remplaçant valable, mais aucune solution satisfaisante n'a encore été trouvée. L'amiante, tel le Phénix renaissant de ses cendres, retrouvera-t-elle son prestige ancien par sa raréfaction ?

James ALLEMAN est professeur de génie civil à l'Université Purdue. Brooke MOSSMAN est professeur de médecine à l'Université du Vermont.

B.T. MOSSMAN, J. BIGNON, M. CORN, A. SEATON et J.B.L. GEE, *Asbestos: Scientific Developments and Implications for Public Policy*, in *Science*, vol. 247, pp. 294-300, 19 janvier 1990.

R. MURRAY, *Asbestos: A Chronology of its Origins and Health Effects*, in *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 47, n° 6, pp. 361-365, juin 1990.

M. ROSS, *The Schoolroom Asbestos Abatement Program: A Public Policy Debacle*, in *Environmental Geology*, vol. 26, n° 3, pp. 182-188, octobre 1995.

Amiante : le dossier français

JEAN-PIERRE FAVRE-TROSSON

Avant d'en interdire complètement l'utilisation, la France était l'un des plus gros consommateurs d'amiante dans le monde.

L'exploitation industrielle de l'amiante commence dans la seconde moitié du XIX^e siècle, avec la mise en valeur d'importants gisements au Québec et en Russie. La production mondiale croît sans interruption jusqu'à la fin des années 1980, où elle atteint cinq millions de tonnes. La France s'inscrit naturellement dans cette dynamique : les importations atteignent un maximum de 170 000 tonnes, en 1970. À la veille de l'interdiction de la fibre, la France reste le premier pays importateur d'Europe et le cinquième du monde, avec 35 000 tonnes pour 1996.

Jusqu'en 1950, rien ne trouble le développement de l'industrie de

l'amiante. La consommation quinquennale avoisine 50 000 tonnes, dont 40 000 d'amiante ciment, utilisée dans le secteur du bâtiment. Dès 1900, un médecin britannique identifie cependant une « fibrose pulmonaire non tuberculeuse », en relation avec l'ancienneté du travail au sein d'une filature d'amiante et, en France, un inspecteur du travail consigne dès 1906 la morbidité et la mortalité imputables à l'amiante dans cette même industrie, mais ces premières alertes ne sortent pas des cercles scientifiques et médicaux.

Entre 1950 et 1975, la France, en pleine reconstruction, lance un ambitieux programme immobilier public,

où le recours au flocage à l'amiante permet, à moindre coût et pour une efficacité incomparable, le renforcement des structures, leur isolation et leur protection contre l'incendie. Les estimations des surfaces ainsi construites avoisinent cinq millions de mètres carrés, mais des valeurs supérieures ont été avancées.

Parallèlement, les pathologies liées à l'amiante se diversifient. Dès 1955, en Grande-Bretagne, R. Doll établit formellement la relation entre l'exposition au minerai et le cancer du poumon. En 1960, J. C. Wagner, en Afrique du Sud, attribue un cancer rarissime, le mésothéliome pleural, à l'exposi-

Pathologie	Définition	Fréquence	Gravité	Latence	Spécificité
Asbestose	Ensemble des manifestations pulmonaires et pleurales	Faible, en baisse	Mortelle à plus ou moins long terme par insuffisance cardio-respiratoire. Expertise en cours sur l'évolution en cancer.	Quelques mois à quelques années. Nécessite un niveau d'empoussièrement supérieur à une fibre par millilitre d'air.	Oui
Cancer bronchio-pulmonaire	Transformation maligne de l'épithélium de la trachée et des bronches	1 500 cas annuels, en hausse	Mortel à court terme : dix pour cent de survie à cinq ans	15 à 35 ans. Il existerait un seuil d'exposition de 0,5 fibre par millilitre et pour 40 ans	Multifactoriel : l'amiante augmente le risque de cancer du poumon par tabagisme actif
Mésothéliome pleural	Transformation maligne des cellules mésothéliales de la plèvre	600 cas annuels, en hausse	Mortel de 18 mois à 7 ans	15 à 50 ans. Pas de notion de seuil	Oui Caractéristique d'une exposition à l'amiante dans 80 pour cent des cas
Plaques pleurales	Fibrose de la plèvre pouvant se calcifier	Élevée, en hausse	Bénignes. Ne prédisposent pas au cancer	5 à 10 ans	Oui

L'amiante est responsable de quatre pathologies classées en France comme maladies professionnelles. Le nombre de cas est en hausse, sauf pour l'asbestose, qui est associée à des niveaux d'em-

poussièrement élevés et reste la première pathologie à bénéficier des mesures de protection, sans cesse plus sévères, des industries de l'amiante.

tion à l'amiante. Le premier cas français est décrit en 1965. Bien que le danger de l'amiante soit ainsi reconnu, on pense toutefois qu'il s'arrête à la porte des usines.

Les premières inquiétudes publiques

Dans les années 1970, l'opinion publique commence à s'inquiéter du risque créé par la pollution atmosphérique aux fibres d'amiante, puis par la pollution à l'intérieur des bâtiments, liée à la dégradation des flocages. Ainsi, en 1975, un Comité anti-amiante se crée sur le campus parisien de Jussieu, où 200 000 mètres carrés sont concernés.

En 1977, un décret fixe, pour la première fois, des valeurs limites d'exposition dans les entreprises qui utilisent de l'amiante. En 1978, le flocage à l'amiante est interdit dans toutes les constructions nouvelles. Une politique «d'usage contrôlé» du matériau est instaurée : les risques associés à l'utilisation de cette fibre apparemment irremplaçable sont contrôlés, et les contrôles sont évalués. Cette politique est défendue en particulier par le Comité permanent amiante, organisme de réflexion, d'étude et de conseil qui regroupe les scientifiques spécialistes du problème, les représentants syndicaux, les industriels du secteur et les représentants de plusieurs ministères.

Dans les années 1990, toutefois, plusieurs événements remettent en question cette gestion. L'annonce de six décès par cancer, dont l'un par mésothéliome, parmi le personnel enseignant du lycée de Gérardmer, floqué à l'amiante, est largement reprise par la presse écrite pendant l'été 1994. L'épidémiologiste britannique J. Peto prévoit, pour son pays, 3 000 décès par an par mésothéliome dans les années 2020, tandis qu'en France, le Bulletin épidémiologique hebdomadaire annonce une augmentation du nombre de cas de 25 pour cent tous les trois ans. Les victimes se regroupent au sein d'associations et intentent des actions en justice contre leurs employeurs. Enfin, un rapport de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale affirme en 1996 que toute fibre d'amiante est cancérigène.

L'interdiction des fibres amphiboles, décrétée en 1994, est étendue à l'ensemble des variétés au 1^{er} janvier 1997. Elle porte sur la fabrication, la transformation, la vente, l'importation, la

mise sur le marché national et la cession, à quelque titre que ce soit.

Les entreprises du secteur, qui emploient 3 500 personnes, n'ont pas totalement été prises au dépourvu par ce décret. Certaines avaient déjà engagé, voire terminé, leur reconversion. D'autres bénéficient de dérogations, à titre temporaire et exceptionnel, pour des produits où aucun substitut connu ne présente moins de risque pour la santé des travailleurs, tout en donnant les mêmes garanties de sécurité dans leur utilisation : diaphragmes pour la production de chlore, garnitures de friction, joints et garnitures d'étanchéité, dispositifs d'isolation thermique en milieu industriel. Un dernier groupe d'entreprises, bénéficiant du poids économique de leur société mère, peuvent facilement cesser leur activité et recentrer leur production.

L'impact sanitaire de l'interdiction totale ne sera perceptible qu'à long terme, sous réserve qu'elle soit appliquée rigoureusement. Nous assisterons, dans les prochaines années, à une explosion de cancers broncho-pulmonaires et de mésothéliomes, correspondant à l'usage maximal du minerai dans les années 1960 et 1970.

Un risque sous haute surveillance

Que faire du matériau déjà en place ? Une dizaine de milliers d'immeubles est théoriquement concernée. Un enlèvement systématique du flocage accroîtrait le risque, minime lorsque le revêtement est en bon état (95 pour cent des bâtiments). En outre, le coût total du déflocage est évalué entre 30 et 150 milliards de francs. L'attitude adoptée par le législateur est donc prudente : le décret du 7 février 1996 fait obligation aux propriétaires d'identifier l'amiante dans les flocages et les calorifugeages. Sa présence implique l'évaluation de l'état de conservation des locaux et, éventuellement, la mesure de leur degré d'empoussièrement par des organismes habilités. L'obligation d'engager des travaux n'interviendra qu'à partir d'un seuil de 25 fibres par litre d'air.

Dans les grands organismes publics, ce décret est bien appliqué. Les bâtiments relevant de l'Éducation nationale sont inventoriés (cinq pour cent des lycées, des collèges et des universités sont concernés), et les travaux les plus urgents sont engagés. Le campus de Jussieu, emblématique, bénéficie d'un

chantier test sur 1 600 mètres carrés. De la même façon, dans les hôpitaux, les caisses d'assurance maladie ou à La Poste, comme à la SNCF, à la RATP ou à EDF-GDF, dans les principaux locaux à risques, le traitement est en cours ou achevé. En revanche, les collectivités locales et, plus encore, les propriétaires privés rencontrent de grands problèmes d'inventaire et de coût.

Comment remplacer l'amiante ? L'utilisation de fibres minérales artificielles est envisagée avec prudence, afin de ne pas diffuser massivement des produits dont la toxicité serait équivalente, voire supérieure, à celle de l'amiante. La nocivité dépend de la taille des fibres (les plus dangereuses ont un diamètre de 0,5 micromètre, et une longueur comprise entre 5 et 15 micromètres) et de leur biopersistance (leur degré de rétention dans les poumons). L'ajustement de la taille des fibres afin de protéger le poumon profond réduit leur intérêt technique. La biopersistance des fibres artificielles est inférieure à celle de l'amiante, sauf pour les fibres céramiques. Toutefois, toutes les fibres de substitution connues aujourd'hui sont classées parmi les cancérogènes possibles pour l'homme par le Centre international de recherche sur le cancer.

Comme beaucoup d'autres pays, mais peut-être plus et plus longtemps, la France a sacrifié à la « pierre magique ». La lenteur de la prise de conscience et de l'action des pouvoirs publics témoigne-t-elle seulement du poids des groupes de pression économiques, ou souligne-t-elle les déficiences en matière de santé publique dans notre pays ? La valeur pédagogique de ce qui aura été, après le « sang contaminé » et après la « vache folle », la « leçon de l'amiante », réside dans la réponse à cette question.

Jean-Pierre FAVRE-TROSSON est médecin du travail à EDF - GDF Services, à Marseille.

J. LENGLET, *L'affaire de l'amiante*, La Découverte, 1996.

F. MALYE, *Amiante : le dossier de l'air contaminé*, Le Pré aux Clercs, 1996.

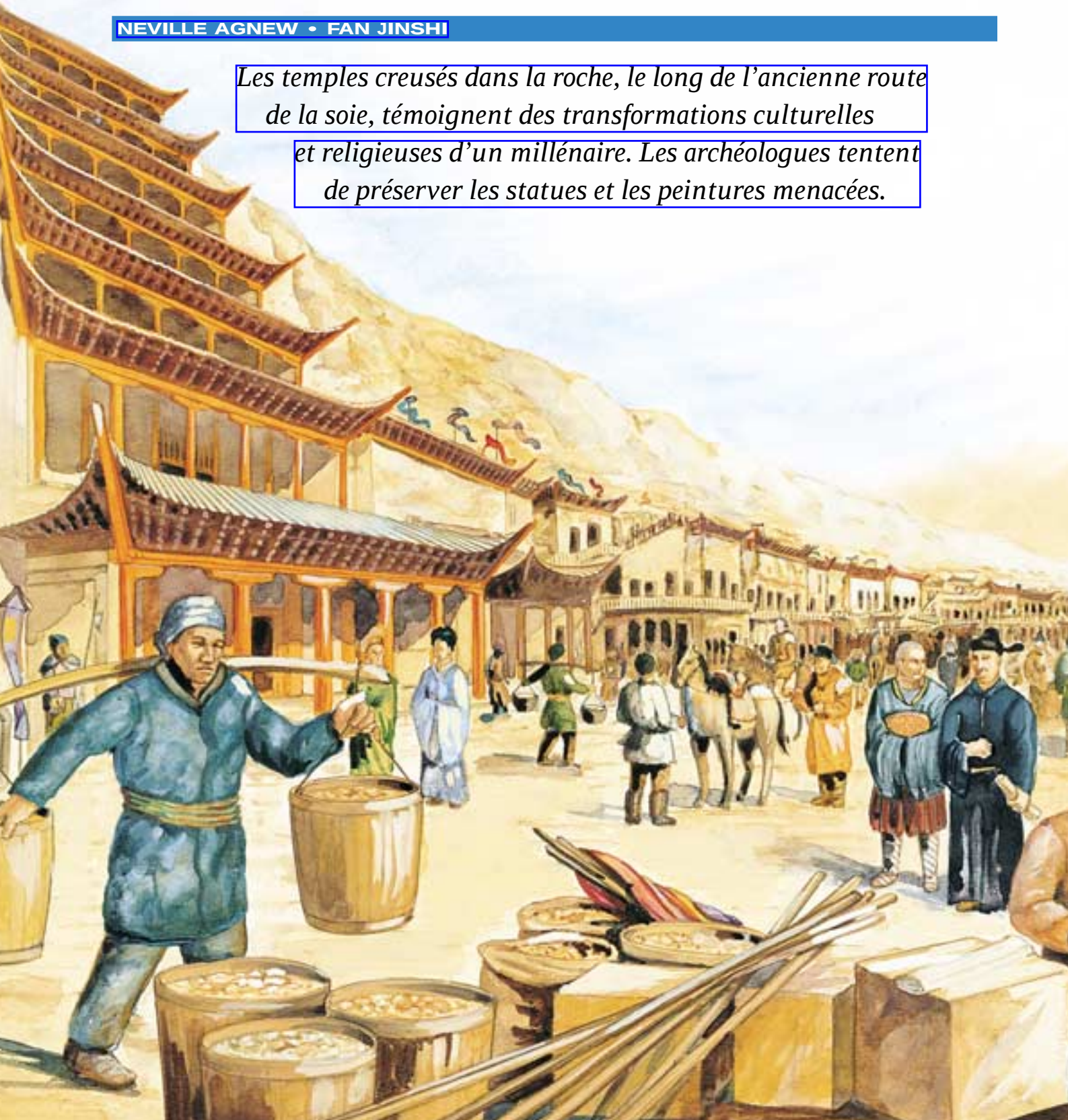
J.-P. FAVRE-TROSSON, *Amiante : les dangers*, Flammarion, 1997.

Effets sur la santé des principaux types d'exposition à l'amiante, rapport inserm, du groupe d'expertise présidé par A.-B. Tonnel, juin 1996.

Les trésors du bouddhisme chinois de Dunhuang

NEVILLE AGNEW • FAN JINSHI

Les temples creusés dans la roche, le long de l'ancienne route de la soie, témoignent des transformations culturelles et religieuses d'un millénaire. Les archéologues tentent de préserver les statues et les peintures menacées.



A 1 900 kilomètres à l'Ouest de Beijing, entre les déserts de Gobi et de Taklamakân, la ville de Dunhuang était un des canaux culturels les plus importants du monde. En chinois, Dunhuang signifie «colline flamboyante» : la ville était la dernière oasis chinoise pour les voyageurs en route pour l'Ouest, que ceux-ci empruntent la voie Nord ou la voie Sud de la route de la soie (les deux voies contournaient le désert de Taklamakân, se rejoignant 1 600 kilomètres plus à l'Ouest, à Kashi). Pour les voyageurs arrivant vers l'Est, la vue des deux forts de Dunhuang – la porte de jade ou barrière Yumen, et la barrière Yung – était un soulagement, après le contournement du désert, par des routes marquées d'os blanchis de chameaux, de chevaux et de voyageurs malheureux. L'avant-poste fortifié de Dunhuang était l'extrémité occidentale de la Grande Muraille de Chine.

Du IV^e au XIV^e siècle, les 7 500 kilomètres de la route de la soie reliaient la Chine à Rome, via le Tibet, l'Inde, le Turkestan, l'Afghanistan et la péninsule arabe. Son nom, dû au baron Ferdinand von Richthofen, explorateur allemand du XIX^e siècle, est trompeur, car il laisse supposer qu'elle n'était qu'une voie d'échanges commerciaux ; en réalité, elle fut la première autoroute de l'information, sur un quart de la conférence terrestre. De l'Empire du Milieu arrivaient les étonnantes richesses et innovations techniques de la Chine : la soie, la céramique, les fourrures et, plus tard, le papier et la poudre à canon ; de l'Ouest venaient le coton, les épices, le raisin, le vin et le verre. L'art et les idées allaient et venaient avec ces denrées, le long d'un chemin infesté de bandits, transformant des cultures extrêmement différentes.

C'est par la route de la soie qu'arriva en Chine le bouddhisme, né en

1. L'OASIS DE MOGAO, près de la ville de Dunhuang, au milieu du désert, était une étape importante, sur la route de la soie, un lieu de repos et de prière pour les voyageurs et les marchands. Mogao est représenté ici tel qu'il était vers le milieu de la dynastie Tang (618 à 907 de notre ère). Plaques tournantes commerciales, Mogao et Dunhuang étaient aussi des lieux d'échanges culturels. Les bouddhistes priaient dans les grottes qu'ils avaient creusées dans la falaise et décorées de bannières de cérémonie, tandis que les pèlerins se préparaient pour le voyage à l'Est vers Beijing, ou à l'Ouest vers la Méditerranée.





2. LE SABLE DU DÉSERT MENACE les grottes de Mogao (ci-dessus). Des façades en béton (à droite), construites dans les années 1960, renforcent certaines de ces grottes qui ont été érodées par les vents et fragilisées par les séismes. Comme le montre la carte

de la route de la soie (ci-dessous), ces grottes, situées à 25 kilomètres de Dunhuang, étaient à la frontière occidentale de la Chine, à la limite du désert du Taklamakân. Elles furent préservées des aléas politiques, en raison de leur isolement.





3. CES DIVINITES CELESTES, nommées *apsarasas*, sont peintes sur le plafond d'une grotte de Mogao ; elles datent de la dynastie Wei occidentale (535 à 542 de notre ère).

4. LE DÉSERT entoure Mogao : les dunes Mingsha s'étendent jusque dans le lointain. Devant elles, à côté de la rivière Daquan qui alimente Mogao, se trouvent les arbres et la façade de la falaise, criblée de grottes.



5. CE PERSONNAGE AGENOUILLÉ de la période Tang se trouve dans la grotte 384. Ce type de statue fournit des informations détaillées sur les costumes de la Chine médiévale.

Inde au VI^e siècle avant notre ère. Le remarquable développement de cette religion est bien illustré par les temples de roche situés près de la ville de Dunhuang. À partir de l'an 360 environ, les pèlerins bouddhistes qui faisaient halte à Dunhuang commencèrent à creuser des grottes dans une falaise de 1 600 mètres de long, à 25 kilomètres au Sud-Est de la ville ; ils bâtirent des châsses, des loges et des niches pour les œuvres sacrées, utilisant les temples pour faire les offrandes qui devaient leur assurer une traversée sûre. Au cours des dix siècles qui suivirent, les moines creusèrent des centaines d'alcôves dans la roche, transformant la falaise en nid d'abeilles.

Aujourd'hui quelque 490 grottes abritent encore 2 000 statues du Bouddha et 50 000 mètres carrés de peintures murales.

Ces œuvres d'art reflètent les changements de dix périodes et dynasties, dont celle des Tang (618-907),

6. LE PLAFOND effondré de la grotte 460 montre la fragilité des monuments de Dunhuang. Le plafond a été progressivement aminci par l'érosion dans nombre d'entre elles.

pendant laquelle fleurirent la culture et l'art chinois. Les peintures murales de la haute période Tang révèlent la vie quotidienne des personnes de toutes les classes sociales qui traversaient Dunhuang ou qui y vivaient ; les fresques des périodes précédentes décrivent un bouddhisme plus austère. Ces peintures représentent également des pratiques commerciales, des techniques, des habitudes, des légendes et des sôtras (prières sacrées). Elles montrent aussi les transformations du bouddhisme indien vers sa forme chinoise : les mythes et les modèles chinois sont progressivement incorporés dans l'iconographie indienne, jusqu'à l'émergence d'un pur art bouddhiste chinois. Ces grottes de Mogao sont la plus importante collection d'art bouddhiste mural en Chine ; elles donnent un aperçu inégalé sur la vie dans la Chine ancienne et le long de la route de la soie.

Cette dernière ferma au cours du XV^e siècle, lorsque le recul des gla-



MUSEE ARCHAEOLOGIQUE

7. LE GRAND MONASTÈRE du mont Wutai, dans la province de Shanxi, est représenté sur cette peinture murale de la période de la Cinquième

Dynastie (907-960), trouvée dans la grotte 61. Les grottes de Mogao contiennent 50 000 mètres carrés de fresques.



CITY CONSERVATION INSTITUTE

8. DES BODDHISATTVAS EN PRIÈRE ornent la grotte 328. Ces statues, qui datent de l'ère Tang supérieure, sont recouvertes d'une

mince couche de poussière arrachée aux falaises par le vent ; les fresques sont également obscurcies.



9. LE SABLE devait constamment être balayé (à gauche) avant que les archéologues installent des clôtures longues de cinq kilomètres (en haut) pour le contenir au-dessus de Mogao. Ils l'ont également protégé par une végétation désertique, composée de *Tamarix chinensis*, *Haloxylon ammodendron*, *Calligonum arborescens* et *Hedysarum scorparium* (à droite).

ciers des monts Qilian provoqua l'assèchement des oasis du Taklamakân. Simultanément les envahisseurs convertissaient des zones importantes à l'Islam, mais l'héritage bouddhiste de Dunhuang subsista, en raison de l'isolement de la ville. De même, pendant les deux périodes de persécution des bouddhistes par les empereurs chinois – en 446, par l'empereur Wu, et en 845 par l'empereur Wuzong –, la ville de Dunhuang fut peu touchée :

elle était trop éloignée du centre du pouvoir. Les Tibétains conquièrent bien deux fois la cité, en 781 et au début de XVI^e siècle, mais ils vénéraient le site et y priaient ; leur influence stylistique est visible dans certaines grottes. Enfin pendant la révolution culturelle, la ville bénéficia également de son éloignement.

Au début de ce siècle, cependant, des « démons étrangers » commencèrent l'exploration systématique et le

pillage de l'héritage culturel de la route de la soie. L'explorateur suédois Sven Hedin, l'archéologue parisien Paul Pelliot, Langdon Warner, de l'Université Harvard, et Aurel Stein, un collectionneur britannique d'origine hongroise, emportèrent autant d'objets qu'ils pouvaient en transporter. Stein arriva sur les lieux en 1907. Il avait apparemment entendu parler du site par les premiers visiteurs occidentaux connus : le comte hongrois Bela Szechenyi et deux de ses compagnons, qui avaient atteint Dunhuang en 1878.

Le nom de Stein est maudit des archéologues et des historiens chinois, parce que le Hongrois emporta 7 000 anciens textes et peintures bouddhistes, ainsi que le livre le plus ancien, le *Soutra du diamant*, qui fut imprimé en l'an 868 de notre ère. Tous ces documents, qui se trouvent aujourd'hui au British Museum de Londres, ont été pris dans la grotte 17, une bibliothèque qui avait été dissimulée vers l'an 1000 et ne fut redécouverte qu'au début des années 1900 par le prêtre taoïste Wang Yuanlu. Wang vendit secrètement les manuscrits à Stein, puis à Pelliot, pour des sommes dérisoires qu'il utilisa pour « restaurer » les temples creusés dans la roche. Quand la Chine fut fermée aux archéologues, vers le milieu des années 1920, les explorateurs européens avaient enlevé plusieurs milliers de textes, et aussi des statues et



10. LA PRÉSERVATION des sites comprend un suivi des peintures (à gauche), ainsi que des contrôles de la température et de l'humidité dans les grottes et sur la falaise (à droite). À partir de ces informations, les conservateurs peuvent déterminer le nombre de visiteurs autorisés à pénétrer dans les grottes, et le temps de visite.

des fresques. Ces objets sont dispersés dans les grands centres et musées archéologiques d'Europe, d'Inde, du Japon et des États-Unis.

Aujourd'hui les grottes de Mogao sont encore menacées, mais par les éléments naturels : au cours des années, les vents ont attaqué la falaise, et le sable qui est tombé des voûtes a en partie rempli les grottes, recouvrant les sculptures et les fresques. La pluie et la neige qui se sont infiltrées ont endommagé les peintures, détachant de la paroi rocheuse la couche d'argile sur laquelle elles se trouvaient. En outre, la roche elle-même a été fissurée par les séismes, dont le plus récent s'est produit en 1933, de sorte que des grottes entières se sont écroulées.

Les visiteurs, également, ont endommagé les œuvres. Naguère ils allumaient des torches dans les grottes, couvrant les peintures de suie. Plus récemment, les touristes ont introduit de l'humidité qui menace les pigments déjà décolorés ; les sols millénaires ont été usés. Depuis 1980, Mogao est ouvert au public et l'augmentation du nombre de vols vers l'aéroport agrandi de Dunhuang a modifié la région : des hôtels récemment construits dépaireillent la ville ancienne.

Depuis 1988, l'Institut Getty et le Bureau chinois des vestiges culturels tentent de préserver ce site célèbre que l'UNESCO a désigné comme élément du patrimoine mondial en 1987. Les équipes de conservation ont construit une palissade coupe-vent de cinq kilomètres de long. Faite de tissu synthétique et de plantes adaptées au désert, cette protection placée au sommet de la falaise évite l'ensablement des grottes : il fallait enlever chaque année 2 000 mètres cubes de sable devant les grottes ; le volume à déblayer a été réduit de 60 pour cent. De surcroît, des filtres à poussière placés aux portes des grottes protègent contre le sable qui continue de tomber du sommet. Pour renforcer les grottes, les archéologues, qui ont recensé les fissures, prévoient de les boucher.

Une station météorologique à énergie solaire installée sur la falaise recueille des données de base telles que la vitesse et la direction du vent, l'éclairement solaire, l'hygrométrie et la hauteur d'eau tombée. Dans les grottes, des capteurs mesurent le degré d'humidité, la concentration en dioxyde de carbone, la température et

le nombre de visiteurs. Ces données, comparées aux données collectées dans les grottes fermées au public et aux données collectées à l'extérieur, permettent de définir des stratégies touristiques avisées.

Malgré cette surveillance étroite, il a fallu limiter le défilé des visiteurs dans les grottes, surtout dans les plus populaires, où les fresques représentent la vie de Bouddha. L'Académie de Dunhuang a donc construit, à proximité, un grand musée et des galeries d'exposition où une dizaine de grottes ont été reproduites. Ces imitations grandeur nature sont bien éclairées, contrairement aux grottes elles-mêmes, et les visiteurs sont autorisés à y passer plus de temps que dans les grottes originales.

L'archéologie chinoise, qui renaît depuis une vingtaine d'années, a fait des découvertes inespérées : la tombe du premier empereur, Qinshihuang, emplie de milliers de soldats et de chevaux en terre cuite, fut découverte à Xi'an en 1974 ; des momies caucasiennes vieilles de plus de 4 000 ans ont été trouvées dans la partie Sud du désert de Taklamakân ; dans la province du Jiangxi, une tombe du XIII^e siècle avant notre ère a livré des poteries et des vases en bronze, des cloches et des armes ornées d'une iconographie inconnue jusqu'alors. Tous ces sites devront être préservés pour que les voyageurs d'aujourd'hui puissent continuer de découvrir l'histoire du monde.

Neville AGNEW est directeur adjoint de programme à l'Institut Getty. Fan JINSHI est directrice adjointe de l'Académie de Dunhuang.

Peter HOPKIRK, *Foreign Devils on the Silk Road : The Search for the Lost Cities and Treasures of Chinese Central Asia*, University of Massachusetts Press, 1980.

Roderick WHITFIELD, *Dunhuang, Caves of the Singing Sands : Buddhist Art from the Silk Road*, photographies de Seigo Otsuka, Textile and Art Publications, Londres, 1995.

Conservation of Ancient Sites on the Silk Road, Proceedings of an International Conference on the Conservation of Grotto Sites : Mogao Grottoes, Dunhuang, the People's Republic of China, sous la direction de Neville Agnew, Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1997.

Les poissons lumineux fossiles des Carpates

RUZENA GREGOROVA

Les organes émetteurs de lumière permettent aux poissons de vivre dans les ténébreuses profondeurs abyssales. Cette merveilleuse adaptation est révélée par des fossiles vieux de 35 millions d'années.

L'origine des poissons d'eaux profondes est d'autant plus fascinante qu'elle demeure en partie énigmatique. La vie n'est pas apparue dans les abysses où les conditions de vie sont difficiles : les poissons actuels des profondeurs sont les descendants d'espèces d'origine littorale. Ces poissons ont gagné les profondeurs à la suite de variations climatiques ou de changements du niveau des mers, par exemple à la suite de l'enfoncement d'îles ou de zones continentales, ou lors des baisses de niveau dues aux glaciations. Les espèces entraînées dans les zones profondes qui y ont survécu se sont adaptées et diversifiées, profitant de l'espace libre et de la fixité du milieu.

Il est patent qu'à ces profondeurs les poissons lumineux avaient un extraordinaire avantage adaptatif : aucune lumière solaire ne pénètre à ces profondeurs. Ce sont ces poissons que nous examinerons ici, en nous préoccupant d'abord de leurs origines.

L'histoire d'une adaptation

Les paléontologues pensent que les premiers poissons lumineux datent de la fin de l'ère mésozoïque, il y a quelque 75 millions d'années. Ces premiers poissons abyssaux ont-ils survécu à la phase d'extinction drastique de la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années ? C'est probable, car on trouve dans l'Oligocène des Carpates (–35 millions d'années) des poissons fossiles qui possèdent des organes lumineux et qui sont proches de leurs descendants actuels.

Les poissons abyssaux de l'Oligocène des Carpates appartiennent à quatre familles : les Myctophidae (poissons-lanternes, ordre des Myctophiformes), les Gonostomatidae, les Photichthyidae et les Sternoptychidae (poissons-dragons, ordre des Stomiiformes). Paradoxalement, au début du siècle, certains de ces poissons ont été classés, sur la base de leur forme, parmi les poissons d'eau douce du genre *Leuciscus*, ce qui a entraîné des interprétations paléo-écologiques erronées. Ainsi, les sédiments oligocènes de la formation ménilitique où les fossiles ont été découverts ont été considérés longtemps comme les résultats de la sédimentation dans des milieux d'eau douce. Ces opinions étaient corroborées par des découvertes d'insectes, de plantes et de plumes d'oiseaux.

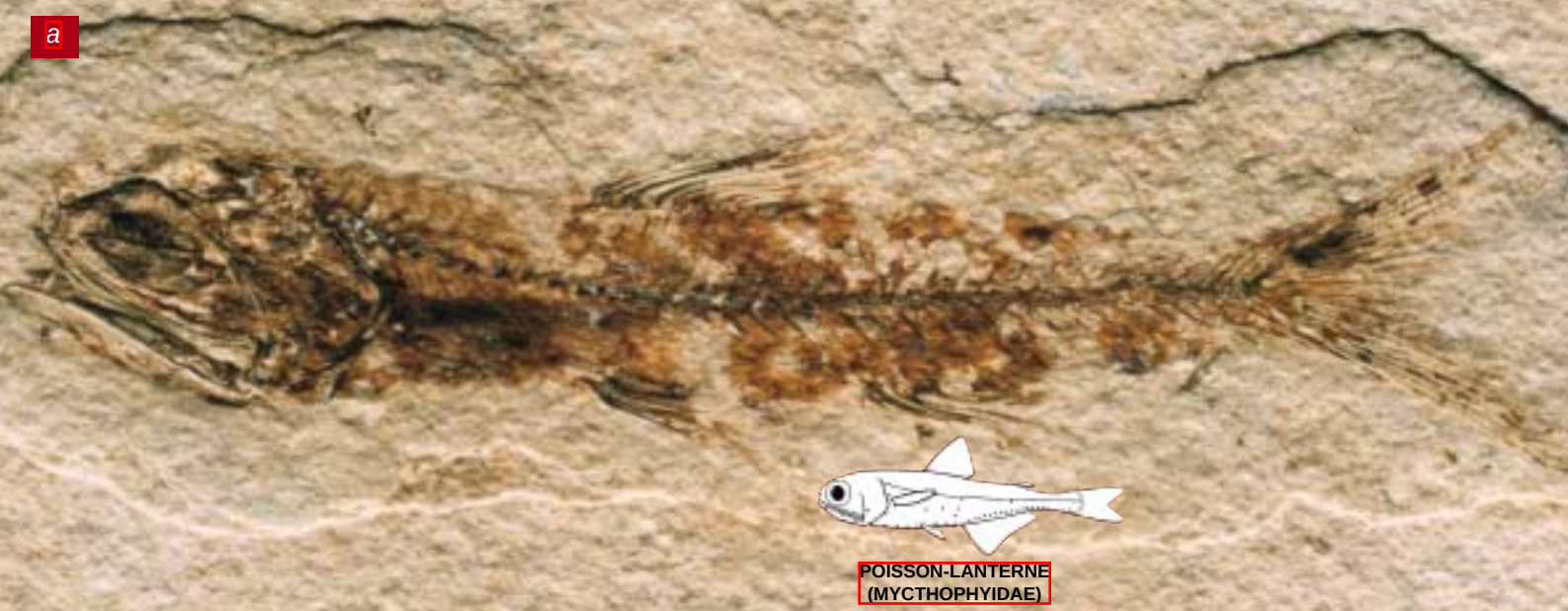
Dans les années 1930, le paléontologue tchèque, Vladimir Kalabis, identifia les organes lumineux conservés sur les poissons fossiles provenant de l'Oligocène de Moravie (République tchèque), et révisa les descriptions anciennes des représentants fossiles de la famille des Myctophidae.

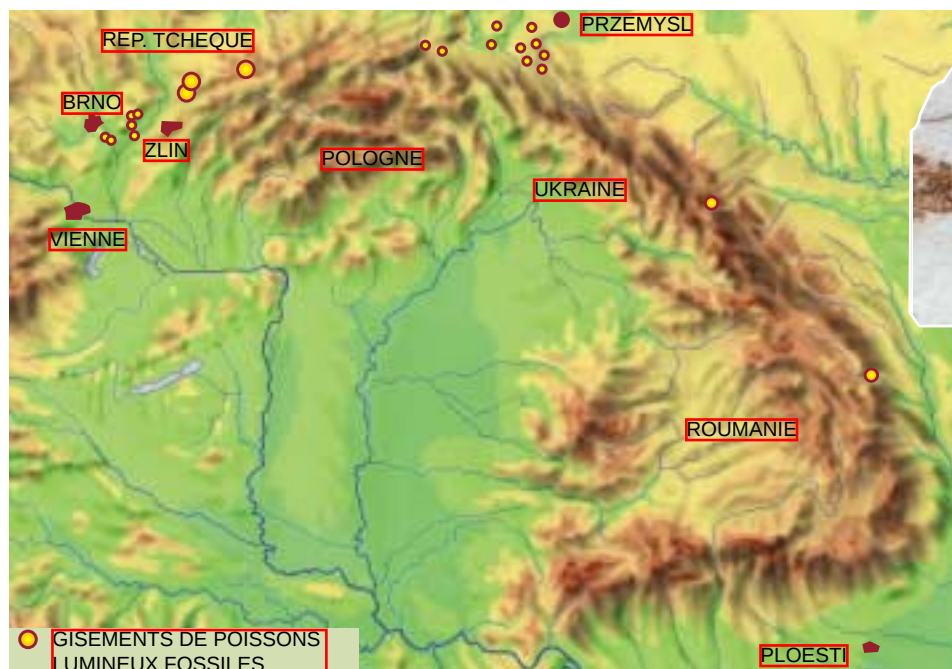
En 1939, Camille Arambourg, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, écrivait à Vladimir Kalabis : «C'est en effet la première fois que des poissons de ce genre sont reconnus dans des niveaux inférieurs au Miocène. Jusqu'ici les seuls connus à l'état fossile étaient ceux du Pléistocène de Tarente et ceux du Sahélien que j'ai décrits, des couches de Licata et d'Oran et où pour la première fois j'ai signalé la présence d'organes lumineux conservés.»

La branche Nord de la Téthys

Aujourd'hui, le caractère marin des sédiments oligocènes qui appartiennent à la formation ménilitique des Carpates est incontestable. Cette formation présente des faciès lithologiques uniques le long de tout l'arc des Carpates, et elle est caractérisée par la présence du membre siliceux auquel la formation doit son nom. À l'origine, le terme de «ménilitite» a été appliqué par J.-C. Delamétherie, en 1797, à des concrétions siliceuses trouvées dans les argiles schisteuses de Ménilmontant. Les sédiments des Carpates sont

1. LES POISSONS LUMINEUX FOSSILES des Carpates appartiennent à quatre familles, les Myctophidae ou poissons-lanternes, les Gonostomatidae, les Photichthyidae et les Sternoptychidae ou poissons-dragons. Ils datent de 35 millions d'années. *Oligophum* (a), de cinq centimètres de long, a l'œil bien développé, caractère typique de la famille des Myctophidae. Les écailles (b) où sont implantés les photophores (taches noires) sont des lentilles qui contrôlent la propagation des rayons lumineux. Les photophores ventraux sont visibles sur la partie ventrale (c). *Eomyctophum* (d) est un Myctophidae fossile originaire du Caucase où l'œil géant est bien visible (cinq centimètres). *Scopeloides glarisianus* (Gonostomatidae) est répandu dans l'Oligocène des Carpates, des Alpes et du Caucase (e). La partie antérieure du corps (20 centimètres) de *Vinciguera* (Photichthyidae) avec le contour de l'estomac, est particulièrement bien conservée, comme les photophores pectorales (f). *Argyropelecus cosmovicii* (Sternoptychidae, ou Hache d'argent) provient du gisement de Bys-trice / Olsi (g). La forme (25 millimètres) découpée du profil ventral est typique. Les photophores sont reconnaissables par les grandes écailles spécialisées qui les portent.





2. LES GISEMENTS (à gauche) riches en poissons lumineux fossiles des Carpates : la roche ci-dessus comprend trois spécimens de poissons lumineux (*Vinciguera* et *Oligophum*)

les vestiges de la mer dite Paratéthis, qui était la branche Nord de la mer à laquelle on a donné le nom mythologique de Téthys et qui, il y a une centaine de millions d'années, séparait les continents du Nord et du Sud. La formation de la chaîne alpine a refermé lentement cet espace marin, mais, à l'Oligocène, la Paratéthis regorgeait encore de poissons. Le milieu calme permettait une sédimentation fine, et aucun organisme prédateur ne vivait sur les fonds où l'oxygène était absent. Aussi ces poissons sont-ils remarquablement bien fossilisés, et les organes lumineux sont conservés. L'ensemble des poissons osseux et des requins qui accompagnent les poissons lumineux est constitué de formes pélagiques, c'est-à-dire vivant en pleine mer. La composition de cette faune fossile correspond à des conditions écologiques de faunes océaniques contemporaines.

La bioluminescence, capacité de certains organismes à produire de la lumière, est une fonction très répandue, connue chez plus de 700 genres animaux et végétaux. Dans l'obscurité des fonds océaniques, la bioluminescence est un caractère commun aux animaux vivant à des profondeurs supérieures à 200 mètres, ce qui correspond à la zone aphotique, c'est-à-dire sans lumière.

Le mécanisme général de la bioluminescence est bien connu. Les animaux sont capables de produire de la lumière avec un rendement de 99 pour

cent, bien meilleur que les dispositifs techniques actuels.

La conservation des organes lumineux à l'état fossile renseigne sur l'anatomie fonctionnelle qui permet la détermination de la position systématique des poissons et l'interprétation des paléo-environnements. On peut alors s'interroger : les ancêtres des poissons lumineux ont-ils vécu dans les mêmes conditions que leurs descendants actuels ? Un point est indubitable : quand les photophores sont identifiés sur les fossiles, on peut être sûr que leurs porteurs ont vécu dans les milieux sombres des profondeurs.

Poissons lanternes

Les poissons lanternes (famille des Myctophidae, ordre des Myctophiformes) sont aujourd'hui les plus largement répartis, les plus diversifiés et les plus abondants de tous les poissons mésopélagiques des océans. Ils constituent jusqu'à 65 pour cent des poissons mésopélagiques. Ces petits poissons, ne dépassant pas 20 centimètres de longueur, aux grands yeux, sont répartis dans le monde entier, des eaux arctiques aux eaux antarctiques. Pendant le jour, ils vivent dans les profondeurs océaniques (200 à 1 000 mètres) ; pendant la nuit, la plupart montent jusqu'à 100 mètres de profondeur, où ils chassent de petits crustacés. Ils ne supportent aucune lumière, même pas celle de la Lune.

On connaît plus de 30 genres et plus de 300 espèces de Myctophidae, mais, au niveau de l'ostéologie et des caractères méristiques (comptes de rayons de nageoires ; nombre de vertèbres) et morphométriques (mesures), ils sont conservateurs : ces caractères ne présentent pas de grandes variations. Au contraire, les organes lumineux, les photophores, ont plus évolué et sont donc beaucoup plus utiles pour la taxonomie.

Les photophores sont regroupés en séries sur la partie ventrale du corps et sur la tête. Les photophores du corps (ceux qui sont conservés à l'état fossile) sont couverts par des écailles spécifiques qui orientent et concentrent les rayons lumineux. Les lanternes émettent une lumière de couleur bleue, jaune ou verte en fonction de la réaction chimique (oxiluminescence) stimulée par les nerfs. Les fonctions des divers photophores sont différentes. On suppose que les photophores ayant un caractère unique et propre à chaque espèce servent de signal d'identification au sein du groupe, tandis que les photophores situés devant les yeux éclairent les proies ; le rôle des photophores ventraux est ambigu : ils ont probablement une fonction de camouflage, comme chez *Argyrops*. Ajoutons à cette liste les organes lumineux secondaires de certaines glandes qui, au contraire des photophores, diffèrent chez le mâle et chez la femelle et jouent un rôle pendant la reproduction.

Les ancêtres fossiles ne diffèrent pas beaucoup des espèces actuelles pour ce qui est de la forme générale et de la structure osseuse. Si les photophores n'étaient pas conservés, peut-être aurait-on rattaché ces poissons à un ou plusieurs genres et espèces

récents, parce que les différences de fossilisation et de déformation peuvent donner l'impression de l'existence de plusieurs taxons.

À partir des années 1960-1970, des travaux ont commencé à paraître sur leur ostéologie détaillée, sur leurs photophores et sur l'étude de leurs larves, ainsi que des hypothèses sur leur évolution. Il est clair que, dans ce cas, l'étude paléontologique, concentrée sur la filiation, dépend du niveau des connaissances sur les représentants actuels. Il n'est pas toujours facile de trouver des caractères systématiques utilisables à la fois pour les fossiles et

pour les formes modernes. Aujourd'hui, les systématiciens utilisent de plus en plus les caractères des parties molles du corps, voire les méthodes moléculaires.

En pareil cas, on ne peut donc que comparer les résultats d'analyses systématiques. Il faut ainsi souligner l'importance de la présence des photophores à l'état fossile, qui a permis de fructueuses discussions sur l'évolution de ce groupe. En analysant les Myctophidae fossiles, on a pu utiliser 20 des 59 caractères systématiques pour des Myctophidae actuels. Les résultats de ces études sont en accord avec la théorie de

l'évolution des Myctophidae fondée sur les études ostéologiques des photophores et des stades larvaires. L'absence d'importantes différences entre l'ostéologie des représentants fossiles et actuels des Myctophidae indique un conservatisme dans l'évolution du squelette de ces animaux.

Toutefois, en ce qui concerne les photophores, les fossiles possèdent une distribution primitive, inconnue chez les Myctophidae d'aujourd'hui. C'est une démonstration classique d'une évolution mosaïque quand certains caractères évoluent plus vite que d'autres.

La bioluminescence

La bioluminescence, émission de lumière visible par des organismes vivants, est une propriété partagée par des bactéries, des champignons et des animaux.

L'émission de lumière est continue chez les bactéries et les champignons, mais, chez les animaux, elle est déclenchée par une stimulation mécanique, électrique ou thermique.

Le mécanisme chimique de la bioluminescence est, dans ses principes, le même chez toutes les espèces : une protéine est oxydée par une enzyme, puis elle revient à sa forme stable en émettant un photon. D'autres molécules sont parfois nécessaires au déroulement de la réaction : chez la luciole, un composé de la luciférine et de l'acide adénosine triphosphorique est oxydé, la lumière étant émise par la réduction inverse.

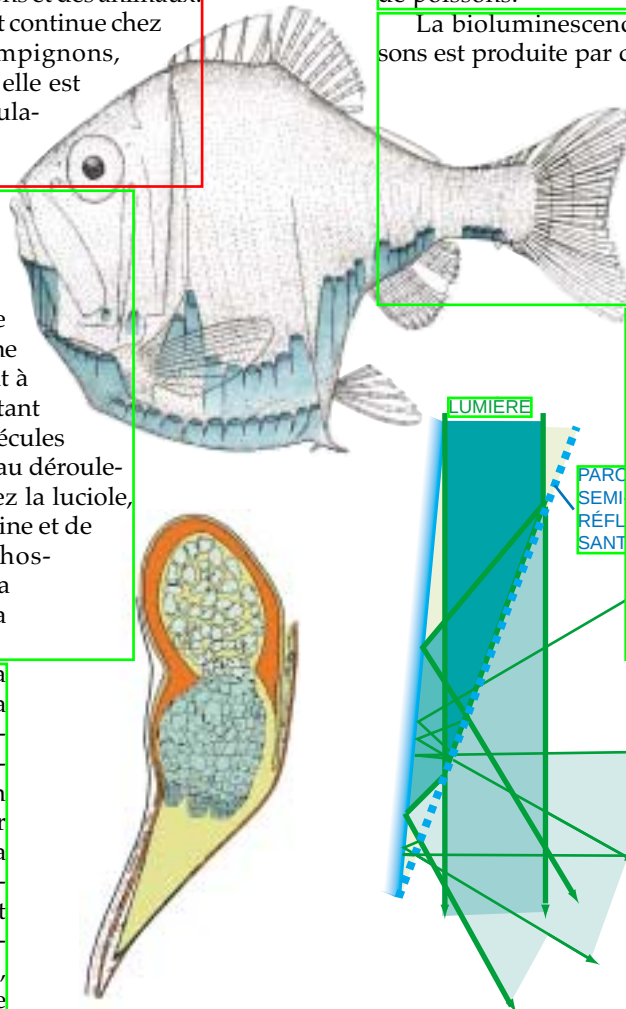
Chez les poissons, la protéine oxydée est la luciférine. Elle est transformée par une stimulation en oxyluciférine, en présence d'oxygène, par l'enzyme spécifique, la luciférase. Cette oxyluciférine, très instable, est retransformée par la réaction inverse en luciférine, toujours en présence de luciférase, avec émission d'un photon, dont la longueur d'onde varie entre 440 et 500 nanomètres

(couleurs bleu à vert). Les structures précises de la luciférine et de la luciférase varient selon les espèces de poissons.

La bioluminescence de plusieurs familles de poissons est produite par des bactéries symbiotiques. Ainsi, *Photobacterium phosphoreum* est présente dans les organes lumineux des Macrouridés, des Opisthoproctidés et des Cérates. La lumière, émise en continu, est filtrée par le poisson au moyen de cellules pigmentées en noir, qui la masque plus ou moins.

Chez la plupart des crustacés et des poissons, les cellules émettrices de lumière, les photocytes, sont rassemblées dans des photophores. Dans ces organes de quelques millimètres de long, des couches réfléchissantes et semi-réfléchissantes guident la lumière vers l'extérieur en la modulant.

Chez les poissons-haches, la lumière sort de la cavité où elle est produite par des tubes dont la surface interne est très réfléchissante et la face externe semi-réfléchissante. L'intensité de la lumière émise par le poisson diminue à mesure que l'angle de la direction d'émission avec la verticale augmente. Cette répartition reproduit l'illumination sous-marine ambiante.



Le POISSON-HACHE, comporte, en prolongement des photophores, un guide de lumière conique dont une paroi est semi-réfléchissante. La lumière venant du haut est ainsi partiellement renvoyée horizontalement. Les fossiles ont une structure semblable à celle des poissons modernes.

Les poissons-dragons

Les membres de l'ordre des Stomiiformes (poissons-dragons, à l'aspect souvent effrayant) constituent aussi une part importante des poissons mésopélagiques (vivant entre 200 et 1 100 mètres de profondeur) et bathypélagiques (à plus de 1 100 mètres). Leur taille est comprise entre deux centimètres (*Cyclothone pygmaea*) et 50 centimètres (*Opistomias micripnis*). Parmi les vertébrés vivant dans le monde aujourd'hui, *Cyclothone* est le genre dont les espèces sont représentées par le plus grand nombre d'individus. Chez ce genre, ainsi que chez le genre *Gonostoma*, on constate aussi un intéressant phénomène de changement de sexe au cours de la croissance.

Comme les Myctophidae, les poissons-dragons ont une distribution mondiale et sont fréquents surtout dans les zones tempérées et subtropicales. Quelques-uns d'entre eux entreprennent aussi des migrations verticales. Leurs photophores, de construction particulière, sont arrangés suivant seulement deux rangées. Ils ont la même importance pour la taxonomie que chez les Myctophidae. Leur lumière est d'origine bactérienne, ce qui a été confirmé récemment par la biologie moléculaire.

On trouve à l'état fossile dans les Carpates les représentants de trois familles des Stomiiformes : les Gonostomatidae, les Photichthyidae et les Stenopterygiidae.

Le genre fossile *Scopeloides* (Gonostomatidae) est très abondant dans les Carpates. Il est connu aussi dans les faciès équivalents du Caucase, des Alpes et de l'Iran. On le considère comme l'ancêtre de *Cyclothone* et de *Gonostoma*. *Scopeloides* a des rangées de petites dents qui sont interrompues par des dents plus grandes, ce qui est caractéristique de beaucoup de membres de l'ordre ayant un mode de vie de grands prédateurs. On peut observer le même phénomène de l'évolution mosaïque, parce qu'au niveau de l'ostéologie il n'y a pas beaucoup de différences : *Vinciguerria*, représentant des Photichthyidae, a été longtemps rangé parmi les Gonostomatidae parce qu'il possède le même plan primitif du corps, mais récemment l'appartenance à ce genre a été révisée.

Argyropelecus et un Maurolicinae (familles de Stenopterygiidae, Hache d'argent) sont deux genres appartenant à un groupe très spécialisé, avec un corps haut, déprimé, et des yeux

télescopiques. Ils ressemblent vraiment à une hache d'argent flottant verticalement dans l'eau. Les photophores sont placés en groupes sur le côté ventral du corps, sur des écailles modifiées. Dans ce cas, la bioluminescence est utilisée pour camoufler la face ventrale en mimant la faible lumière qui provient de la surface. Chaque organe est recouvert d'un filtre coloré pourpre qui ne laisse passer que les longueurs d'onde correspondant au bleu : la couleur de la lumière émise imite ainsi exactement celle de la mer.

Une dizaine de représentants fossiles du genre *Argyropelecus* ont été trouvés en Moravie ; les 400 autres spécimens sont plus proches de *Maurolicus*.

Tous les genres fossiles des poissons lumineux des Carpates, *Oligophum*, *Eomyctophum*, *Scopeloides*, *Vinciguerria*, *Argyropelecus* et un Maurolicinae représentent le plus ancien enregistrement fossile sûr de la faune abyssale et pélagique. Quelques genres crétacés ont été rangés chez les Myctophiformes et les Stomiiformes, mais en fait les descriptions doivent être réévaluées. Dans le Néogène (Miocène et Pliocène), qui fait suite à l'Oligocène, les poissons lumineux sont plus nombreux et plus diversifiés et très proches de la faune actuelle. Il sont connus dans les sédiments des régions téthysiennes en Algérie, en Espagne et en Italie. Les documents fossiles provenant des Carpates apparaissent donc comme un excellent point de départ pour l'étude des origines des poissons mésopélagiques.

Ruzena GREGOROVA est chef du Laboratoire de paléontologie et de géologie. au Musée morave, à Brno.

R. GREGOROVA, (*Stomiiformes, Teleostei*) from the Tertiary of the Zdanice-Subsilesian Unit (Moravia), Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat., 74, 1-2:87-96, 1992.

R. GREGOROVA, Première découverte de *Glarichelys knori* (Gray), tortue marine (Chelonidae) dans l'Oligocène de des couches à menilite de Moravie (Tchécoslovaquie), Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat., 77:63-69, 1993.

R. GREGOROVA et E. PURKYNova, A preliminary note on the records of the fishes (Teleostei) from the Lower Cretaceous of the Silesian Unit (Hauterivian-Barremian), Cas. Slez. Muz. Opava (A), 44:281-283, 1995.

Les sursauts gamma

GERALD FISHMAN • DIETER HARTMANN

Des observations récentes de ces explosions mystérieuses font espérer que l'on en connaîtra bientôt les sources. On envisage notamment des collisions d'étoiles à neutrons.

Alfred T. Komarek

Trois fois par jour environ, un puissant éclair de rayons gamma, invisible à l'œil mais détectable par les instruments astronomiques, illumine le ciel. Chaque éclair, qui dure entre quelques secondes et quelques minutes, émet plus d'énergie que le Soleil n'en émettra au cours de sa vie de dix milliards d'années. Quelle est l'origine de ces sursauts et comment libèrent-ils tant d'énergie? Les astrophysiciens étudient ce mystère, mais, depuis près de 30 ans, l'imprévisibilité et la fugacité du phénomène avaient pénalisé son étude : les impulsions proviennent de toutes les directions de l'espace et disparaissent rapidement sans laisser de traces.

Toutefois le 28 février 1997 sera marqué d'une pierre blanche : le satellite italien *Beppo-SAX* observa un sursaut pendant environ 80 secondes. Grâce à la précision de visée de ses détecteurs, les astronomes identifieront la position du sursaut – nommé GRB 970228 – avec une précision de quelques minutes d'angle dans la constellation d'Orion, entre les étoiles Alpha du Taureau et Gamma d'Orion. En moins de huit heures, les opérateurs du satellite, à Rome, retourneront *Beppo-SAX* afin d'observer la même région avec le télescope X du même satellite. Ils décelèrent alors une source de rayons X (un rayonnement

d'énergie inférieure à celle des rayons gamma) qui faiblissait rapidement, et déterminèrent sa position à moins d'une minute d'angle.

Jamais un sursaut n'avait été localisé si précisément, ni si rapidement. De puissants télescopes opérant dans le visible, dont les champs de vision sont étroits, purent réagir et le traquer. Des astronomes aux îles Canaries, appartenant à une équipe internationale dirigée par Jan van Paradijs, de l'Université d'Amsterdam, apprirent la détection par courrier électronique. Ils disposaient heureusement de temps d'observation sur le télescope *William Herschel* de 4,2 mètres qu'ils avaient utilisé pour rechercher d'autres sursauts. Vingt et une heures après le sursaut, ils photographièrent la région, puis renouvelèrent la prise de vue huit jours plus tard : une tache lumineuse, présente sur la première photographie, s'était évanouie.

Il y a plus. Le 13 mars, le télescope *NTT* de l'Observatoire européen austral, situé à La Silla, au Chili, visa longtemps la position déterminée par *Beppo-SAX* et y discerna une lueur diffuse. Plus tard, à l'aide du Télescope spatial *Hubble*, on y décela un point entouré d'une lueur allongée. De nombreux astrophysiciens pensent que cette lueur représente une galaxie, mais cette hypothèse est à confirmer.

S'il s'agit bien d'une galaxie, elle doit être très éloignée, près des limites de l'Univers observable. Dans ce cas, pour que la lumière parvienne jusqu'à nous, l'énergie libérée lors d'un sursaut gamma est extraordinaire.

Espoirs déçus

Cette découverte a redonné espoir aux spécialistes des sursauts gamma, encore sur le coup de deux déconvenues. En novembre 1996, le satellite *HETE*, équipé d'instruments de localisation des sursauts gamma, ne se sépara pas de sa fusée de lancement et fut perdu. Le mois suivant, la sonde russe *Mars'96*, emportant plusieurs détecteurs de rayonnement gamma, retomba dans l'océan Pacifique après un défaut de fonctionnement du moteur de la fusée de lancement. Ces engins faisaient partie d'une flotte spatiale conçue pour rechercher de manière concertée l'origine des sursauts gamma. Parmi les nouveaux satellites équipés d'instruments sensibles aux rayons gamma,

1. UN LOINTAIN SURSAUT de rayonnement atteint la Terre et les détecteurs à bord du satellite *Beppo-SAX*. Malgré son intensité extrêmement élevée, ce rayonnement ne traverse pas l'atmosphère terrestre. Toutefois, des télescopes pointés sur un sursaut gamma récent nommé GRB 970228 décelèrent une émission rémanente dans le visible qui subsista plusieurs semaines.

seul *Beppo-SAX* fut placé sur orbite, le 20 avril 1996.

Les sursauts gamma furent découverts accidentellement à la fin des années 1960 par la série de satellites *Vela*, du Département américain de la défense. Ces satellites détectives traquaient les éventuelles explosions nucléaires clandestines soviétiques dans l'espace, peut-être dissimulées derrière la Lune. À la surprise des militaires, les satellites enregistrèrent un rayonnement gamma qui n'émanait pas de la Terre, mais de l'espace. Lorsque cette découverte fut révélée au public, en 1973, les astronomes saluèrent la découverte d'un nouveau phénomène cosmique.

Après ces premières observations, les supputations sur la source des sursauts gamma abondèrent : trous noirs, supernovae, restes denses et sombres d'étoiles nommés étoiles à neutrons, etc. Toutefois, la question fondamentale demeurait : on ignorait si les sursauts naissaient à 100 années-lumière ou à plusieurs milliards d'années-

lumière de la Terre, dans une galaxie lointaine. Par conséquent, il était difficile d'estimer l'énergie des événements originels.

Des étoiles à neutrons locales ?

Au cours des années 1980, les astronomes s'accordèrent pour penser que les sursauts provenaient d'étoiles à neutrons proches, situées dans notre Galaxie. En effet, on avait observé des raies sombres dans les spectres (où le rayonnement gamma est dispersé, comme la lumière par un prisme) de certains sursauts, et les théoriciens avaient supposé que ces raies proviennent d'une émission par des électrons accélérés à des vitesses relativistes, lors de la reconnexion des lignes de champ magnétique d'une étoile à neutrons. Sur le Soleil, un phénomène similaire, quoique à des énergies moindres, déclenche les éruptions solaires.

En avril 1991, la navette spatiale *Atlantis* mit sur orbite l'Observatoire

Compton, où était embarqué un instrument d'étude des sources gamma transitoire, BATSE. En un an, BATSE infirma toutes les hypothèses. Les sursauts gamma ne se répartissaient pas le long de notre Galaxie, la Voie lactée, et ils n'émanaient pas de galaxies proches ou d'amas de galaxies. Ils se répartissaient au contraire de manière isotrope, en nombre à peu près égal dans toutes les directions du ciel (voir la figure 6). Cette isotropie des sources laissait toutefois le champ ouvert à de multiples possibilités, d'une origine très locale (le Système solaire), à extragalactique en passant par une origine galactique. Selon les théoriciens, dans ce dernier cas, les sursauts provenaient d'étoiles à neutrons occupant un grand halo sphérique, autour de la Galaxie.

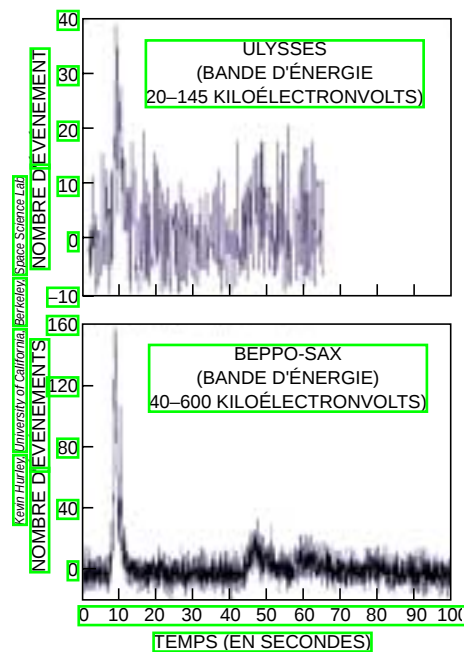
Cependant, ce dernier modèle se heurte à une difficulté majeure : la Terre se trouve à près de 25 000 années-lumière du centre de notre Galaxie. Aussi, ce halo doit être très vaste. Pour que, de la Terre, nous voyons les étoiles



sources de sursauts gamma réparties uniformément sur la voûte céleste, il doit mesurer près de 600 000 années-lumière de rayon. S'il en est ainsi, le halo de la galaxie voisine, Andromède, devait être aussi étendu et on devrait observer une concentration de sursauts dans sa direction. Or, BATSE n'a rien décelé de tel. Mais en a-t-il les moyens?

L'uniformité de la répartition des sursauts gamma a convaincu la plupart des astrophysiciens qu'ils naissent jusqu'à des distances de trois à dix milliards d'années-lumière. À de telles distances, les sursauts devraient cependant montrer les effets de l'expansion de l'Univers : les galaxies lointaines s'éloignent de la Terre à grande vitesse, car la lumière qu'elles émettent est décalée vers des fréquences inférieures, plus rouges pour les rayonnements visibles. De la même manière, les sursauts gamma devraient présenter un «décalage vers le rouge» ainsi qu'un allongement de leurs durées.

Malheureusement, BATSE n'a pas été conçu pour détecter dans le domaine des rayons gamma, les raies brillantes ou sombres qui caractérisent des éléments chimiques spécifiques et qui seraient décalées vers le rouge. En avril 1997, des astronomes utilisant le télescope *Keck*, à Hawaï, ont obtenu un spectre dans le visible de la lueur résiduelle de GRB 970228 : il est lisse et rouge, dépourvu de raies révélatrices. Toutefois, Jay Norris, du Centre spatial *Goddard* de la NASA, et Robert Mallozzi, de l'Université d'Alabama, ont analysé statistiquement les sur-



2. ÉVOLUTION TEMPORELLE du sursaut GRB 970228, mesurée par la sonde *Ulysse* (en haut) et par le satellite *Beppo-SAX* (en bas). On remarque une bouffée de photons gamma, brève et intense.

sauts observés : d'après leurs résultats, les spectres des sursauts les plus faibles, et par conséquent les plus lointains, sont dilatés temporellement et décalés vers le rouge. D'autres interprétations (controversées) existent néanmoins.

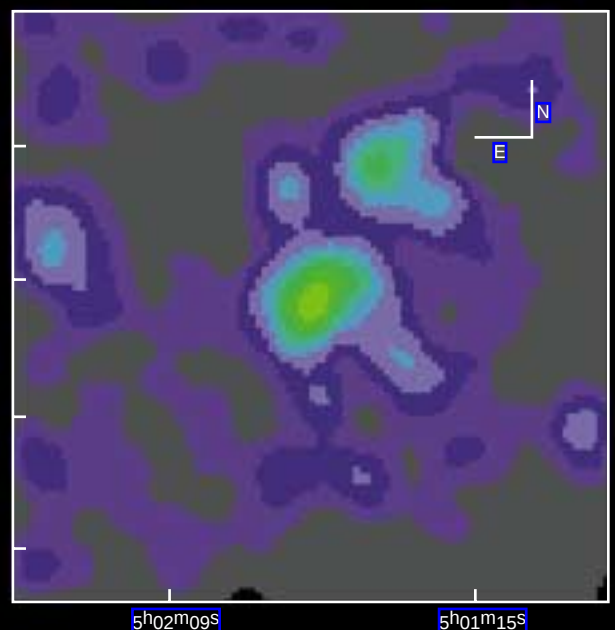
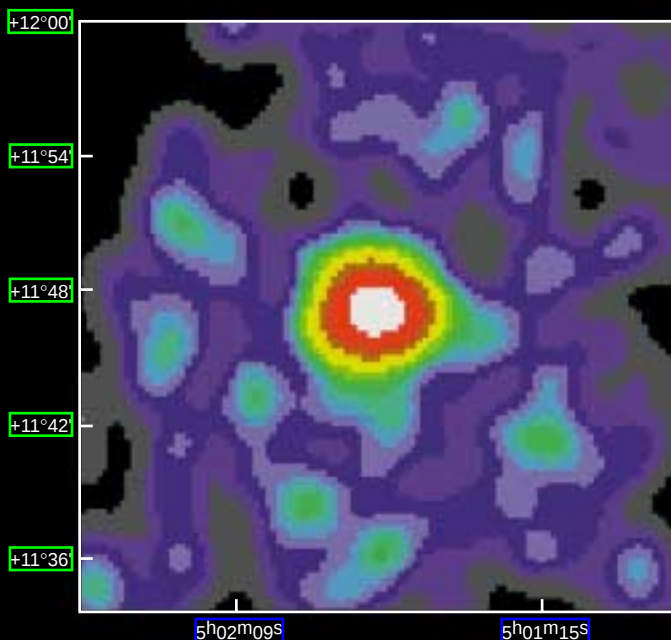
La grande variété des sursauts rend toute explication difficile. Un sursaut peut durer entre 30 millisecondes et 15 minutes – et, dans un cas, plus d'une heure et demie. La luminosité de certains sursauts varie de manière

imprédictible : on observe des bouffées de rayonnement intense sans émission détectable entre elles. D'autres sursauts décroissent continûment. Les spectres sont également compliqués. La majeure partie de l'énergie d'un sursaut est émise entre 100 000 et un million d'électronvolts, indication de la grande température de la source (l'énergie des photons situés dans le visible, principal rayonnement de notre Soleil à 6 000 °C, est de quelques électronvolts). Avec le temps, la fréquence de certains sursauts gamma diminue lentement, de sorte qu'ils émettent des rayons X. Bien que totalisant seulement un dixième de l'énergie du sursaut gamma, l'émission X comporte beaucoup de photons, car ces derniers sont moins énergétiques que les photons gamma.

Si les sursauts émanent de distances cosmologiques, leurs énergies doivent être supérieures à 10^{44} joules (il faut environ 1 joule pour soulever 100 grammes à une hauteur de un mètre). Cette énergie doit être émise en moins de quelques secondes dans une région qui mesure quelques dizaines de kilomètres de diamètre.

Quelles circonstances pourraient engendrer une telle concentration

3. GRACE À L'IMAGE EN RAYONS X obtenue par le satellite *Beppo-SAX* le 28 février (image de gauche), on localisa le sursaut à quelques minutes d'angle près. Au sol, les télescopes purent alors rechercher une émission dans le visible. Le 3 mars, la source s'était considérablement affaiblie (image de droite).



d'énergie? D'un point de vue énergétique, le meilleur candidat serait la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons (voir *Les systèmes doubles d'étoiles à neutrons*, par Tsvi Piran, *Pour La Science*, juillet 1995). En perdant de l'énergie gravitationnelle sous forme de rayonnement, les étoiles tombent en spirale l'une vers l'autre et fusionnent en un trou noir. Selon les estimations théoriques, ce type d'événement se produit tous les 10 000 à un million d'années dans une galaxie. Comme le volume observé par BATSE contient environ 10 milliards de galaxies et que tous les sursauts ne sont pas visibles, on estime que l'on devrait observer jusqu'à un millier de sursauts par an dans le ciel. Depuis six ans, BATSE a observé en moyenne un sursaut par jour, en accord avec les prévisions, car la Terre lui cache en permanence une partie du ciel.

Une multitude de modèles

Les autres possibilités sont nombreuses : coalescence d'un trou noir avec une étoile à neutrons, avec une étoile ordinaire, ou une naine blanche. Les débats entre partisans de ces diverses théories sont animés, mais les astrophysiciens s'accordent pour dire que la coalescence libère de formidables quantités d'énergie. La coalescence de deux étoiles à neutrons en un trou noir, par exemple, libère 10^{46} joules. Cette énergie est émise sous forme de neutrinos et d'antineutrinos qui produiraient des photons gamma. Cette production nécessite un déroulement des événements précis : le choc entre les neutrinos et les antineutrinos doit engendrer des électrons et des positons qui s'annihilent ensuite en photons. Malheureusement, ce mécanisme de conversion est peu efficace, et des simulations récentes indiquent qu'il ne produirait pas suffisamment de photons.

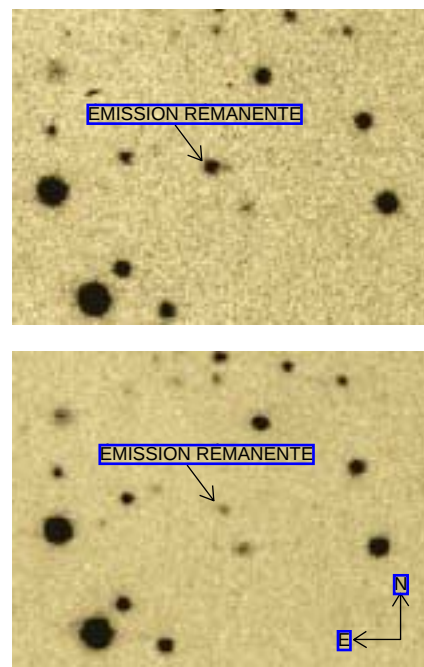
De surcroît, si la «boule de feu initiale» contient trop de particules massives, tels des protons, des interactions avec celles-ci réduisent l'énergie des photons gamma. Or, lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, de nombreuses particules sont émises, dont beaucoup de protons, et la majeure fraction de l'énergie est transmise aux protons, au détriment du rayonnement. Pour contourner cette

difficulté, Peter Mészáros, de l'Université de Pennsylvanie, et Martin Rees, de l'Université de Cambridge, ont proposé que la boule de feu en expansion, essentiellement composée de protons très chauds, heurte les gaz environnants et produisent une onde de choc. Les électrons accélérés par les champs électromagnétiques intenses au sein de cette onde émettraient alors des rayons gamma.

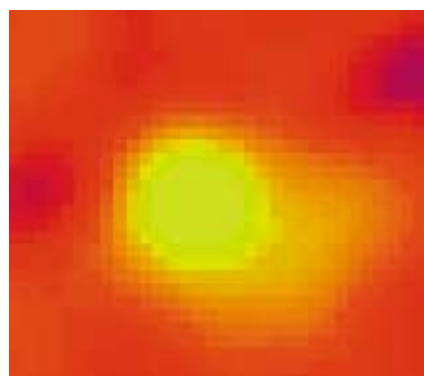
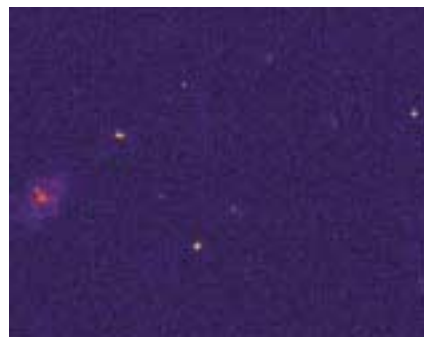
Des chocs internes qui apparaîtraient lorsque diverses parties de la boule de feu entrent en collision, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, engendreraient également un rayonnement gamma. Selon ces modèles de chocs, les sursauts gamma seraient suivis d'émissions rémanentes durables dans le domaine des rayons X et dans le visible. En particulier, Mario Vietri, de l'Observatoire de Rome, a prédit une persistance d'émissions X et visible un mois après le sursaut, ce qui ne serait pas le cas des modèles d'origine galactique des sursauts. Le sursaut GRB 970228 est le premier où l'on observe une telle émission rémanente. Cependant, aucun modèle fondé sur la coalescence d'un système binaire n'explique les sursauts de longue durée, tel celui de 1 100 secondes enregistré par l'instrument BATSE en 1996.

D'autres mécanismes peuvent engendrer des rayons gamma. Nir Shaviv et Arnon Dar, de l'Institut de technologie de Haïfa, proposent une interaction entre une «boule de feu» d'origine inconnue, riche en métaux lourds, et le rayonnement d'étoiles proches : des ions chauds de fer ou de nickel pourraient interagir avec le rayonnement d'étoiles proches pour émettre un rayonnement gamma. Des simulations indiquent que l'évolution des sursauts résultants est conforme aux observations, mais une boule de feu composée entièrement de métaux lourds semble irréaliste.

D'autres astrophysiciens ont proposé que les sursauts naissent dans des moteurs magnétiques extrêmement puissants, semblables aux dynamos à l'œuvre au sein des noyaux de galaxies. Au lieu de produire une boule de feu, la coalescence de deux étoiles formerait un trou noir entouré d'un disque épais de débris en rotation. Un tel disque ne survivrait que très peu de temps, mais les champs magnétiques internes seraient colossaux, environ 10^{15} fois le champ magnétique terrestre. Les



4. DES IMAGES DANS LE VISIBLE de la région du sursaut GRB 970228 furent prises par le télescope William Herschel, dans les îles Canaries, le 28 février (en haut) et le 8 mars (en bas). Un point lumineux dans la première image a pâli dans la seconde, sans doute une émission rémanente.



5. PHOTOGRAPHIE À LONGUE PAUSE de l'émission rémanente de GRB 970228 prise par le Télescope spatial Hubble le 26 mars 1997. Dans le visible, l'émission rémanente (près du centre de l'image du haut), observée en gros plan (en bas), a une forme allongée qui correspondrait à la galaxie où le sursaut se serait produit.

champs extrairaient l'énergie de rotation du système, et la canaliserait dans deux jets le long de l'axe de rotation.

Dans ces jets, les régions les plus proches de l'axe contiendraient peu de protons. Ainsi les électrons relativistes y engendreraient un rayonnement

gamma intense et localisé. Si de nombreux détails restent à régler, les théories selon lesquelles les sursauts gamma sont produits après une coalescence d'étoiles sont les plus plausibles.

Comment départager les modèles ? Si l'un des satellites détecte un sursaut

démultiplié par une lentille gravitationnelle, les astronomes auront la certitude que les sursauts se produisent à des distances cosmologiques. Une lentille gravitationnelle est une galaxie ou un autre objet céleste dont la masse courbe les rayons lumineux ; lorsque

La parole aux observateurs

C'est parce qu'ils ne se manifestent avec éclat qu'aux plus hautes énergies que les sursauts gamma constituent depuis un quart de siècle l'une des plus grandes énigmes de l'astrophysique. En raison de leurs longueurs d'onde inférieures aux distances qui séparent les atomes, il est impossible de réfléchir ou de réfracter les rayons gamma. Sans dispositifs optiques à base de miroirs et de lentilles, les astronomes peinent à déterminer avec précision la position sur la voûte céleste des sources de rayons gamma. Or, c'est un préalable indispensable à l'étude de ces sources au moyen de télescopes opérant à d'autres longueurs d'onde, et c'est surtout en menant des campagnes d'observation multi-longueurs d'onde que les astronomes espèrent comprendre un jour la nature des sources de rayons gamma cosmiques.

Dans le cas précis des sursauts gamma, la réalisation de telles campagnes d'observation se heurte en plus au caractère évanescents des émissions recherchées. Pour les traquer, un dispositif qui fournirait en temps réel la direction d'origine des sursauts gamma avec une précision d'environ une minute d'angle est nécessaire. Ainsi, l'on peut braquer très rapidement dans cette même direction les télescopes terrestres ou spatiaux les plus performants, donc à champs étroits. L'expérience BATSE, à bord de l'Observatoire *Compton*, qui détecte les sursauts gamma au rythme d'un événement par jour, ne parvient à les localiser sur la voûte céleste qu'avec une précision de quelques degrés. Il serait trop long de fouiller une telle «boîte d'erreur» avec des télescopes dont le champ se mesure en minutes d'angle ! C'est donc pour les appareils montés à bord du satellite italien *Beppo-SAX* une performance scientifique remarquable d'avoir fourni en temps quasi réel la direction d'origine d'une poignée de sursauts gamma avec une précision de quelques minutes d'angle.

À bord de *Beppo-SAX*, le mécanisme de détection est organisé de la manière suivante : dès que le moniteur de sursauts détecte l'arrivée d'une bouffée de rayons gamma entre 40 et 700 kiloélectronvolts, l'équipe scientifique qui contrôle le satellite examine les données collectées par les deux caméras néerlandaises à grand champ opérant dans la bande d'énergie voisine des rayons X entre 2 et 30 kiloélectronvolts. Ces deux caméras couvrant environ cinq pour cent de la voûte céleste, la probabilité n'est pas négligeable qu'un sursaut apparaisse dans le champ de l'une ou de l'autre. Fonctionnant sur le principe des ouvertures codées, ces deux appareils produisent des images permettant d'estimer la position des sursauts avec une précision de trois minutes d'angle.

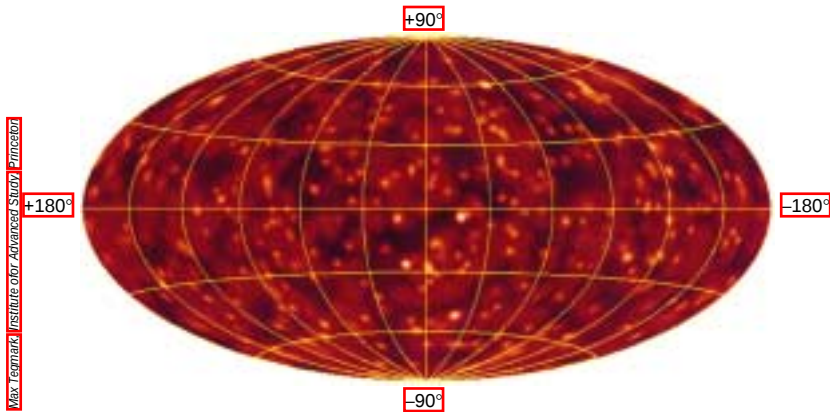
Les opérateurs de *Beppo-SAX* manœuvrent alors le satellite afin de pointer cette direction avec deux télescopes à champ étroit qui opèrent respectivement dans les bandes des rayons X de 0,1 à 10 kiloélectronvolts et de 2 à 10 kiloélectronvolts. Forts d'un dispositif à miroir à incidence rasante, ces appareils localisent alors les sources avec une précision de 50 secondes d'angle.

Après avoir pris, depuis plus de 20 ans, une part décisive aux observations des sursauts gamma, notamment avec les expériences françaises réalisées sous l'impulsion de Gilbert Vedrenne, par le Centre d'étude spatiale des rayonnements, à Toulouse, l'Europe se retrouve avec *Beppo-SAX* à la pointe des recherches sur les sursauts. L'expérience américaine BATSE a certes fourni un catalogue impressionnant de sursauts, mais faute de pouvoir mesurer avec précision leur direction d'arrivée, l'équipe BATSE n'a pas pu aborder la question cruciale de la nature des astres à l'origine des sursauts, autrement que par le biais d'études statistiques portant sur la répartition des événements sur la voûte céleste. Même si ces études semblent favoriser l'hypothèse d'une origine extra-galactique des sursauts, les seules données collectées par BATSE n'excluent pas la possibilité d'une origine beaucoup plus locale.

Pour séduisante qu'elle soit, l'idée que des coalescences d'étoiles à neutrons dans de lointaines galaxies soient à l'origine des sursauts gamma ne repose que sur des supputations théoriques. Aujourd'hui encore, on s'interroge pour savoir si les premières données collectées à la suite des observations de *Beppo-SAX* apportent ou non un quelconque crédit à cette hypothèse. Certains voient dans les images fournies par le Télescope spatial *Hubble* la trace d'une très lointaine galaxie coïncidant avec la source d'émission rémanente identifiée avec le sursaut du 28 février 1997. Patrizia Caraveo, de l'Institut de physique cosmique de Milan, et ses collègues, notent au contraire que, d'une image de *Hubble* à l'autre, la source se serait déplacée par rapport aux autres étoiles du champ, indiquant sa présence dans la proche banlieue galactique.

Même si *Beppo-SAX* a permis une remarquable percée scientifique, il faut se garder d'y voir le commencement de la fin du mystère lancinant des sursauts gamma, mais plutôt la fin heureuse d'une première étape où les astronomes ne pouvaient compter que sur les seules données gamma pour déterminer la nature des sites célestes à l'origine de ces formidables bouffées de rayons gamma.

Jacques PAUL
Service d'astrophysique du CEA, Saclay



6. LA RÉPARTITION DES SURSAUTS dans le ciel, mesurée par le détecteur de sursauts et de sources transitoires BATSE, n'indique pas de concentration le long de la Voie lactée (ligne horizontale sur la carte), mais une répartition uniforme. BATSE se trouve à bord de l'Observatoire Compton, que l'on voit ici en cours de déploiement.

le rayonnement d'une étoile située derrière la lentille est dévié, on observe plusieurs images de l'étoile originelle, disposées en arcs autour de la lentille. Pour l'instant cependant, la médiocre résolution spatiale des détecteurs de rayonnements gamma n'autorise pas de telles détections.

En outre, contrairement aux étoiles, les sursauts ne sont pas des sources persistantes. Un sursaut gamma démultiplié par une lentille gravitationnelle apparaîtrait comme deux sursauts provenant plus ou moins de la

même direction, possédant un spectre et une évolution semblables, mais dont les intensités et les temps d'arrivée diffèreraient (la différence de temps résulte de la différence de longueur des chemins empruntés par le rayonnement autour de l'objet faisant office de lentille).

Pour mieux cerner l'origine de l'explosion sous-jacente, une étude multifréquence est nécessaire. On pourrait alors découvrir la «contrepartie» du sursaut à d'autres longueurs d'onde et identifier la source, condition nécessaire à la compréhension du phénomène (*voir l'encadré ci-contre*). Jusqu'à GRB 970228, on n'avait jamais observé de contrepartie dans le visible, mais, désormais, on espère en trouver en localisant très précisément les sursauts.

Des télescopes en veille

Depuis le début des années 1970, Kevin Hurley, de l'Université de Berkeley, et Thomas Cline, du Centre Goddard de la NASA, prônent la mise en place de réseaux internationaux pour la détection des sursauts. Ils tentent de placer un détecteur de rayonnements gamma à bord de chaque sonde spatiale ou de lancer des dispositifs spécialisés. En comparant les temps de réception d'un sursaut par deux satellites éloignés, ils espèrent le localiser à mieux que quelques minutes d'angle.

L'efficacité du réseau varie beaucoup selon le nombre d'instruments qui y prennent part et leur distance dans l'espace. Aujourd'hui, cinq composantes du réseau sont actives : BATSE, Beppo-SAX et le satellite militaire DMSP, tous trois proches de la Terre ; la sonde Ulysse, très loin au-dessus du plan du Système solaire ; et la sonde Wind, en orbite autour du Soleil. Les don-



7. DES TÉLESCOPES ROBOTISÉS sur une colline près du Laboratoire Lawrence Livermore recherchent l'émission rémanente d'un sursaut quelques secondes après avoir reçu sa localisation de BATSE.



8. PLUSIEURS INSTRUMENTS contribuent à l'étude des sursauts gamma. Le satellite *Beppo-SAX* (à gauche), que l'on voit en cours d'assemblage, possède des détecteurs de rayons gamma et X qui se sont révélés cruciaux dans la localisation de sursauts récents. Le télescope

William Herschel (au centre), dans les îles Canaries, a photographié l'émission rémanente dans le visible de GRB 970228. En mai, l'interféromètre radio VLA à Socorro, Nouveau-Mexique, a observé pour la première fois des ondes radio provenant d'un sursaut.

nées de *Beppo-SAX*, d'*Ulysse* et de *Wind* furent utilisées pour déterminer par triangulation la position de GRB 970228 (BATSE était alors dans l'ombre de la Terre).

Cette méthode de triangulation spatiale est, pour l'instant, lente à fournir la direction du sursaut (heures au mieux), car il faut collecter les données provenant de satellites distants. Or, le temps est crucial pour détecter un sursaut. Aussi, Scott Barthelmy, du Centre *Goddard*, a-t-il mis au point un système nommé BACODINE (réseau BATSE de distribution de coordonnées) pour diffuser en quelques secondes la position des sursauts mesurés par BATSE à des télescopes au sol.

BATSE se compose de huit détecteurs de rayonnement gamma répartis en différents points du satellite. La comparaison de l'intensité d'un sursaut mesurée par ces détecteurs fournit en quelques secondes la position à quelques degrés près. Alors même que le sursaut a lieu, le système BACODINE le localise et transmet sa position, via le réseau *Internet*, à plusieurs dizaines de sites dans le monde. Cinq secondes plus tard, des télescopes robotisés pivotent pour observer le sursaut. Malheureusement, ces télescopes robotisés sont généralement petits, de sorte qu'ils ne peuvent détecter l'émission rémanente des sursauts. Par exemple, les petits télescopes de diamètre inférieur au mètre au Laboratoire Lawrence Livermore, n'auraient pu observer l'émission rémanente de GRB 970228 (sauf si l'émission dans le visible qui suivit le sursaut avait été plusieurs fois plus intense, comme le pensent certains théoriciens). Ainsi, des télescopes 100 fois plus sensibles sont nécessaires.

Ces télescopes de taille moyenne seront pilotés par des robots, de manière à pivoter très vite, et ils explorent de vastes étendues du ciel. S'ils découvrent une émission rémanente, ils détermineront sa position avec une relativement bonne précision, ce qui permettra aux télescopes plus puissants, comme le Télescope spatial, de rechercher une émission rémanente.

La faible émission qui a persisté après GRB 970228 montre que cette stratégie peut être payante. La mission *HETE*, dirigée par George Ricker, de l'Institut de technologie du Massachusetts, doit être reconstruite et lancée dans deux ans environ. Elle observera la totalité du ciel à l'aide de détecteurs de rayons X qui localisent des sursauts gamma à quelques minutes d'angle près. Un réseau de télescopes terrestres recevra ces positions presque immédiatement et recherchera des émissions rémanentes dans le domaine visible.

Détections multifréquences

Quelle proportion de sursauts gamma possède une émission rémanente détectable? Nous l'ignorons. Le sursaut GRB 970228 pourrait être un cas isolé. De plus, même une région du ciel de quelques minutes d'angle de diamètre contient beaucoup trop d'objets faibles pour qu'il soit facile de rechercher des contreparties. L'idéal serait de déterminer des positions précises en quelques fractions de seconde après le sursaut gamma lui-même. À cette fin, les astronomes conçoivent des télescopes d'un nouveau genre qui détermineront presque instantanément la position d'un sursaut, à quelques secondes d'angle près.

Pour affiner les modèles, nous étudierons le rayonnement à des fréquences supérieures et inférieures à celles qui sont observées aujourd'hui. Le télescope de rayonnement gamma de haute énergie EGRET, également à bord de l'Observatoire *Compton*, a détecté, pour quelques sursauts, des émissions dont l'énergie atteint 10 milliards d'électronvolts, subsistant parfois pendant plusieurs heures. Dans ce domaine des hautes énergies, on attend beaucoup du télescope gamma spatial *GLAST*, en cours de mise au point par une équipe internationale. Des photons d'énergie encore supérieure – jusqu'à 10^{12} électronvolts – pourraient être détectés par de nouveaux télescopes gamma terrestres. À l'autre extrémité du spectre, les rayons X mous, qui possèdent des énergies jusqu'à un kiloélectronvolt environ, sont utiles pour tester les modèles de sursauts, ainsi que pour mieux fixer leur position. Entre 0,1 et 10 kiloélectronvolts, il est fort possible que l'on découvre des raies d'absorption et d'émission qui nous informeraient sur la boule de feu sous-jacente ainsi que sur le champ magnétique. De telles raies pourraient aussi donner une mesure directe du décalage spectral de cette boule et, par conséquent, de sa distance. Trois équipes construisent aujourd'hui des instruments sensibles pour la détection des rayons X mous : le télescope européen *XMM* devrait être lancé en 1999 tandis que le télescope américain *AXAF* et le russe *Spectrum-X-gamma* (SXG) devraient être lancés d'ici quelques années.

Les progrès sont toutefois rapides : alors que nous finissons cet article, nous avons appris une nouvelle détection. Dans la nuit du 8 mai, les opérateurs de *Beppo-SAX* ont localisé un sursaut

d'une durée de 15 secondes. Immédiatement après, Howard Bond, de l'Institut du Télescope spatial, à Baltimore, a photographié la région au moyen du télescope optique de 0,9 mètre de Kitt Peak ; la nuit suivante, un point lumineux dans le champ s'était intensifié. D'autres télescopes confirment qu'après être passée par un maximum d'éclat le 10 mai, la source faiblissait. C'est la première fois qu'on observe un sursaut dont l'image dans le visible croît vers un maximum – lequel, étonnamment, s'est produit quelques jours après le pic gamma.

Pour la première fois également, l'interféromètre radio VLA, au Nouveau-Mexique, a détecté des ondes radio provenant de la contrepartie du sursaut. Plus étonnant encore, le spectre principalement bleu de ce sursaut, analysé le 11 mai avec le télescope *Keck II* de Hawaïi, contenait quelques raies d'absorption dues au fer et au magnésium d'un nuage situé entre la source et la Terre. Le décalage spectral de ces raies indique que la source se situerait à plus de sept milliards d'années-lumière. Si cette interprétation est confirmée, elle établira définitivement que les sursauts gamma se produisent à des distances cosmologiques. Peu de temps s'écoulera alors avant que nous puissions préciser quel événement catastrophique a déclenché ce sursaut.

Gerald FISHMAN, de la NASA, est le responsable principal de l'instrument BATSE. Dieter HARTMANN est astrophysicien théoricien à l'Université Clemson, en Caroline du Sud.

Jacques PAUL et Philippe LAURENT, *Astronomie gamma spatiale*, Gordon & Breach, 1997.

D. KNIFFEN, *The Gamma-Ray Universe*, in *American Scientist*, vol. 81, n° 4, pp. 342-350, juillet 1993.

Les trous noirs, dossier *Pour la Science*, 1997.

Neil GEHRELS, Carl E. FICHTEL, Gerald J. FISHMAN, James D. KURFESS et Volker SCHÖNFELDER, *L'observatoire Compton*, in *Pour la Science*, février 1994.

G.J. FISHMAN et C.A. MEEGAN, *Gamma Ray Bursts*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 33, pp. 415-458, 1995.

La page d'accueil de la mission Beppo-SAX est sur le site de *Pour la Science* : <http://www.pourlascience.com>

Les xénotransplantations

ROBERT LANZA • DAVID COOPER • WILLIAM CHICK

Depuis plusieurs dizaines d'années, le nombre d'organes prélevés sur des donneurs décédés est insuffisant pour tous les patients qui attendent de bénéficier d'une transplantation. Des organes humanisés provenant d'animaux deviendront peut-être une source d'organes salvateurs.

Il sera une fois... une équipe de chirurgiens qui prélèvera le cœur, les poumons, les reins et le pancréas d'un donneur. Les organes seront placés dans de la glace et un émissaire se précipitera à l'aéroport voisin. Quelques heures plus tard, le cœur et le foie arriveront à Lille, les reins à Strasbourg, les poumons et le pancréas à Marseille. Transportés à vive allure vers les centres hospitaliers de ces villes, ces organes seront immédiatement transplantés sur des malades, certains dans un état désespéré. Les organes fonctionneront bien : six personnes seront ainsi sauvées. Dans la même journée, plusieurs hôpitaux répartis dans tout le pays recevront aussi d'autres organes prélevés dans le même centre. Plus d'une vingtaine de transplantations seront pratiquées, chaque jour, en France.

Comment ce rêve deviendrait-il réalité? Qui seront les donneurs? Ce ne seront pas des hommes, mais des porcs : si un tel miracle de la médecine n'est pas encore réalisable aujourd'hui, les biologistes progressent. Heureusement, car il n'y aura jamais assez d'organes humains disponibles pour que la demande soit satisfaite. Aujourd'hui, dans chaque pays, des milliers de personnes attendent une transplantation de cœur, de foie, de rein, de poumon ou de pancréas, et des milliers d'autres luttent contre des maladies que l'on traitera peut-être un jour par une greffe de tissus ou de cellules. Ce devrait être le cas pour l'hémophilie, le diabète, et même pour les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. Plusieurs équipes tentent de mettre au point des méthodes de xénotransplantation, c'est-à-dire de transplantation de cellules et d'organes d'animaux sur l'homme.

Association d'espèces

Associer des éléments d'espèces différentes est un fantasme ancien : il y a plus de 3 000 ans, les Grecs imaginaient les centaures, mi-hommes, mi-chevaux, et les chimères, monstres à tête et poitrail de lion, à ventre de chèvre et à queue de dragon. Dès 1682, un médecin russe consolidait le crâne d'un noble, blessé, en utilisant un os de chien et, au début du XX^e siècle, des médecins tentaient de plus en plus régulièrement de greffer sur l'homme des tissus provenant d'animaux. En 1905, un chirurgien français essayait, par exemple, de greffer des tranches de rein de lapin chez un enfant qui souffrait d'une insuffisance rénale. Les tissus greffés semblaient fonctionner, mais l'enfant mourut deux semaines après l'opération.

Pendant une vingtaine d'années, d'autres médecins tentèrent de transplanter des organes prélevés sur des porcs, des chèvres, des agneaux et des singes. Toutes ces greffes échouaient, sans que l'on comprenne pourquoi. Jusqu'aux travaux de Peter Medawar, à Londres, pendant les années 1940, les médecins ignoraient tout de l'immunologie des rejets de greffes. En 1960, Medawar partagea le prix Nobel de physiologie et médecine avec Franck Burnet.

Devant tous ces échecs, beaucoup de médecins se sont désintéressés des transplantations. Certains ont toutefois persévéré et, en 1954, Joseph Murray et ses collègues de l'hôpital Peter Bent Brigham, à Boston, ont réussi la première transplantation de rein entre deux vrais jumeaux : le système immunitaire de deux jumeaux identiques ne différencie pas leurs

organes. Ensuite, on a commencé à transplanter des reins prélevés sur des parents plus éloignés, ou même sur des donneurs qui n'étaient pas apparentés, en administrant des traitements immunosuppresseurs, des médicaments qui inhibent les réactions immunitaires du receveur.

Depuis, les pratiques chirurgicales se sont perfectionnées, et l'on transplante aujourd'hui des cœurs, des poumons, des foies et des pancréas. Malheureusement, à peine la moitié des malades en attente d'une transplantation peut être traitée, en raison du petit nombre d'organes disponibles. La pénurie ne cessera de s'accroître à mesure que les médecins amélioreront leurs techniques. C'est par exemple le cas du diabète : il serait plus aisé de greffer les cellules pancréatiques qui produisent l'insuline plutôt que de transplanter un pancréas entier, même si les différents patients doivent être traités par des cellules provenant de nombreux donneurs différents.

En fait, les médecins n'ont jamais abandonné l'idée de greffer des tissus d'animaux sur l'homme. Pendant les années 1960, ils ont cherché à comprendre pourquoi les greffes d'organes entre espèces étaient si rapidement rejetées : ils ont découvert que le sang du receveur contient des anticorps qui se lient immédiatement aux tissus greffés. Ces anticorps sont dirigés contre tous les éléments étrangers à l'organisme : normalement ils aident le système immunitaire à lutter contre les micro-organismes infectieux, mais, dans le cas d'une transplantation, ils se dressent contre l'organe greffé. La fixation de ces anticorps active des protéines sanguines particulières, les protéines du complément,

qui, à leur tour, déclenchent la destruction du greffon.

Les capillaires du greffon sont la cible de ce rejet hyperaigu du tissu étranger, qui se manifeste quelques minutes ou, tout au plus, quelques heures après l'opération ; ces capillaires sont détruits, ce qui déclenche une hémorragie. Ce type de réactions semblait être un obstacle insurmontable et interdire toute xénotransplantation, mais quelques expériences récentes ont modifié les perspectives.

Ainsi, en 1992, David White et ses collègues de l'Université de Cambridge ont réussi à obtenir des porcs transgéniques, qui portaient sur les parois internes de leurs vaisseaux sanguins des protéines qui inhibent les protéines humaines du complément. Pour ce faire, ils ont introduit dans des embryons de porcs un gène humain produisant une protéine humaine qui inhibe le complément. D. White et ses collègues n'ont pas encore tenté de greffer des tissus prélevés sur ces porcs dans un organisme humain, mais des organes de porcs transgéniques ont déjà fonctionné chez des singes pendant plus de deux mois (les cellules porcines en contact avec le système immunitaire de l'hôte ont évité le rejet hyperaigu).

D'autres méthodes permettent d'éviter aussi ces rejets hyperaigus. En 1991, on a identifié les fragments moléculaires spécifiques, ou antigènes, des tissus de porc que les anticorps humains prennent pour cible. Les cellules qui tapissent les vaisseaux sanguins des porcs portent des antigènes contenant un sucre particulier. On peut imaginer «fabriquer» (ou cloner) une lignée de porcs transgéniques qui seraient dépourvus de ce sucre importun.

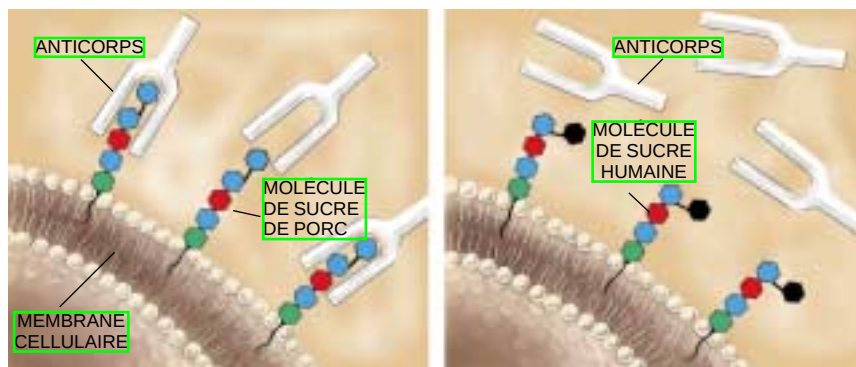
Une des stratégies possibles consisterait à éliminer l'enzyme qui ajoute ce sucre à l'antigène. On pourrait aussi introduire un gène codant une enzyme qui remplacerait le sucre indésirable par un autre : on pourrait, par exemple, choisir le gène codant une enzyme qui remplacerait les antigènes présents par ceux du groupe sanguin humain de type O, qui ne déclenchent pas de réaction immunitaire. Il serait aussi possible, théoriquement, d'introduire chez le porc le gène d'une enzyme capable de dégrader le sucre indésirable.

Pour éviter les rejets hyperaigus, on peut encore imaginer modifier le système immunitaire du receveur, afin qu'il ne puisse plus détruire le greffon.



Steve Dimson et Lou Fancher

1. DES GREFFES DE TISSUS ANIMAUX à l'homme, ou xénotransplantations, ont été pratiquées à titre expérimental ; on a utilisé des tissus prélevés sur des grenouilles, des babouins et des porcs. Les tentatives ont quasiment toutes échoué. Pourtant en élevant des porcs spécifiquement destinés à être donneurs d'organes pour l'homme, les chirurgiens connaîtront-ils peut-être quelques succès.



2. LE REJET HYPERAIGU d'un organe de porc transplanté sur un homme se manifeste en quelques minutes. Les anticorps humains, naturellement présents dans le sang, se lient aux molécules de sucre qui tapissent les vaisseaux sanguins du porc (à gauche). Des tissus de porc qui portent, après manipulation génétique, des molécules de sucre ramifiées (à droite) ne déclenchent pas ces réactions de rejet hyperaigu (les personnes appartenant au groupe sanguin O ont des sucres de ce type).

En utilisant des dispositifs élaborés, les médecins peuvent retirer du sang des patients tous les anticorps dirigés contre les tissus de porc. On peut aussi inactiver ou éliminer temporairement les protéines du complément. Quelques études faites sur des animaux semblent indiquer qu'un organe de porc greffé pendant que le système immunitaire du patient est ainsi déprimé, peut s'adapter, être toléré et s'accommoder quand les anticorps et les protéines du complément ont à nouveau des concentrations normales. L'organe greffé continue à fonctionner, bien que le système immunitaire de l'hôte ne le tolère pas.

Les biologistes ne maîtrisent pas encore la tolérance chez des animaux qui subissent des xénogreffes. Pourtant, Guy Alexandre et ses collègues de l'Université catholique de Louvain ont rendu tolérants des patients qui avaient reçu des reins humains provenant de donneurs vivants incompatibles quant à leurs groupes sanguins.

Comme les xénotransplantations, ces greffons subissent normalement des rejets hyperaigus. En raison de l'incompatibilité des groupes sanguins, le futur receveur a, dans son sérum, des anticorps naturels dirigés contre les globules rouges du donneur et contre des antigènes portés par les vaisseaux et par les tissus du rein du donneur. Étant donné qu'il s'agit de transplantation utilisant un rein de donneur vivant, cette transplantation peut être programmée et l'on «prépare» le receveur sur le plan immunologique dans les jours précédant la transplantation : au cours de cette période, on élimine, du sang du receveur, les anticorps naturels circu-

lants, nommés isoagglutinines anti-ABO. Pour bloquer temporairement la production de nouveaux anticorps, on administre un traitement immunosuppresseur quelques jours avant la transplantation et on pratique l'ablation de la rate au moment de l'opération. Au cours de la période post-opératoire, les anticorps réapparaissent progressivement.

Selon Jean-Paul Squifflet, qui dirige le Service de transplantation rénale et pancréatique des Cliniques universitaires Saint-Luc, à Bruxelles, entre juin 1982 et novembre 1989, 39 patients ont bénéficié de ce type de transplantation dont sept enfants de moins de 15 ans : six d'entre eux ont toujours un rein fonctionnel aujourd'hui ; deux tiers des adultes ayant reçu un rein maternel ou paternel ont toujours un greffon fonctionnel.

Les anticorps naturels de ces patients se sont reformés plus ou moins rapidement ; ils sont présents, souvent en concentration élevée, mais ne se fixent pas sur l'antigène, présent sur les vaisseaux et sur diverses structures du rein. Ainsi les anticorps naturels ABO se sont «accommodés» aux antigènes étrangers.

L'acquisition de la tolérance

En combinant toutes ces méthodes, on devrait annihiler les réactions immunitaires immédiates, les plus préjudiciables. Toutefois, les greffons animaux resteraient encore vulnérables aux formes plus tardives de rejet immunitaire, celles qui ne se manifestent que plusieurs jours, voire plusieurs semaines, après l'intervention : les rejets

aigu et chronique. La réaction immunitaire cellulaire vis-à-vis des greffons d'origine animale serait au moins aussi dévastatrice que l'attaque des globules blancs contre un greffon humain lorsque le donneur et le greffé ne sont pas immunologiquement compatibles. Afin d'éviter ces réactions tardives, on devrait administrer indéfiniment des doses massives d'immunosuppresseurs, par exemple de cyclosporine, ce qui augmente les risques de toxicité, d'infections ou de complications.

On pourrait administrer d'autres agents immunosuppresseurs, mais le mieux serait de s'affranchir d'un tel traitement et de forcer l'organisme à accepter des tissus animaux sans traitement adjuvant. Aujourd'hui, cette situation semble inaccessible, bien que l'on ait observé une tolérance immunologique spontanée chez quelques personnes qui avaient reçu des organes humains. Les médecins de ces patients ont fini par supprimer le traitement immunosuppresseur.

Le déclenchement de la tolérance immunologique fait l'objet de nombreuses recherches, et les xénogreffes ne seront peut-être pas plus difficiles à tolérer que les greffes d'organes humains. Qui plus est, les greffes d'organes humains (dans un cas sur trois, il s'agit de donneurs accidentés) sont toujours réalisées dans un contexte d'urgence, tandis que celles d'organes provenant d'animaux pourraient être prévues à l'avance, ce qui laisserait aux médecins le temps de «reprogrammer» le système immunitaire du futur greffé.

Pour obtenir cette tolérance, on pourrait modifier le système immunitaire du futur receveur en lui greffant quelques cellules de moelle osseuse de l'animal donneur (la moelle osseuse est la source de tous les constituants cellulaires du sang, notamment des globules blancs du système immunitaire). Ces cellules se dispersent dans l'organisme et s'y multiplient, créant ainsi un système immunitaire hybride, provenant partiellement de l'animal et partiellement du receveur. De cette façon, le système immunitaire du patient ne considère plus comme étrangères les cellules introduites ni, ultérieurement, les tissus greffés provenant du même animal.

David Sachs et ses collègues de l'hôpital général du Massachusetts ont ainsi introduit chez des babouins des cellules de moelle osseuse provenant de porcs donneurs et des substances sti-

Une brève histoire des xénotransplantations

1682



La première greffe de tissu animal sur l'homme eut lieu lorsqu'un médecin préleva un fragment du crâne d'un chien pour réparer celui d'un noble russe qui avait été blessé.

L'opération fut considérée comme un succès, mais l'Église russe menaça le noble d'excommunication, ce qui l'incita à se faire retirer le greffon.

Fin des années 1800

On pratiquait souvent des greffes de peau de grenouille pour tenter de soigner des brûlures ou des ulcères cutanés. Un chirurgien de l'armée britannique aurait fait des centaines de greffes de ce type et aurait obtenu de bons résultats.



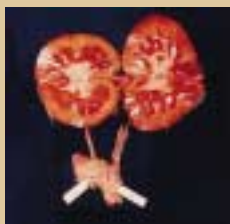
1920



Serge Voronoff, un médecin qui avait émigré à Paris, fut le premier à greffer des tissus provenant de testicules de singes sur des hommes âgés. Ces traitements étaient sensés rajeunir les patients sur le plan sexuel, leur redonner leur vigueur juvénile, mais les spécialistes restèrent sceptiques.

DE 1963 À 1965

Keith Reemtsma, chirurgien à l'Université de Tulane, transplanta des reins de chimpanzé chez 13 patients. Parmi ces patients, une femme survécut neuf mois après l'opération, reprenant même son métier d'institutrice, mais elle succomba à un grave déséquilibre ionique. Les reins greffés (la photographie), observés lors d'une analyse post-mortem, ne révélèrent aucun signe de rejet.



1964



Pour la première fois, on tenta de transplanter chez un homme un cœur de chimpanzé. Menée par l'équipe de James Hardy, de l'Université du Mississippi, cette opération échoua en moins de deux heures, car le cœur transplanté était trop petit pour assurer une circulation sanguine adéquate chez le patient.

1977

Christiaan Barnard (à droite) réussit, en 1967, la première transplantation de cœur humain. Dix ans plus tard, il tenta d'utiliser des cœurs de babouin et de chimpanzé comme pompes d'assistance temporaires chez deux patients dont le cœur ne fonctionnait pas correctement après une opération cardiaque. Toutefois, ces organes animaux étaient trop petits et furent rejetés ; ils ne prolongèrent pas la vie des patients.



1977



Ce bébé, né prématurément avec une malformation cardiaque, reçut un cœur de babouin ; malgré l'administration d'un traitement immunosuppresseur, l'enfant ne survécut qu'une vingtaine de jours.

1992



Des foies de babouin ont été transplantés chez l'homme, à l'Université de Pittsburgh : l'un des patients survécut plus de deux mois avec un foie transplanté. Pour éviter le rejet, on dut lui administrer des doses massives d'immunosuppresseurs ; le patient mourut d'une infection.

1995

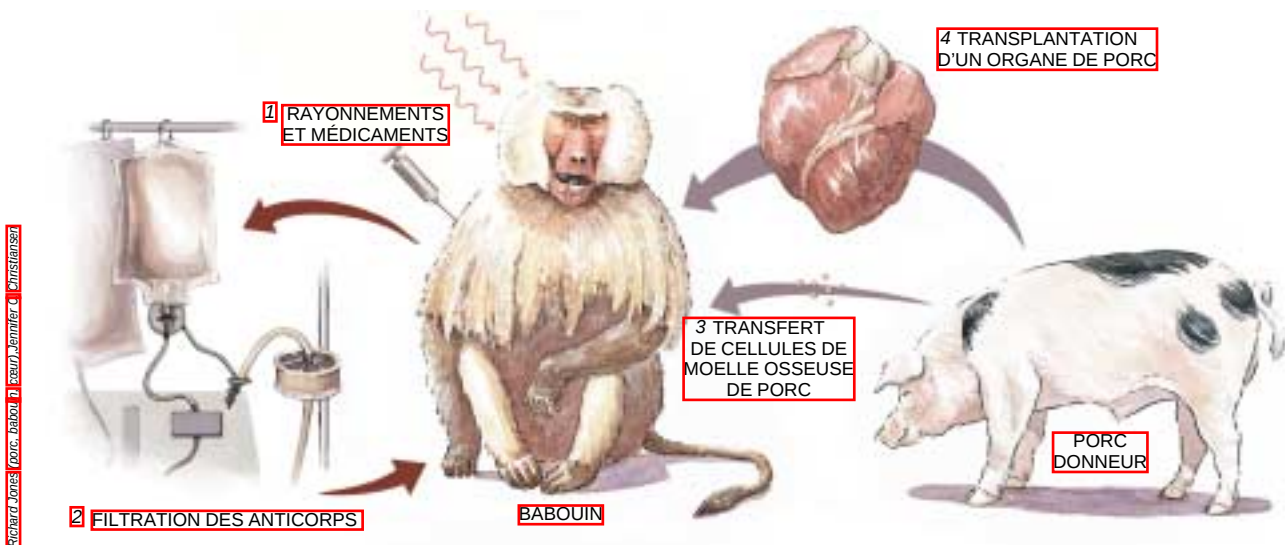


Jeff Getty reçut des cellules immunitaires de babouin pour tenter d'enrayer son SIDA. Bien que les cellules de babouin aient été rapidement éliminées, l'état du patient s'est mystérieusement amélioré.

1997



Des cellules nerveuses fœtales de porc ont été greffées chez des patients atteints de la maladie de Parkinson : elles ont fonctionné plus de sept mois dans le cerveau d'un des patients.



3 LES REJETS AIGUS ET CHRONIQUES d'organes d'une espèce transplantés sur une autre espèce pourraient être évités si l'on modifiait le système immunitaire du receveur de façon à ce qu'il contienne des constituants du donneur. Pour évaluer cette stratégie chez l'animal, un babouin a subi une radiothérapie, puis un traitement (1) destiné à prévenir le rejet immunitaire des cellules de moelle osseuse (la source de toutes les cellules immunitaires) transplantées. Son sang a été fil-

tré (2), afin que les anticorps susceptibles de réagir avec les cellules porcines greffées soient éliminés. Puis, le babouin a reçu des cellules de moelle osseuse prélevées sur un porc donneur (3). Les lymphocytes T tueurs du système immunitaire du babouin ne s'attaquèrent pas aux cellules provenant du porc. Quand on saura maîtriser les divers éléments du système immunitaire du receveur, les organes de porc greffés (4) devraient fonctionner indéfiniment chez le nouvel hôte.

mulant la prolifération de ces cellules. Les babouins ont subi une radiothérapie qui a inhibé temporairement leur système immunitaire et évité le rejet des cellules porcines. D. Sachs et ses collègues ont aussi filtré le sang des babouins pour en extraire les anticorps dirigés contre les tissus de porc et ils leur ont administré des immunodépresseurs pendant quelque temps. Bien que le système immunitaire des babouins ait fini par éliminer la plupart des cellules greffées, un des babouins a toléré un peu d'ADN de porc pendant presque un an. De surcroît, les redoutables lymphocytes T tueurs du système immunitaire chimérique de ce

babouin ne considéraient plus les cellules de porc comme des cellules étrangères et ne les attaquaient pas.

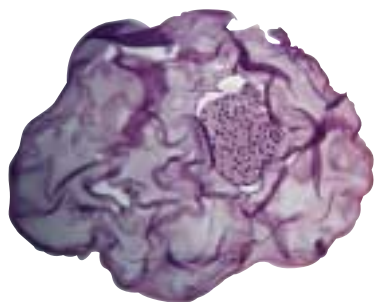
Ces recherches devraient améliorer la prévention du rejet des xéno-greffes, même si plusieurs années seront nécessaires pour la mise au point de la méthode. Une autre méthode, l'immuno-isolation, est déjà en cours d'essais cliniques : les médecins isolent le tissu transplanté par une membrane perméable aux petites molécules, notamment aux éléments nutritifs, à l'oxygène et à certains médicaments, mais imperméable aux globules blancs et aux grosses molécules (par exemple, les anticorps). Cette méthode ne s'applique qu'aux cellules isolées ou à des fragments de tissus, mais pas aux organes entiers. On ne peut l'utiliser pour une transplantation de cœur ou de rein, mais elle s'applique à diverses pathologies dont nous allons donner quelques exemples. En outre, cette méthode a plusieurs avantages : les médecins peuvent manipuler assez aisément des cellules ou des fragments de tissus, et les maintenir en vie hors de l'organisme plus longtemps que des organes entiers.

Récemment, on a tenté d'utiliser des cellules animales encapsulées pour traiter des troubles hépatiques, des douleurs chroniques et la sclérose latérale amyotrophique (ou maladie de Lou Gehrig) ; les résultats sont prometteurs. Bientôt, les chirurgiens pour-

ront greffer des cellules animales immuno-isolées pour fournir aux hémophiles les facteurs sanguins de coagulation qui leur sont indispensables ou pour produire des facteurs de croissance des neurones qui compenseraient certaines maladies neurodégénératives.

Des biologistes envisagent ainsi de traiter le diabète à l'aide de cellules de Langerhans de porc. William Chick a été l'un des premiers à utiliser des dispositifs de «perfusion» (des implants isolés par une enveloppe et reliés au système sanguin du receveur), mais cette méthode a plusieurs inconvénients. D'une part, le patient doit subir une intervention chirurgicale (l'implantation de la chambre) et, d'autre part, le dispositif risque de s'obstruer. En revanche, on peut isoler les cellules transplantées en les plaçant dans des fibres creuses de plastique ou dans des compartiments isolés de la circulation sanguine ; l'intervention chirurgicale serait moins lourde que l'implantation d'un dispositif de perfusion, mais on ignore comment le patient tolérerait ces matières plastiques, combien de temps fonctionnerait l'implant et si le patient accepterait aisément que l'on renouvelle l'opération quand cela serait nécessaire.

Robert Lanza, W. Chick et leurs collègues de la Société *BioHybrid Technologies* ont réussi à introduire des cellules dans de petites capsules biodégra-



4 DES CELLULES DE LANGERHANS encapsulées provenant d'un pancréas de porc devraient, un jour, fournir aux patients diabétiques l'insuline qu'ils ne produisent pas. La membrane de polymère biodégradable qui sert à l'encapsulation des îlots de Langerhans permet à l'insuline produite de sortir de la capsule ; elle protège les cellules pancréatiques du donneur du système immunitaire de l'hôte.

dables, qui sont injectées sous la peau ou placées dans la cavité abdominale à l'aide d'une seringue. Il suffirait de moins d'un gramme de cellules de Langerhans porcines encapsulées pour fournir à un diabétique l'insuline nécessaire. Le volume de tels implants resterait inférieur à quelques dizaines de centimètres cubes.

Au cours d'expériences récentes, des cellules d'îlots de Langerhans encapsulées provenant de vaches sont restées actives chez des chiens pendant six semaines. Diverses études réalisées sur des souris, des rats et des lapins montrent que des cellules de porc encapsulées devraient fonctionner chez des patients quelques mois, voire plus d'un an. Les minuscules emballages finiraient par être dégradés, de sorte que l'on n'aurait pas à retirer les anciennes capsules avant de reconstituer le stock de cellules de Langerhans. Des essais cliniques visant à évaluer cette méthode devraient commencer dans moins d'un an.

Des hôtes menaçants

Les xénotransplantations, si elles deviennent réalité, soulèveront des questions biologiques et éthiques. Plusieurs spécialistes redoutent que des donneurs animaux n'hébergent des agents pathogènes qui, tels le virus *Ebola* ou l'agent de la maladie de la vache folle, menaceraient la santé humaine. Après avoir contaminé un patient greffé, ces agents pathogènes pourraient se répandre dans la population générale et y déclencher une épidémie. Aujourd'hui, les biologistes pensent que le VIH, le virus de l'immunodéficience humaine responsable du SIDA, est un virus d'origine simiesque qui, après avoir franchi la barrière interspécifique, a infecté l'homme.

Ainsi, les transplantations de tissus de singes pourraient menacer la santé générale. En revanche, si les donneurs étaient des porcs, la menace serait moindre. Depuis des milliers d'années, l'homme vit à proximité du porc et, hormis quelques virus de grippe, peu de maladies graves d'origine porcine semblent avoir touché l'homme.

Les porcs pourraient être des donneurs intéressants pour d'autres raisons : ils sont faciles à élever ; la dimension et la physiologie de leurs organes sont comparables à celles des organes humains ; certains élevages sont exempts de tout agent pathogène

Le risque des virus clandestins

Malgré des siècles de cohabitation, les porcs ont transmis peu d'agents pathogènes à l'homme ; cela semble garantir que des transplantations d'organes de porc ne pourraient engendrer de nouvelles maladies dangereuses. Pourtant la prudence est de rigueur.

Certains rétrovirus, des virus qui introduisent leur matériel génétique directement dans l'ADN de l'hôte, pourraient être une menace. Comme les autres mammifères, les porcs ont des provirus dans leur patrimoine génétique, c'est-à-dire des séquences génétiques qui peuvent produire des particules virales infectieuses ; de tels gènes viraux représentent environ un pour cent de l'ADN humain. La présence de ces séquences s'explique par des infections rétrovirales subies par les ancêtres des mammifères actuels, lorsque les virus ont introduit leur génome dans des spermatozoïdes ou dans des ovocytes. La descendance des animaux infectés conserva ces gènes viraux, qui furent ensuite transmis de génération en génération. Avec le temps, la plupart de ces virus ont évolué et sont devenus inoffensifs pour leurs hôtes, mais quelques-uns conservèrent un pouvoir pathogène.

Quelles seraient les conséquences de l'introduction, par l'intermédiaire d'organes greffés, de provirus de porcs chez un patient ? La transplantation offrirait au virus un accès direct aux cellules humaines et, de surcroît, l'hôte serait particulièrement vulnérable, puisque son système immunitaire serait volontairement affaibli pour éviter le rejet de l'organe transplanté. Les provirus de porc risqueraient de se transformer en rétrovirus pathogènes. En outre, ces rétrovirus de porc, une fois implantés chez l'homme, risquent de muter et de se combiner avec des rétrovirus humains, produisant un agent pathogène de type nouveau. Les risques sont notables : contrairement aux virus responsables d'une grippe de courte durée, certains rétrovirus sont à l'origine de cancers et d'infections durables.

Les biologistes moléculaires cherchent à identifier les provirus dangereux qui seraient dissimulés dans l'ADN de porc et à les éliminer des troupeaux reproducteurs. Les manipulations génétiques nécessaires exigeront encore de nombreuses années d'effort, mais ces études devraient éviter que les xénotransplantations ne soient à l'origine de nouvelles maladies humaines.

connu. Enfin, contrairement aux primates, les porcs soulèvent peu d'opposition éthique : le porc est un animal que l'homme a l'habitude de tuer pour se nourrir.

Toutefois, les greffes de tissus porcins sont encore loin d'être une réalité. Même quand ils sauront maîtriser le rejet immunitaire, les biologistes devront confirmer que les organes transplantés fonctionnent correctement chez le nouvel hôte. En fait, des cœurs et des

reins de porcs ont fonctionné chez des primates pendant plusieurs semaines, et ce devrait être aussi le cas chez l'homme. De nombreuses années s'écouleront avant que des médecins ne parviennent à déjouer les mécanismes de l'évolution et à remplacer n'importe quel organe défaillant par son équivalent prélevé sur un animal. En revanche, la greffe de cellules isolées devrait bientôt faire partie des procédés médicaux usuels.

Robert LANZA dirige le département de transplantation de la Société *Bio-Hybrid Technologies*, à Shrewsbury, que dirige William Chick. David COOPER est immunologiste à la Faculté de médecine de Harvard et à l'hôpital général du Massachusetts.

F.H. BACH, S.C. ROBSON, H. WINKLER, C. FERRAN, K.M. STUHLMEIER, C.J. WRIGHTON et W.W. HANCOCK, *Barriers to Xenotransplantation*, in *Nature Medicine*, vol. 1, n° 9, pp. 869-873, septembre 1995.

L.E. CHAPMAN, T.M. FOLKS, D.R. SALO-

MON, A.P. PATTERSON, T.E. EGGERMAN et P.D. NOGUCHI, *Xenotransplantation and Xenogeneic Infections*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 333, n° 22, pp. 1498-1501, 30 novembre 1995.

Yearbook of Cell and Tissue Transplantation 1996/1997, sous la direction de Robert P. Lanza et William L. Chick, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Xenotransplantation : The Transplantation of Organs and Tissues between Species, 2^e édition, sous la direction de D.K.C. Cooper, E. Kemp, J.L. Platt et D.J.G. White, Springer-Verlag, 1997.

Engrais et démographie

VACLAV SMIL

Pour nourrir la population du Globe, on doit utiliser tant d'engrais azotés que la répartition de l'azote sur la Terre a été modifiée de manière spectaculaire, voire dangereuse.

Le quasi quadruplement de la population mondiale, au XX^e siècle, a de nombreuses causes, mais l'une des principales est inconnue : c'est la synthèse de l'ammoniac à partir de l'azote de l'atmosphère par l'industrie chimique. En effet, grâce aux engrais qui sont fabriqués à partir de l'azote, l'agriculture s'est affranchie des limites séculaires de production de la nourriture, et la population mondiale dispose de suffisamment de nourriture (du moins en moyenne).

Pourquoi l'azote est-il important ? Il se trouve dans la matière vivante en proportion inférieure à celles du carbone, de l'hydrogène ou de l'oxygène,

mais, alors que ces trois éléments sont rapidement intégrés à nos tissus par l'intermédiaire de l'eau et de la nourriture, l'azote de l'atmosphère n'est pas assimilé quand nous respirons. Seule une infime partie existe sous une forme qui puisse être absorbée et assimilée par les plantes, par les animaux et par l'homme.

L'azote est cependant un élément indispensable à la synthèse de l'ADN et de l'ARN, ces molécules qui contiennent et transfèrent l'information génétique de toutes les cellules, et il figure dans le squelette des protéines, ces molécules qui sont à la fois les briques et les ouvriers de l'organisme. L'organisme humain et celui des animaux

supérieurs ne synthétisent pas ces molécules à partir de l'azote présent dans l'air ; ils doivent puiser des composés azotés dans la nourriture, laquelle n'est équilibrée que si l'azote est en quantité suffisante, sous la forme de protéines animales ou végétales.

La chimie particulière de l'azote explique que seules les plantes sachent extraire cet élément de l'atmosphère. Les molécules de diazote, qui forment 78 pour cent de l'atmosphère, sont constituées de deux atomes d'azote. Elles sont si stables qu'elles se transforment difficilement en des formes réactives, absorbables par les plantes. Si la foudre parvient à les dissocier, la majeure partie de la « fixa-



tion» naturelle de l'azote (c'est-à-dire la dissociation de la molécule de diazote et l'incorporation ultérieure des deux atomes d'azote dans l'ammoniac) est l'œuvre de bactéries. Les bactéries fixatrices d'azote les plus importantes sont celles du genre *Rhizobium*, qui vivent en symbiose avec les plantes légumineuses ; les cyanobactéries, qui vivent soit à l'état libre, soit en association avec certaines plantes, fixent également l'azote.

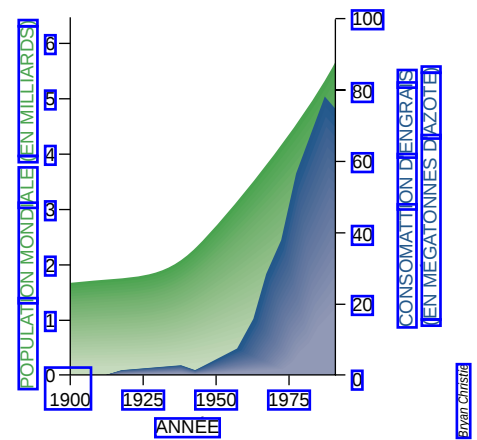
Un problème qui ne date pas d'hier

Les végétaux et des phénomènes naturels variés appauvrissent les sols en azote, de sorte que les carences sont fréquentes. L'agriculture, avant la Révolution industrielle, régénérât les champs en les engraisant avec les résidus des récoltes précédentes ou avec des déchets organiques d'origine animale ou humaine. Toutefois ces déchets contenaient l'azote en concentrations si faibles qu'ils devaient être apportés en quantités considérables pour satisfaire les besoins. Aussi les agriculteurs devaient-ils alterner les cultures de céréales avec celles de pois, de haricots, de lentilles et d'autres légumineuses. Les bactéries fixatrices d'azote qui vivent dans les racines de

ces plantes enrichissaient les champs. Parfois on plantait des légumineuses (ou, en Asie, des fougères du genre *Azolla* qui abritent des cyanobactéries fixatrices d'azote) uniquement pour l'apport d'engrais qu'elles assuraient ; le labourage ultérieur enfouissait ces plantes sous forme d'engrais vert, sans qu'aucun produit ne soit récolté. Ce type d'agriculture biologique a atteint son apogée au début du XX^e siècle dans les basses plaines de Java, dans le delta du Nil, en Europe et dans de nombreuses régions de Chine et du Japon.

Le recyclage de déchets humains ou animaux, associé à la culture d'engrais vert, apporte environ 200 kilogrammes d'azote par hectare et par an. On peut alors produire 200 à 250 kilogrammes de protéines végétales, ce qui limite la densité de population à une quinzaine de personnes dans les régions tempérées.

En pratique, les densités de population étaient invariablement inférieures. En Chine, au début du siècle, les terres ne nourrissaient que cinq à six personnes par hectare. Lors des dernières décennies d'agriculture biologique au Japon, la population était un peu plus dense qu'en Chine, mais la pêche palliait les déficiences de l'agriculture. Dans les régions fertiles d'Europe, au XIX^e siècle, la densité de



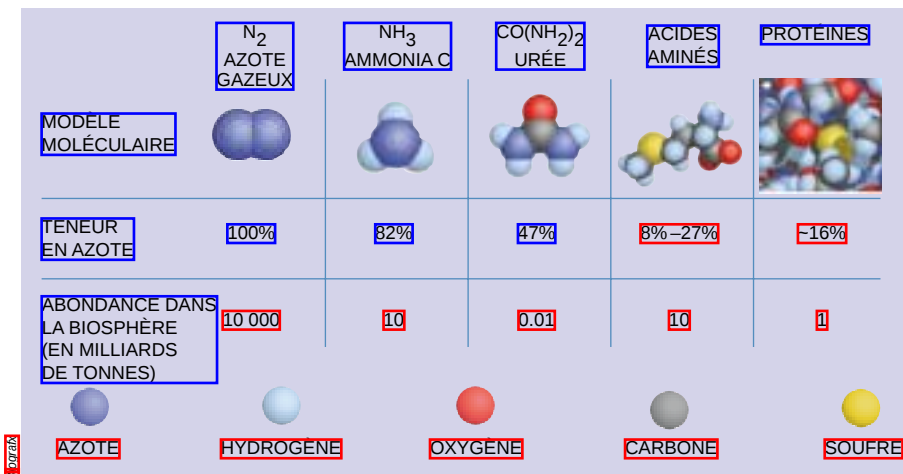
2. LA POPULATION MONDIALE a considérablement augmenté au XX^e siècle, en raison de l'utilisation d'engrais azotés.

population était également de cinq personnes par hectare, quand les agriculteurs pratiquaient exclusivement une agriculture de type traditionnel.

La différence entre la densité maximale théorique et la densité limite pratique résulte de plusieurs facteurs : la productivité des terres est limitée par l'irrégularité des précipitations ; les ravageurs prélèvent une proportion notable des récoltes, et une partie des terres était consacrée à des cultures non alimentaires, telles les plantes à fibres, pour l'habillement, ou diverses plantes

1. L'AGRICULTURE qui est pratiquée dans les champs écossais (ci-dessous), repose sur la production industrielle d'engrais azotés, par un procédé qui est né dans les années 1910. Ce procédé, dit synthèse de Haber-Bosch, est utilisé par de nombreuses usines de synthèse de l'ammoniac, dans le monde entier (cartouche à droite).





LES COMPOSES AZOTES se retrouvent partout dans la biosphère. La molécule de diazote (N₂), qui représente 78 pour cent de l'atmosphère, est composée de deux atomes liés si fortement qu'ils réagissent difficilement. Pour se développer, les végétaux ont besoin de composés azotés réactifs tels que l'ammoniac (NH₃) et l'urée (CO(NH₂)₂). Les abondances relatives des divers composés azotés de la biosphère sont données avec une précision d'un facteur dix.

médicinales. Comment satisfaire les besoins, quand manquaient des zones non cultivées qui puissent être converties soit en zones de pâturage, soit en terres arables pour l'expansion de l'agriculture? Le seul recours était l'engrais vert, mais il imposait de renoncer à une saison de culture. C'est pourquoi les agriculteurs ont progressivement appris à alterner les cultures de légumineuses à graines avec les cultures de céréales. La pratique, également, a ses limites : les rendements en légumineuses sont faibles, les produits sont souvent difficiles à digérer, et leur faible concentration en protéines du gluten les rend peu aptes à la confection de pain ou de pâtes alimentaires.

Un sol fertile pour la science

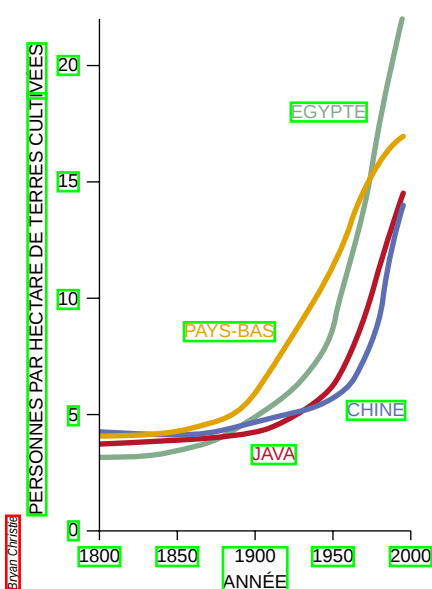
Les progrès de la chimie, surtout au XIX^e siècle, révélèrent le rôle crucial de l'azote dans la production agricole et la rareté des formes utilisables de cet élément. Les chimistes comprirent également que deux autres éléments, le potassium et le phosphore, limitaient parfois les rendements agricoles, mais que les carences de ces derniers éléments pouvaient être facilement corrigées : il suffisait d'épandre de la potasse directement extraite des mines pour pallier les carences en potassium, tandis que l'enrichissement en phosphore s'obtenait par l'ajout d'acide à des roches riches en phosphate pour les convertir en composés solubles, absorbables avec l'eau par les racines. L'azote, toutefois, restait un élément rétif : à la fin des années 1890, agronomes et chimistes préoyaient une crise de l'azote, due à l'intensification de l'agriculture.

L'utilisation de nitrates minéraux (provenant des déserts chiliens) et de guano (des excréments d'oiseaux récoltés sur les îles Chincha, dans une partie du Pérou où il ne pleut jamais) et la récupération du sulfate d'ammonium, dans les hauts-fourneaux, soulagèrent momentanément certains agriculteurs. En Allemagne, en 1898, l'industrie chimique mit au point un procédé de synthèse de la cyanamide (laquelle libérait de l'ammoniac) par réaction du charbon avec la chaux vive et l'azote pur ; cependant le procédé consommait trop d'énergie pour être rentable. Il en était de même pour la production d'oxydes d'azote, par passage d'un courant d'azote et d'oxygène dans un arc électrique. Seule la Norvège, qui disposait d'énergie hydroélectrique bon marché, fabriqua

des engrais azotés par ce procédé à partir de 1903, mais sa production fut limitée.

À cette époque, Fritz Haber, de l'Université technique de Karlsruhe, se fonda sur les travaux d'Henry Le Chatelier et de Walther Nernst pour mettre au point un procédé de synthèse de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène gazeux, en les comprimant jusqu'à une pression de 200 atmosphères et à une température de 500 °C, en présence d'un catalyseur à base d'osmium. Le procédé de Haber était si prometteur que le directeur de la Société BASF demanda à ses meilleurs ingénieurs, Carl Bosch et son collègue M. Mittasch, d'étudier la mise au point d'un procédé industriel fondé sur la réaction de Haber. Le problème était difficile, car les réacteurs, en acier, devaient résister à des pressions et températures élevées ; or ces aciers libéraient des impuretés qui empoisonnaient les catalyseurs. Après dix ans d'études coûteuses, la BASF ouvrit la première usine de synthèse d'ammoniac à Oppau, en 1911 ; elle était relayée par une usine voisine, qui transformait l'ammoniac en sulfate d'ammonium. La capacité de production d'ammoniac fut bientôt doublée pour atteindre 60 000 tonnes par an, ce qui assura l'autosuffisance de l'Allemagne en composés azotés... qui furent bientôt utilisés pour la fabrication des explosifs.

Les difficultés économiques de l'après-guerre limitèrent la diffusion du procédé Haber-Bosch, de sorte que la production mondiale d'ammoniac resta inférieure à cinq millions de tonnes jusqu'à la fin des années 1940. Au cours des années 1950, l'utilisation des engrais azotés augmenta progres-



3. LA DENSITÉ DE POPULATION n'a augmenté dans les pays agricoles qu'après l'avènement des engrais azotés.

sivement pour atteindre dix millions de tonnes. Puis, dans les années 1960, les innovations techniques permirent de réduire de 90 pour cent les quantités d'électricité nécessaires pour cette synthèse, ce qui permit la construction d'usines plus grandes et plus rentables. L'augmentation exponentielle de la demande multiplia par huit les ton-

nages mondiaux d'engrais azotés de synthèse.

Ces engrais, qui n'étaient initialement utilisés que par les pays riches, furent également consommés par les pays en développement : les pays industrialisés employaient 90 pour cent des engrais azotés au début des années 1960, mais moins de 70 pour

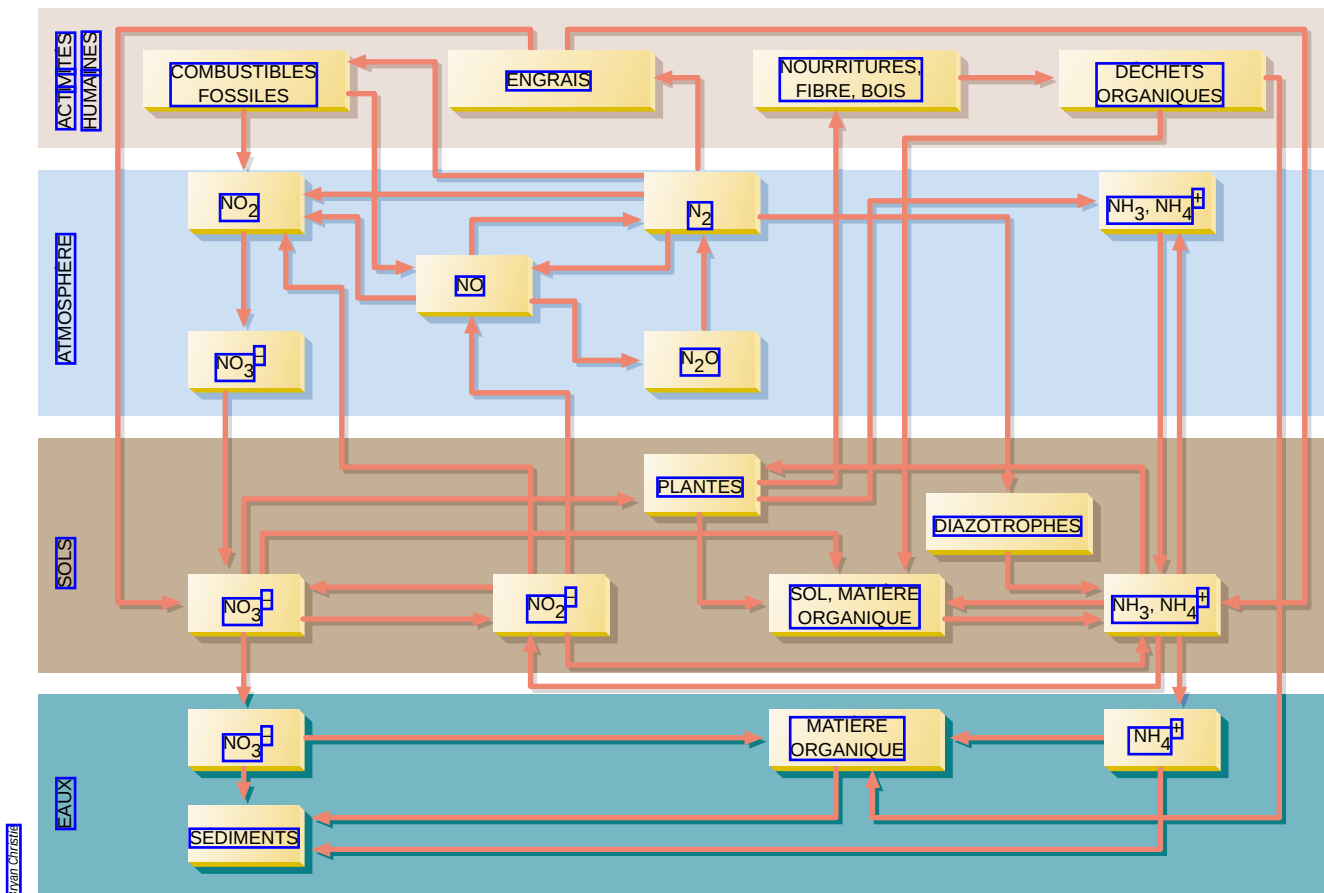
cent dans les années 1980. Aujourd'hui les pays en développement utilisent plus de 60 pour cent de la production mondiale d'engrais azotés.

Quelle est l'importance réelle des engrais azotés de synthèse pour l'agriculture mondiale? Cette question géopolitique importante est difficile, car on connaît mal les entrées et les sorties



4. LES BACTERIES FIXATRICES D'AZOTE, micro-organismes capables d'utiliser l'azote atmosphérique pour synthétiser des composés azotés assimilables, vivent dans des nodules, sur les racines des plantes

de la famille des légumineuses telles que le soja (a). On les rencontre également dans les fougères du genre *Azolla* (b), ainsi que dans les tiges de la canne à sucre (c).



5. L'AZOTE est présent dans des molécules différentes, selon qu'il se trouve dans l'eau, dans le sol, dans l'atmosphère ou dans la couverture végétale. L'azote s'échange constamment entre

ces diverses formes. L'avènement de la production industrielle des engrais azotés de synthèse a profondément bouleversé le cycle naturel de cet élément.



6. L'EUTROPHISATION des eaux trop enrichies en azote, en raison d'un lessivage de sols agricoles excessivement engraisés, se manifeste par une prolifération des algues ; leur décomposition absorbe l'oxygène dissous, ce qui tue les faunes aquatiques.

d'azote dans les champs. Toutefois une analyse détaillée des divers types d'apport permet d'estimer à quelque 175 millions de tonnes la quantité totale d'azote qui entre chaque année dans les sols ; la moitié de cette quantité est assimilée par les plantes cultivées. Les engrais de synthèse fournissent environ 40 pour cent de l'azote absorbé par ces cultures. Comme celles-ci fournissent – soit directement sous la forme de plantes, soit indirectement sous la forme d'aliments d'origine animale – 75 pour cent de l'azote présent dans les protéines consommées (le reste est fourni par le poisson, par la viande et par les produits laitiers produits par le pâturage), on estime qu'un tiers des protéines consommées par la population mondiale dépend des engrais azotés de synthèse.

Toutefois un tel calcul n'indique pas que tous les engrais azotés utilisés soient indispensables. Si l'on utilise tant d'engrais de synthèse en Europe et aux États-Unis, c'est surtout parce que l'on veut produire des aliments pour le bétail, dont on consomme la viande. Et même si l'on réduisait de moitié la quantité de protéines animales consommées par les Européens et par les Américains en les persuadant de manger moins de

viande, ces populations bénéficieraient encore d'une alimentation adéquate.

Inversement, on sous-estime l'importance des engrais azotés en observant simplement que la quantité de protéines consommées par la population mondiale dépend pour un tiers des engrais de synthèse : c'est l'existence même d'un certain nombre de pays à territoire limité et à population importante qui dépend de ces molécules. Avec la raréfaction des nouvelles terres, les agriculteurs de ces pays, qui consomment peu de viandes, doivent employer des quantités massives engrais azotés, pour produire suffisamment.

L'excès en tout, un défaut

L'introduction massive d'engrais azotés dans les sols et dans les eaux nuit à la santé des peuples comme à l'équilibre écologique du Globe. Des concentrations excessives en nitrates provoquent des syndromes graves, telle la méthémoglobinémie, ou « maladie des bébés bleus », et peut-être des cancers. En outre, le lessivage de ces sels solubles peut gravement polluer les eaux de surface et les nappes phréatiques, dans les zones où les engrais sont massivement épandus : depuis

une trentaine d'années, la pollution par les nitrates est devenue un grave problème écologique. Ainsi, l'eau de puits de nombreuses régions de la ceinture céréalière des États-Unis et l'eau de la nappe phréatique de nombreuses régions d'Europe de l'Ouest contiennent des concentrations en nitrates dangereusement élevées ; des concentrations bien supérieures aux limites légales sont mesurées dans les rivières qui drainent les zones cultivées, ainsi que dans de grands fleuves tels que le Rhin ou le Mississippi.

De surcroît, les engrais azotés qui s'écoulent dans les mares, lacs et baies côtières provoquent souvent leur eutrophisation : l'enrichissement des eaux en un nutriment qui était préalablement présent en quantité limitée suscite une croissance explosive des algues et des cyanobactéries, dont la décomposition ultérieure capte l'oxygène, qui vient alors à manquer aux autres créatures ; les poissons et les crustacés en meurent. La baie de San Francisco et de vastes parties de la mer Baltique souffrent d'eutrophisation ; dans le Queensland, en Australie, le lessivage des champs cultivés menace également certaines parties de la grande barrière de corail, qui risquent d'être recouvertes par les algues.

Si l'eutrophisation est due à la solubilité des nitrates, qui sont propagés par les eaux, la persistance localisée de certains composés riches en azote est également nuisible, car elle acidifie les sols (ceux-ci sont également acidifiés par des composés soufrés qui, libérés dans l'atmosphère par les combustions, reviennent dans les sols avec les précipitations). Dans les régions où l'on n'épand pas de chaux pour lutter contre cette acidification, les oligo-éléments et les métaux lourds du sol sont dissous, et ils polluent l'eau potable.

L'utilisation massive d'engrais azotés s'accompagne également d'un rejet de grandes quantités de monoxyde d'azote (NO) dans l'atmosphère. Les concentrations en ce gaz, qui est produit par l'action des bactéries du sol sur les nitrates, sont encore faibles, mais le composé participe à deux phénomènes inquiétants. Il contribue à la destruction de la couche d'ozone de la stratosphère ; aux altitudes inférieures, dans la troposphère, le monoxyde d'azote produit un effet de serre. Or, dans l'atmosphère, la durée de vie d'une molécule de monoxyde d'azote est supérieure à un siècle, et chaque molécule absorbe envi-

ron 200 fois plus de chaleur qu'une molécule de gaz carbonique.

Une autre modification néfaste de l'atmosphère est amplifiée par le dioxyde d'azote (NO_2), qui est libéré par les micro-organismes qui agissent sur les engrais azotés. Cet oxyde (qui est d'ailleurs produit en quantités encore supérieures lors des combustions) réagit, en présence du rayonnement solaire, pour produire le smog photochimique. Bien que le dépôt de composés azotés contenus dans l'atmosphère favorise la croissance des végétaux dans des prairies ou dans des forêts carencées en azote, des doses excessives risquent de surcharger des écosystèmes sensibles.

Lorsque l'on a commencé à utiliser les engrais azotés de synthèse, on ne prévoyait pas ces nuisances et, même aujourd'hui, on s'en préoccupe moins que de l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Pourtant, tout comme la libération massive de dioxyde de carbone, l'introduction d'azote réactif dans l'environnement est une expérience géochimique risquée.

De l'habitude à la dépendance

Les émissions de dioxyde de carbone, et les menaces qu'elles font encourir au climat, peuvent être réduites par un ensemble de mesures économiques et techniques. Même sans crainte d'un réchauffement des climats, on doit se préoccuper du remplacement des combustibles fossiles, car ces derniers se raréfient. En revanche, nous n'avons aucun moyen de cultiver les végétaux sans apport d'azote, et aucun procédé ne pourrait aujourd'hui remplacer la synthèse de Haber-Bosch.

Le génie génétique créera peut-être un jour des bactéries symbiotiques du genre *Rhizobium* qui fourniront directement de l'azote aux céréales, ou bien il obtiendra des végétaux fixant directement l'azote, mais la recherche n'a pas encore abouti. L'humanité devra augmenter sa consommation d'engrais azotés de synthèse pour nourrir les milliards de personnes qui naîtront avant que la population mondiale ne cesse de croître.

Une stabilisation rapide de la population globale et l'adoption générale du végétarisme pourraient réduire

Le curieux destin de Fritz Haber



FRITZ HABER reçut le prix Nobel de chimie en 1918, malgré son activité durant la guerre.

Malgré la remarquable contribution de Fritz Haber à la chimie et malgré sa découverte du procédé industriel de synthèse de l'ammoniac, le Comité Nobel lui accorda avec réticence le prix Nobel de chimie en 1918. Directeur de l'Institut Kaiser Wilhelm de chimie physique au cours de la Première Guerre mondiale, il avait introduit le chlore, puis le phosgène et l'ypérite, comme gaz de combat, parce qu'il était persuadé que de telles armes permettraient aux armées allemandes de remporter une victoire-éclair, qui réduirait les souffrances générales. Tout le monde

n'était pas de son avis ; notamment sa première femme, tourmentée par l'épouvantable contribution de son mari à cette guerre, se suicida la veille de la première utilisation des gaz, en 1915. Condamné par le milieu scientifique, Haber poursuivit néanmoins ses recherches. Plus tard, les mesures antisémites des nazis le firent partir pour l'Angleterre (il était juif). Il mourut en 1934 à Bâle.



LES GAZ DE COMBAT ont fait d'innombrables morts lors de la Première Guerre mondiale.

les besoins en engrais azotés, mais peut-on raisonnablement s'attendre à de telles transformations ? À défaut, on devra améliorer l'utilisation des engrais : on obtient des résultats impressionnants en surveillant les concentrations en azote disponible dans le sol et en réglant les apports sur les besoins.

On ne peut apprécier le potentiel réel de l'« agriculture biologique » qu'en conservant ces considérations géopolitiques à l'idée. Si la rotation des cultures, la culture des légumineuses, l'entretien des sols et le recyclage des déchets organiques sont des techniques utiles, elles ne satisferont pas les besoins croissants des pays très peuplés qui manquent de terres cultivables. Si tous les agriculteurs revenaient aux méthodes traditionnelles de l'agriculture biologique, on constaterait rapidement que celles-ci ne sont pas en

mesure de nourrir la population mondiale, car l'azote est trop rare, dans les sols, pour nourrir six milliards d'hommes.

Lorsque l'Académie des sciences de Suède décerna le prix Nobel de chimie à Fritz Haber, en 1918, elle mentionna qu'il avait créé « un moyen extrêmement important d'améliorer la production agricole et le bien-être de l'humanité ». Toute dithyrambe qu'elle soit, cette description est insuffisante : aujourd'hui, deux milliards de personnes sont en vie parce que les protéines de leur organisme contiennent de l'azote qui est dû au procédé Haber-Bosch. À moins d'avancées du génie génétique, la plupart des protéines nécessaires à la survie et à la croissance des deux autres milliards de personnes, à naître dans les deux prochaines générations, proviendront de la même source.

Vaclav SMIL est professeur de géographie à l'Université du Manitoba.

Vaclav SMIL, *Population Growth and Nitrogen : An Exploration of a Critical Existential Link*, in *Population and Development Review*, vol. 17, n° 4, pp. 569-601, décembre 1991.

James N. GALLOWAY, William H. SCHLESINGER, Hiram LEVY II, Anthony MICHAELS et Jerald L. SCHNOOR, *Nitrogen Fixation : Anthro-*

pogenic Enhancement – Environmental Response, in *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 9, n° 2, pp. 235-252, juin 1995.

Ester van der VOET, Rene KLEIJN et Udo de HAES, *Nitrogen Pollution in the European Union : Origins and Proposed Solutions*, in *Environmental Conservation*, vol. 23, n° 2, pp. 120-132, 1996.

Vaclav SMIL, *Cycles of Life : Civilization and the Biosphere*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

Sablier inversé

PIERRE ÈVESQUE

L'étrange comportement du sable quand on fait vibrer un sablier où les grains montent, au lieu de descendre.

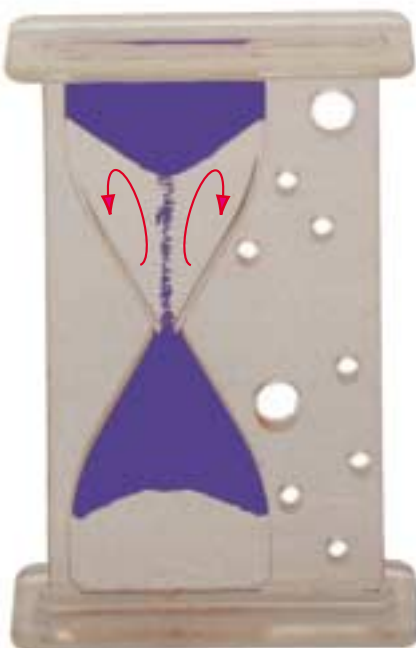
Étrange sablier ! L'écoulement du temps y est mesuré, non par la descente de grains de sable, mais par la montée de billes qui flottent dans un liquide. En avril 1995, nous en avons analysé le fonctionnement et avons vu que la chambre supérieure est le siège de deux circulations en sens opposés, engendrées par le déplacement du liquide, quand des billes remontent au centre de la chambre. Cet effet est semblable à celui qu'avait observé le médecin britannique M. Boycott, dans du sang coagulé qui sédimentait : les caillots qui descendent dans un tube vertical sont ralentis par le fluide qu'ils déplacent, mais la descente est facilitée quand le tube est incliné, parce que les caillots s'écoulent près de la face inférieure du tube, sans être gênés par le fluide qui remonte, au-dessus d'eux.

Nous avons également observé que, dans cette même chambre supérieure, la remontée des particules est plus lente près des parois verticales qu'au centre, et nous avons conclu que ce phénomène était dû à la viscosité du liquide environnant. Enfin nous avons remarqué l'existence d'une cheminée, dans la partie inférieure occupée par les billes : cette cheminée alimente en liquide la partie inférieure de la chambre inférieure, à mesure que les billes quittent cette dernière ; elle ressemble (en sens inverse) à la cheminée d'un volcan provoquée par l'expulsion des laves.

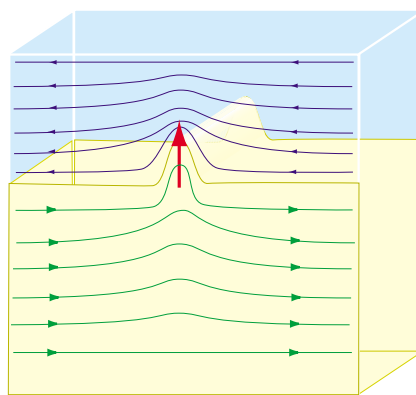
Je vous propose de reprendre le même sablier afin d'explorer d'autres effets hydrodynamiques. Nous nous limiterons à ceux qu'induisent des vibrations sur la forme de l'interface entre un liquide et un milieu granulaire (tas de sable ou tas de billes). Nous verrons que ces effets peuvent aussi être obtenus à l'interface de deux liquides.

Ces expériences permettent d'illustrer le comportement fluide d'un milieu granulaire. Nous verrons que, dans les cas examinés, les forces de frottement (forces visqueuses ou forces de frottement solide entre grains) sont négligeables et que les comportements

observés résultent des effets d'inertie dans les fluides incompressibles. Toutefois, avant d'examiner cette expérience avec le sablier inversé, nous examinerons une expérience similaire, dans une cellule de géométrie plus simple.



1. Circulation du liquide sous l'action de la montée des billes, dans un sablier inversé.



2. Une protubérance du milieu granulaire (en jaune) s'allonge dans le liquide qui surmonte ce milieu, parce que la vitesse augmente dans le liquide au passage de la protubérance : de ce fait, la pression diminue...

UNE EXPÉRIENCE DE VIBRATION

A l'aide de plaques de plexiglas, construisons une cellule rectangulaire, transparente, d'un centimètre d'épaisseur et de hauteur bien supérieure à l'épaisseur. Fixons cette cellule contre le cône d'un haut-parleur puissant, relié à un amplificateur où nous injectons l'enregistrement d'un *la* de diapason, le volume étant réglé au maximum (voir la figure 3). Ainsi nous pouvons faire vibrer la cellule horizontalement.

Remplissons à moitié la cellule de sable, complétons le remplissage avec de l'eau, et fermons hermétiquement sans laisser d'air. Lorsque la cellule est au repos, la pesanteur fait sédimenter les particules. La surface du tas de sable dans l'eau peut être horizontale ou inclinée, mais l'inclinaison ne peut être supérieure à un angle nommé angle de talus : la stabilité du sable dans une configuration inclinée résulte de l'existence d'un frottement solide entre les grains de sable ; en raison de ces forces de frottement, les grains des couches supérieures ne roulent pas sur les grains inférieurs.

Faisons alors vibrer la cellule horizontalement avec une amplitude a et une fréquence f fixes. Une telle vibration correspond à une accélération qui dépend du temps : aussi, dans la cellule, les particules sont soumises à une gravité effective qui est la somme de cette accélération et de l'accélération de la pesanteur. Cette accélération résultante oscille périodiquement autour de la verticale d'un angle β donné par $\tan \beta = 4\pi^2 a f^2 / g$.

Lorsque les amplitudes de vibration sont limitées, la gamme des inclinaisons possibles de la surface libre du sable diminue d'autant plus que les variations d'accélération imposées par la vibration sont importantes : toutes les pentes supérieures à $\phi - \beta$ sont déstabilisées. Ainsi, si l'angle β est inférieur à l'angle de talus ϕ , la surface libre reste stable dans une gamme d'inclinaisons, qui diminue quand l'amplitude de vibration croît. Puis, lorsque l'angle β devient supérieur à l'angle de talus ϕ , aucune surface libre n'est plus en équilibre, et l'on observe un va et vient rapide du sable, qui oscille autour d'une position d'équilibre : le sable se « liquéfie ». Un stroboscope nous montrera que le détail de la surface libre moyenne horizontale, créée par la vibration, a des caractéristiques insoupçonnées.

Avant de construire le stroboscope qui montrera les phénomènes invisibles à l'œil nu, remarquons que l'observation de la surface du sable redevient facile si l'on vibre encore plus fort la cellule : cette surface est ridée avec des rides perpendicu-

lares à l'axe de vibration, la distance entre rides est supérieure à l'amplitude de vibration et la hauteur des rides est environ égale à la distance entre les rides. En modifiant l'amplitude ou la fréquence de vibration, on constate que la hauteur des rides dépend de l'amplitude et de la fréquence de vibration. Enfin les rides forment un relief stationnaire, dont la hauteur n'oscille pas au cours du temps.

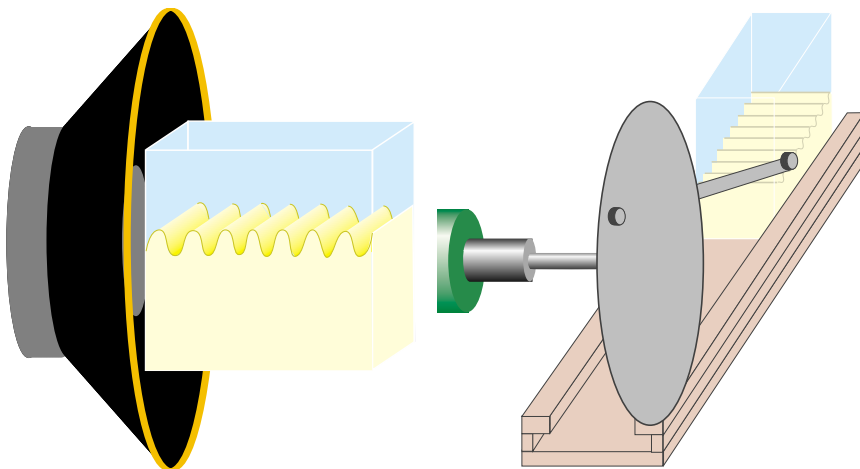
UN RELIEF STATIONNAIRE À LA SURFACE DU SABLE

Quand on réduit l'amplitude de vibration, l'aide du stroboscope devient essentielle, car le relief est complètement brouillé par le mouvement de la cellule. Pour construire le stroboscope, je vous conseille d'utiliser une perceuse à variateur de vitesse qui fera tourner un disque cranté (faites une dizaine de trous dans le disque pour augmenter la fréquence d'éclairement) devant une source intense de lumière. Vous continuerez de voir le profil stationnaire lorsque les distances entre rides sont inférieures à l'amplitude de vibration. Ainsi, quelle que soit l'amplitude de vibration, un relief stationnaire se crée !

Ceux qui voudront se lancer dans de la physique plus quantitative pourront déterminer les variations de la distance entre rides en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la vibration : ils trouveront que le paramètre qui détermine les structures est $2\pi af$, et ils pourront vérifier expérimentalement que le résultat ne change pas si l'on change la taille des grains.

Le phénomène aurait-il encore lieu si les grains étaient de taille nulle ? Ce cas est celui de deux liquides non miscibles : dans les conditions de l'expérience précédente, on trouve que les rides n'apparaissent pas pour des vibrations trop faibles, mais qu'il existe un seuil au-delà duquel les rides apparaissent ; ce seuil correspond à des rides de longueur d'onde assez grande, observables à l'œil nu. L'absence de rides aux petites longueurs d'onde s'explique par l'existence de forces capillaires, à la surface des deux liquides : celles-ci empêchent l'existence de rides de petite longueur d'onde, qui correspond à un plissement trop important de l'interface (ces forces n'agissent pas dans le cas du sable plongé dans l'eau, car l'eau est partout présente). De surcroît, l'observation des rides pour des grains de taille nulle (pas de grains) montre que l'on doit chercher le moteur de la formation des rides dans le comportement liquide du milieu granulaire.

Pour comprendre la formation des rides, examinons les forces et les phé-



3. Deux façons de faire vibrer une cellule : à l'aide d'un haut-parleur ou d'une perceuse reliée à la cellule par une bielle. Ces vibrations engendrent des rides à l'interface du sable et de l'eau

nomènes importants dans les expériences précédentes. Le physicien américain Richard Feynman avait introduit les notions d'eau sèche et d'eau mouillée, pour distinguer respectivement les cas où les effets d'inertie sont les seuls à prendre en compte et ceux où la viscosité du fluide est notable.

UN LIQUIDE SEC

Un liquide sans aucune viscosité pourrait s'écouler contre une paroi sans exercer aucune force tangentielle sur cette dernière : au contact d'une paroi, la vitesse du liquide serait différente de la vitesse de la paroi. En revanche, un liquide visqueux se déplace à la même vitesse que les solides qu'il baigne : il mouille les parois. Loin de ces dernières, le liquide peut être soumis à des effets d'inertie qui l'obligent à bouger à une vitesse différente de celle de la paroi. L'eau réelle a les deux types de comportement : l'eau au contact d'une paroi a la même vitesse qu'elle, mais l'eau loin de la paroi peut avoir une vitesse différente si on exerce des forces qui la mettent en mouvement.

Que se passe-t-il si l'on impose à une plaque plane, mince, infinie, immergée dans l'eau, un mouvement vibratoire parallèle à son plan ? L'eau se comporte-t-elle comme de l'eau sèche, qui reste immobile, ou comme de l'eau visqueuse, entraînée par la vibration ? Le physicien irlandais George Stokes étudia théoriquement ce mouvement en postulant que l'eau était visqueuse. Il montra notam-

ment que le mouvement était essentiellement localisé sur une épaisseur nommée épaisseur de la couche visqueuse, et que l'amplitude de ce mouvement décroît exponentiellement avec la distance à la plaque. Par exemple, pour les fréquences de dix hertz dans l'eau, l'épaisseur de la couche visqueuse est de l'ordre de 0,5 millimètre.

Dans le cas qui nous intéresse, l'épaisseur de la couche visqueuse est inférieure à toutes les dimensions de la cellule, mais supérieure à la taille des pores entre les grains de sable. Aussi la viscosité des deux milieux peut être négligée, et ces derniers ne sont soumis qu'aux effets inertiels ; en revanche, les pores entre les grains ne sont pas suffisamment gros pour que le liquide interstitiel s'y meuve librement. Aussi l'eau interstitielle est piégée entre les grains et se meut à la vitesse du milieu granulaire. L'ensemble des grains et de l'eau interstitielle forme une phase unique, que nous nommerons phase granulaire.

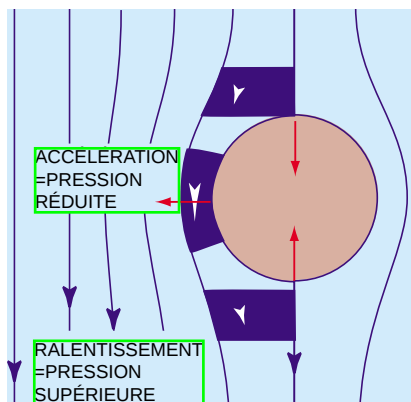
LES DEUX PHASES

Cette observation explique pourquoi les phénomènes qui s'observent dans une cellule contenant du sable et de l'eau se retrouvent dans une cellule contenant deux liquides non miscibles. De surcroît, l'analyse précédente nous permet de négliger l'effet de la viscosité sur la dynamique de chacune des phases et de considérer que la mécanique y est régie par l'inertie. Dans ce cas, les deux milieux sont soumis à une gravité effective qui varie périodiquement en amplitude et en direction. Le milieu le plus dense tend à se mouvoir dans la direction de la gravité effective, et pousse le milieu le moins dense en sens inverse (le milieu le plus dense est le plus inerte). Cela

Pour se procurer le sablier utilisé dans les expériences décrites par P. Évesque, voir la page 92.



4. Quand on fait vibrer verticalement le sablier inversé, on observe la montée de «gouttes» de matière granulaire, qui se déforment en strates horizontales.



5. Une goutte qui s'élève dans un liquide s'aplatit, parce que le liquide accélère en la contournant : cette accélération s'accompagne d'une réduction de la pression sur la ceinture de la goutte ; simultanément, la pression augmente au-dessus et au-dessous de la goutte, quand le fluide ralentit.

crée un mouvement périodique des deux liquides, la phase la plus dense se dirigeant dans le sens opposé à la vibration, et la phase la moins dense se dirigeant dans le sens opposé à la phase dense.

Que se passe-t-il quand une petite excroissance stationnaire se forme à la surface des deux phases ? Supposons que celle-ci soit engendrée au centre de la cellule, et qu'elle corresponde à l'invasion du liquide par la phase granulaire (voir la figure 2). Lors des mouvements de chaque phase, le débit de matière vers la droite est égal au débit

de matière vers la gauche, car toute la matière se conserve, dans la cellule fermée. Par exemple, si la phase supérieure se déplace vers la droite, la phase inférieure doit se déplacer vers la gauche. Or une excroissance née spontanément dans la phase supérieure réduit la section de la zone où la phase supérieure se déplace : la vitesse du fluide supérieur augmente, tandis que la vitesse du fluide inférieur diminue, à la verticale de l'excroissance. Selon la loi de Bernoulli, qui stipule que les fluides ont une pression inférieure quand leur vitesse augmente (parce que la quantité de liquide est conservée dans un écoulement), on doit alors admettre que la pression diminue au-dessus de l'excroissance, et qu'elle augmente en dessous : l'excroissance peut croître.

Comme l'interface n'est jamais en équilibre parfait, un ensemble de petites excroissances est amplifié, jusqu'à ce que les excroissances de plus grande longueur d'onde s'imposent. Pourquoi existe-t-il une limite à la taille des excroissances ? Parce que la pesanteur aplatit les excroissances trop grandes.

LA VIBRATION À L'ENVERS

Quel résultat obtiendrions-nous en faisant vibrer le sablier inversé ? Nous pouvons obtenir la vibration voulue en remplaçant la petite cellule parallélépipédique par le sablier, sur le haut-parleur, mais nous pouvons aussi faire vibrer le sablier à l'aide d'une perceuse électrique équipée d'un variateur électronique. On fixe la perceuse sur un bâti où l'on place des glissières, et l'on engage sous ces glissières un support que l'on fait glisser en le reliant à l'axe de rotation de la perceuse par un système simple de bielle et de manivelle (voir la figure 3). Ainsi obtient-on des vibrations intenses et rapides : les meilleurs résultats s'obtiennent pour des amplitudes de vibration comprises entre 0,1 et 10 millimètres, et des fréquences comprises entre 1 et 60 hertz. Attention aux yeux et aux doigts : les accélérations sont si fortes qu'on prendra garde à ne jamais se placer dans la direction du mouvement, qui risque de désolidariser les pièces ; en outre, on recouvrira le montage d'un carter de protection.

Redressons le sablier et faisons-le vibrer verticalement. En l'absence d'écoulement (si tous les grains sont déjà piégés dans la chambre supérieure), rien ne se passe. En revanche, si l'on retourne le sablier et qu'on déclenche l'écoulement, on observe des phénomènes qui

dépendent de l'amplitude et de la fréquence de vibration. Pour les examiner, vibrons à amplitude constante et à fréquence croissante.

Les effets, à fréquence nulle, faisaient l'objet du précédent article : tant que la fréquence est faible, les grains montent normalement. Si l'on fait vibrer lentement, les différences de densité provoquent la déviation des grains au passage du col (en dessous, aucun effet n'est visible, car les grains sont tassés contre le col). Pourquoi sont-ils alors collés contre les parois ? L'effet est le même que quand on souffle sur une feuille de papier posée sur une table : la vitesse de l'air augmentant entre la table et la feuille, la pression qui diminue (encore l'effet Bernoulli !) plaque la feuille contre la table. De même, la vitesse du liquide (imposée par les oscillations), entre les grains et les parois, plaque les grains contre les parois. Après une petite propagation contre les parois, les particules se détachent et remontent normalement.

Si l'on augmente encore la fréquence de vibration, le phénomène s'accroît et la longueur sur laquelle l'écoulement granulaire suit la paroi inclinée augmente. L'écoulement finit toutefois par se détacher, et l'on observe la formation de «gouttes» de milieu granulaire. Si l'on augmente encore la fréquence, les gouttes deviennent oblongues, s'étirant horizontalement en remontant lentement ; vers le sommet, les gouttes sont si déformées qu'elles s'arrangent sous la forme de couches horizontales qui montent très lentement (voir la figure 4).

On explique encore ce phénomène de stratification par l'effet Bernoulli. Considérons une goutte de matière granulaire (voir la figure 5). La vibration provoque un mouvement de va-et-vient dans le liquide. Au sommet et à la base de la goutte, la vitesse relative du liquide est nulle ; en revanche, elle est importante sur les bords verticaux. Aussi la pression est supérieure en haut et en bas de la goutte, qui est donc écrasée. Ce même mécanisme devrait s'observer sur les bulles de gaz qui remontent dans un liquide. Je suis heureux de signaler aux lecteurs de *Pour la science* que cet effet de stratification des gouttes de liquide granulaire vient d'être découvert ; ils l'ont en avant-première.

Pierre ÈVESQUE est directeur de recherche à l'École Centrale de Paris.

A. Ivanova, V. Kozlov et P. Èvesque, *Europhysic Letters*, 35, p. 159-164, 1996.

Les ordinateurs mathématiciens !

JEAN-PAUL DELAHAYE

Après le jeu d'échecs, l'intelligence artificielle triomphera-t-elle des mathématiques ?

Il y a 40 ans que les calculatrices ont supplanté l'homme pour les calculs numériques. En revanche, c'est seulement depuis une dizaine d'années que le calcul symbolique par ordinateur (dérivation des fonctions, recherche de primitives, manipulation de polynômes, développements limités, etc.) a atteint une maturité qui en fait un allié de première importance dans certains domaines mathématiques et une aide appréciée des ingénieurs. La nouvelle formule de calcul de π , que nous avons traitée en janvier 1997, était un exemple frappant de cette avancée et des résultats produits par le calcul symbolique en mathématiques.

Un domaine mathématique subsiste où les progrès de la science informatique sont peu spectaculaires : la recherche de démonstrations par ordinateur.

Distinguons deux types de démonstrations mathématiques : celles qui ne sont que le développement de longs calculs (numériques ou symboliques) et celles qu'on obtient avec des méthodes où les raisonnements prédominent.

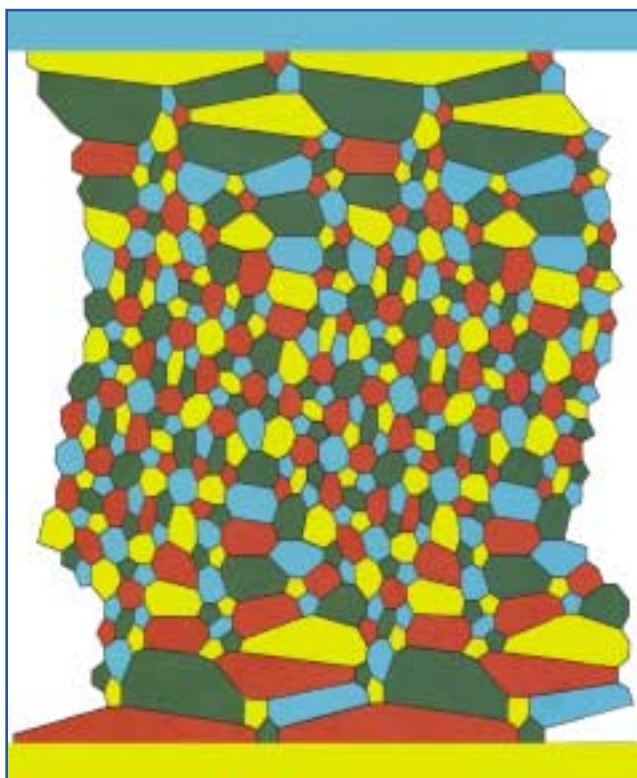
Pour le second type de démonstration, l'apport de l'informatique n'est pas convaincant : rares sont les énigmes anciennes intéressant vraiment les mathématiciens dont la réso-

lution a été obtenue par une démonstration automatique d'ordinateur.

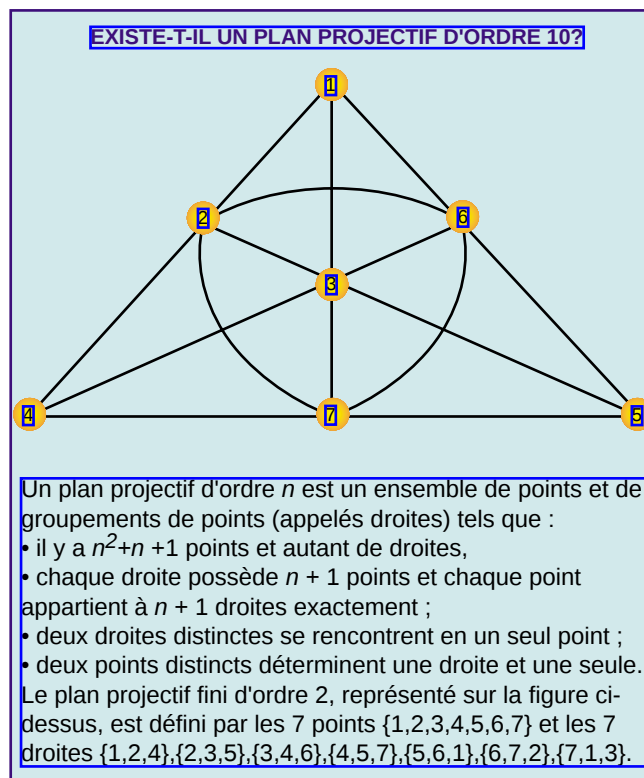
LE THÉORÈME DES QUATRE COULEURS

On cite fréquemment le théorème des quatre couleurs : avec quatre couleurs, on peut toujours colorier les pays d'une carte géographique sans que deux voisins portent des couleurs identiques. Ce résultat, conjecturé en 1852 par Francis Guthrie, ne fut démontré qu'en juin 1976 par Kenneth Appel et Wolfgang Haken à l'aide d'un calcul par ordinateur. Toutefois, les idées et la structure de la démonstration étaient dues aux mathématiciens qui, pendant plus d'un siècle, avaient travaillé sur le problème. L'ordinateur, en 1976, s'est chargé d'un travail de recherche et de vérification trop long pour être mené à la main par un humain, mais qu'on peut difficilement considérer comme un raisonnement et encore moins comme un raisonnement créatif. L'ordinateur, dans la démonstration du théorème des quatre couleurs, quoique irremplaçable, n'a été qu'un assistant fiable et obstiné.

La preuve de K. Appel et W. Haken n'a jamais été vérifiée à la main. En fait, elle n'avait pas été vérifiée du tout, car, pour le faire par machine, il fallait saisir la description de 1 476 graphes



1. Illustration du problème des quatre couleurs résolu par ordinateur en 1976 et vérifié en 1996: peut-on colorier toute carte de façon que deux pays contigus n'aient pas la même couleur ?



2. Les mathématiciens ne pouvaient déterminer s'il existait un plan projectif d'ordre 10. Cette inexistence a été démontrée en 1988 sur un ordinateur programmé par C. Lam, L. Thiel et S. Swiercz.

assez compliqués, ce qui, à cause du risque considérable d'erreurs et de la stupidité de cette étape de travail, n'a pas été tenté.

Neil Robertson, Daniel Sanders, Paul Seymour et Robin Thomas entreprirent, il y a quelques mois, de trouver une nouvelle preuve du théorème des quatre couleurs, afin de tranquilliser les mathématiciens qui niaient l'authenticité de la démonstration : en mathématiques, un résultat démontré une seule fois – par un humain ou par un ordinateur – reste incertain.

Après quelques mois de travail, l'équipe réunie autour de W. Robertson et leur ordinateur découvrirent une nouvelle preuve, plus courte que la précédente. Elle utilise un ensemble de 633 graphes, dont l'un au moins serait présent dans un contre-exemple au théorème des quatre couleurs, s'il en existait.

La méthode est en gros la même que celle de 1976, et la nouvelle preuve est encore impossible à vérifier à la main. Toutefois, avoir trouvé deux preuves différentes du théorème devrait rassurer les mathématiciens soupçonneux. De plus, puisque la nouvelle preuve est plus courte, elle sera aussi plus facile à vérifier; d'autant qu'un effort a été fait pour rendre disponibles les données nécessaires à la vérification sous une forme commode à manipuler et accessible à tous par Internet.

La communication généralisée des ordinateurs facilite l'échange des données et, donc, la vérification de ce type de résultats par d'autres équipes, tâche autrefois presque impossible.

LE PLAN PROJECTIF D'ORDRE 10

Un second exemple de résultat souvent mentionné comme une réussite des ordinateurs en mathématiques est la preuve qu'il n'existe pas de plan projectif fini d'ordre 10 (une explication de ce qu'est un plan projectif et un exemple sont indiqués sur la figure 2). Cette preuve a été obtenue à l'aide d'un programme, en 1988, par C. W. Lam, L. H. Thiel et S. Swiercz.

Le problème est intéressant, car il est lié à une conjecture formulée en 1782 par Léonard Euler concernant les carrés gréco-latins, qui, une fois qu'elle eut été montrée fautive (en 1959), amena à penser qu'il pouvait y avoir de tels plans projectifs d'ordre 10. L'échec des tentatives pour en construire ou pour démontrer qu'ils sont impossibles faisait de la question une énigme agaçante que l'informatique a résolue. Il s'agit donc, là encore, d'un

résultat sur lequel les mathématiciens s'interrogeaient (une thèse a même été soutenue sur le sujet à l'Université de Berkeley en 1974) et qui a été trouvé par ordinateur avant qu'aucun humain ne l'élucide.

L'ordinateur fut irremplaçable, mais son rôle fut d'explorer systématiquement et mécaniquement toutes les tentatives imaginables de construction d'un plan projectif d'ordre 10 et de constater qu'aucune n'aboutit. Le travail fait par l'ordinateur se réduisait à un calcul.

Comme pour le théorème des quatre couleurs, une telle preuve est, par sa longueur, impossible à vérifier à la main.

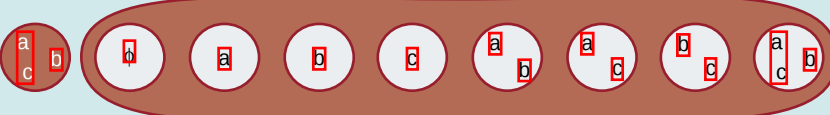
Il y a quelques mois, William McCune, du Département de mathématiques et d'informatique du Laboratoire Argonne, aux États-Unis, a démontré la conjecture de Robbins, sur laquelle des recherches vaines étaient menées depuis 1933.

L'ordinateur, cette fois-ci, a-t-il fait un peu plus que dans les deux cas précédents? Pour que chacun puisse

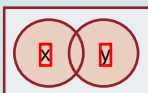
3. ALGÈBRE DE BOOLE ET AXIOME DE ROBBINS

ALGÈBRE DE BOOLE

Un exemple d'algèbre de Boole (et l'on peut montrer que toutes les algèbres de Boole finies se ramènent à cet exemple) est celui des parties d'un ensemble E. Les parties de $\{a, b, c\}$, par exemple, sont $\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{b, c\}, \{c, a\}, \{a, b, c\}$.



Dans une algèbre de Boole, deux opérations $x+y$ et $n(x)$ sont données ; elles permettent d'en définir une troisième en posant $x \bullet y = n(n(x) + n(y))$.



RÉUNION $x + y$



COMPLÉMENT $n(x)$



INTERSECTION $x \bullet y$

Ici, $+$ est l'opération de réunion ensembliste ; $n(x)$ est l'opération de passage au complémentaire, $\bullet$ est l'opération d'intersection, V est l'ensemble vide, etc. Une algèbre est de Boole si tous les axiomes suivants sont satisfaits.

$$x+y=y+x \quad x \bullet y=y \bullet x$$

(commutativité)

$$x+(y+z)=(x+y)+z \quad x \bullet (y \bullet z)=(x \bullet y) \bullet z$$

(associativité)

$$x+T=T \quad x+V=x \quad x \bullet V=V \quad x \bullet T=x$$

(propriétés de T et V)

$$x+n(x)=T \quad x \bullet n(x)=V \quad n(T)=V \quad n(V)=T$$

(propriétés de T et V)

$$x+x=x \quad x \bullet x=x$$

(idempotence)

$$x \bullet (y+z)=(x \bullet y) + (x \bullet z) \quad x+(y \bullet z)=(x+y) \bullet (x+z)$$

(distributivité)

$$x+(x \bullet y)=x \quad x \bullet (x+y)=x$$

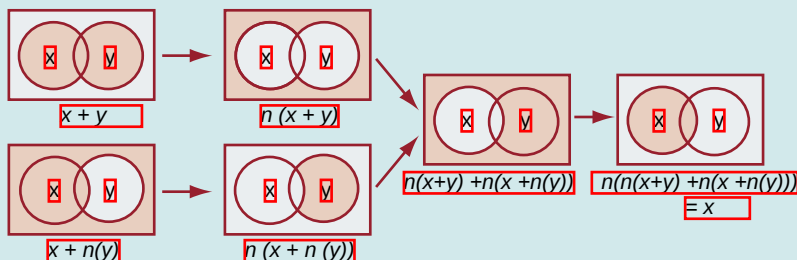
(absorption)

$$n(x+y)=n(x) \bullet n(y) \quad n(x \bullet y)=n(x) + n(y)$$

(lois de Morgan)

Certains des axiomes peuvent être démontrés à partir des autres : la commutativité de $\bullet$ résulte ainsi de sa définition et de la commutativité de $+$.

TOUTE ALGÈBRE DE BOOLE VÉRIFIE L'AXIOME DE ROBBINS : $n(n(x+y) + n(x+n(y))) = x$



La commutativité de $+$, l'associativité de $+$ et l'axiome de Robbins permettent seuls de démontrer tous les axiomes d'une algèbre de Boole. C'est un ordinateur qui a établi ce résultat conjecturé depuis 1933, mais resté indémontré jusqu'à présent.

se faire une idée, voici quelques détails sur le problème et sur le travail de l'ordinateur de W. McCune.

LES ALGÈBRES DE BOOLE

La conjecture de Robbins indique que toute structure définie par une opération d'addition, $x+y$, et une opération de complémentation, $n(x)$, qui vérifie les trois propriétés suivantes :

- commutativité (C) : $x+y = y+x$
- associativité (A) : $(x+y)+z = x+(y+z)$
- équation de Robbins (R) :

$n(n(x+y) + n(x+n(y))) = x$,
vérifie nécessairement toutes les propriétés que possède l'opération de réunion ensembliste et celle de complémentation dans un ensemble.

Les structures vérifiant les axiomes (C), (A) et (R) s'appellent des *algèbres de Robbins*. Celles vérifiant les propriétés que possèdent la réunion et la complémentation dans un ensemble

(liste indiquée sur la figure 3) s'appellent des *algèbres de Boole*, du nom de George Boole, mathématicien irlandais du XIX^e siècle, auteur du célèbre ouvrage *Les lois de la pensée*, qui décrit un calcul algébrique nouveau à la base de la logique moderne et de la théorie des ensembles.

La conjecture de Robbins affirme donc que «toute algèbre de Robbins est une algèbre de Boole», et la démontrer consiste à utiliser uniquement les trois propriétés (C), (A) et (R) pour en déduire celles de la figure 3. Essayez, par exemple, de déduire $x + x = x$. Il est facile de montrer qu'une algèbre de Boole est une algèbre de Robbins ; c'est la réciproque qui est difficile.

En fait, l'ordinateur n'a pas démontré exactement cette réciproque. Il a utilisé un résultat établi par S. Winker au début des années 1980 : si, dans une algèbre de Robbins, on peut trouver deux éléments a et b vérifiant l'équa-

tion de Winker (W) : $n(a + b) = n(a)$, alors l'algèbre en question est une algèbre de Boole.

L'ordinateur n'a donc eu qu'à établir l'implication : si (C), (A) et (R), alors il existe a et b tels que (W).

Bien des tentatives avaient été faites à la main, mais personne n'avait jamais réussi. Le programme EQP (*Equational Prover*) de W. McCune aboutit en octobre 1996, après un calcul ininterrompu d'une durée de huit jours sur une machine utilisant un processeur RS/6000, en consommant 30 mégaoctets de mémoire et en passant en revue plus de 2 612 977 expressions intermédiaires.

L'assaut final fut précédé de plusieurs autres, durant lesquels le programme était paramétré de façon différente et dont l'examen des résultats a conduit à un ajustement judicieux. Si on prend en compte la durée de cette phase de mise au point de la recherche, le déroulement du calcul a occupé le puissant microprocesseur cinq semaines entières.

4. LA DÉMONSTRATION DU 2 OCTOBRE 1996

Voici la preuve de la conjecture de Robbins trouvée par programme. La première étape a été détaillée. Pour les autres, des indications sommaires sont données. La dernière formule en changeant l'ordre de quelques termes est de la forme $n(a + b) = n(a)$; elle montre donc qu'il existe a et b vérifiant l'équation de Winker. Les numérotations des formules sont celles du programme. Les étapes inutiles ont été omises, d'où la discontinuité de la numérotation.

3 [équation de Robbins] $n(n(n(x)+y)+n(x+y)) = y$.

5 [3,3] $n(n(n(x+y)+n(x)+y)+y) = n(x+y)$.

Le crochet [3,3] indique qu'on est parti de l'équation 3 et qu'on a simplifié grâce à 3. Voici le détail de cette première étape :

- on part de 3 : $n(n(n(x)+y)+n(x+y)) = y$.
- on remplace x par $n(x)+y$ et y par $n(x+y)$; cela donne :
 $n(n(n(n(x)+y)+n(x+y))+n(n(x)+y+n(x+y))) = n(x+y)$
- on reconnaît le premier membre de l'équation de Robbins, qu'on remplace par y : $n(y+n(n(x)+y+n(x+y))) = n(x+y)$
- on change l'ordre ce qui est autorisé à cause de l'axiome (C),
 $n(n(n(x+y)+n(x)+y)+y) = n(x+y)$

6 [3,3] $n(n(n(n(x)+y)+x+y)+y) = n(n(x)+y)$.

24 [6,3] $n(n(n(n(n(x)+y)+x+y+y)+n(n(x)+y))) = y$.

47 [24,3] $n(n(n(n(n(n(x)+y)+x+y+y)+n(n(x)+y)+z)+n(y+z)) = z$.

48 [24,3] $n(n(n(n(n(x)+y)+n(n(x)+y)+x+y+y)+y) = n(n(x)+y)$.

146 [48,3] $n(n(n(n(n(x)+y)+n(n(x)+y)+x+y+y+y)+n(n(x)+y))) = y$.

250 [47,3] $n(n(n(n(n(n(x)+y)+x+y+y)+n(n(x)+y)+n(y+z)+z)+z) = n(y+z)$.

996 [250,3] $n(n(n(n(n(n(x)+y)+x+y+y)+n(n(x)+y)+n(y+z)+z)+z+u)+n(n(y+z)+u)) = u$.

16379 [5,996,3] $n(n(n(n(n(x)+x)+x+x+x)+x) = n(n(x)+x)$.

16387 [16379,3] $n(n(n(n(n(n(x)+x)+x+x+x)+x+y)+n(n(n(x)+x)+y))) = y$.

16388 [16379,3] $n(n(n(n(n(x)+x)+x+x+x+x)+n(n(x)+x))) = x$.

16393 [16388,3] $n(n(n(n(n(x)+x)+n(n(x)+x)+x+x+x+x)+x) = n(n(x)+x)$.

16426 [16393,3] $n(n(n(n(n(n(x)+x)+n(n(x)+x)+x+x+x+x)+x+y)+n(n(n(x)+x)+y))) = y$.

17547 [146,16387] $n(n(n(n(n(n(x)+x)+n(n(x)+x)+x+x+x+x)+n(n(n(x)+x)+x+x+x)+x)+x) = n(n(n(x)+x)+n(n(x)+x)+x+x+x+x)$.

17666 [24,16426,17547] $n(n(n(x)+x)+n(n(x)+x)+x+x+x+x) = n(n(n(x)+x)+x+x+x+x)$.

VÉRIFICATION ET MISE À DISPOSITION DES DONNÉES

Les deux millions de termes manipulés pendant l'assaut d'octobre ne sont pas tous indispensables à l'écriture de la démonstration que (C), (A) et (R) implique (W). Loin s'en faut ! Ce que l'ordinateur a trouvé se résume en quatre pages vérifiables à la main, contrairement aux deux exemples de démonstration sur ordinateur cités précédemment. Une esquisse de cette démonstration est donnée en figure 4.

Le programme vainqueur EQP est un programme de démonstration automatique spécialisé qui a été développé à partir d'un autre programme de W. McCune, plus général, appelé OTTER. Pour passer du premier programme à EQP, on a amélioré l'efficacité du traitement des équations dans une algèbre où l'opération de base est commutative et associative, et l'on a multiplié les «paramètres de réglages».

Ces paramètres déterminent la stratégie de manipulation des équations que le programme engendre et combine lors de sa recherche. L'un d'eux, par exemple, indique qu'il ne faut pas prendre en considération les équations de longueur supérieure à une borne fixée. Ce paramètre était fixé à 70 dans la recherche d'octobre 1996. Quand ce paramètre est fixé trop bas, la recherche n'aboutit pas, car la démonstration recherchée passe par de longues équations ; quand le paramètre est fixé trop

haut, la recherche s'égare et n'aboutit pas, non plus, dans un délai acceptable.

La démonstration trouvée par l'ordinateur était à la portée des mathématiciens qui, comme le grand logicien polonais Alfred Tarski, s'étaient intéressés à la conjecture de Robbins. L'ordinateur n'a pas produit une démonstration trop longue pour être comprise par un humain, il a trouvé une démonstration difficile et contournée, mais d'une longueur raisonnable et accessible à l'entendement humain. Cette démonstration est d'ailleurs plus courte que d'autres que les mathématiciens écrivent et échangent ordinairement, et qui atteignent parfois plusieurs centaines de pages.

L'ordinateur n'est donc ici qu'un intermédiaire que l'on peut oublier quand le travail est terminé. Notons aussi que, depuis le calcul d'octobre, des preuves un peu plus courtes ont été trouvées, ainsi que des démonstrations automatiques que l'équation de S. Winker suffit pour rendre «de Boole» une algèbre «de Robbins». Par prudence, toutes ces preuves ont été vérifiées par des programmes indépendants. Les données des démonstrations et des vérifications sont accessibles à tous par le réseau *Internet* ; c'est d'ailleurs ce qui m'a évité d'avoir à saisir à la main la démonstration indiquée à la figure 4 : il m'a suffi de la télécharger, supprimant ainsi les risques d'erreur de saisie.

Tout cela permet donc d'affirmer sans l'ombre d'un doute : les algèbres de Robbins sont des algèbres de Boole.

RÉSULTATS SIMPLES, PREUVES COMPLEXES

En examinant la preuve (même sans en regarder le détail), on est étonné de ce qu'un résultat si simple nécessite un si long détour. Naïvement, on est tenté de croire que tout ce qui est simple doit se démontrer simplement. L'exemple de la conjecture de Robbins, comme bien d'autres en mathématiques, illustre que ce n'est pas vrai. Les recherches systématiques de l'ordinateur établissent indirectement que le résultat ne possède aucune démonstration élémentaire, sinon elle aurait été trouvée. Le résultat est simple, mais le chemin invraisemblablement détourné qui y mène ne possède pas de raccourcis importants (ceux trouvés depuis octobre n'améliorent que marginalement la première preuve).

Des résultats de logique établissent d'ailleurs que, dans toute théorie intéressante, le rapport entre la longueur de la plus courte preuve d'un théorème et celle de son énoncé n'est pas limité

5. DEMARCHE A SUIVRE POUR LES DÉMONSTRATIONS AUTOMATIQUES

PREPARATION

- Ramener le problème à un problème parfaitement clair et formalisé
- Rechercher un démonstrateur adapté, en modifier un ou en concevoir un nouveau (et en faire l'étude mathématique)
- Tester le démonstrateur et en ajuster les paramètres

DEMONSTRATION

- Lancer le démonstrateur et attendre qu'il trouve une preuve (ou l'arrêter s'il ne trouve rien) ;
- Sauvegarder les traces informatiques de la démonstration (on ne saurait se contenter d'un «oui c'est vrai je l'ai prouvé» donné par l'ordinateur!)

VERIFICATION

- Faire redécouvrir la preuve par un second démonstrateur en le guidant éventuellement pour lui rendre la tâche plus facile, ce qui permet – même si le second démonstrateur n'est pas assez puissant pour trouver la preuve seul – de contrôler que le premier n'a pas commis d'erreurs ;
- ou bien produire une version courte et en notation simple de la preuve et la confier à un vérificateur de preuves sachant traiter ce type de formalismes ;
- ou bien refaire le calcul à la main à partir des traces informatiques laissées par le démonstrateur ;
- Mettre le tout sur *Internet* à la disposition des autres chercheurs, qui pourront contrôler à nouveau ;
- Publier la preuve dans les revues spécialisées, ce qui permettra d'autres contrôles.

en taille : pour certains résultats, ce rapport sera de 10, pour d'autres de 1000, pour d'autres de 1000^{1000} , etc. Ces propriétés sont liées à l'indécidabilité logique qui est bien présente dans le problème de Robbins, comme l'a démontré le mathématicien G. McNulty en 1976 : aucune méthode algorithmique générale ne permet de décider à coup sûr, pour tout système d'axiomes, s'il est équivalent ou non aux axiomes d'une algèbre de Boole.

CE N'EST ENCORE QUE DU CALCUL

Reconnaissons-le, à voir la preuve donnée le programme de W. McCune, on remarque que, encore une fois, le démonstrateur automatique a essentiellement fait un calcul : il a accumulé des équations, certaines très compliquées, il a tenté de les combiner de nombreuses façons, et a fini par aboutir, sans qu'aucune compréhension nouvelle ne se déduise de sa démonstration. Nous sommes donc encore déçus. De surcroît, peu de domaines se prêtent aujourd'hui aussi bien que les algèbres de Boole à l'utilisation de démonstrateurs de théorèmes.

Les résultats nouveaux découverts par des programmes de démonstration automatique sont semblables à la

conjecture de Robbins : ils font intervenir des formules compliquées que le programme manipule avec obstination, lui permettant d'aboutir là où aucun humain n'a le courage et la patience de s'aventurer.

Malheureusement (ou heureusement?), les méthodes de démonstration automatique sont ainsi peu susceptibles de fournir des résultats nouveaux intéressant les mathématiciens ; ce n'est que sur des questions très particulières que, pour l'instant, ils ont fait avancer la recherche.

LES DÉMONSTRATEURS DE THÉORÈMES

Pour justifier les travaux en démonstration automatique, nous allons passer d'autres arguments en revue. Ils établissent sans discussion possible l'intérêt de ce qui a été fait dans cette discipline informatique depuis 1954, date à laquelle le premier démonstrateur de théorèmes a été écrit par Martin Davis pour établir des résultats élémentaires d'arithmétique.

D'abord, les démonstrateurs de théorèmes et les méthodes qu'on en tire sont utiles en dehors des mathématiques. Prouver la correction d'un circuit, d'un programme ou d'un protocole d'échange de données n'intéresse pas les mathématiciens, mais est capi-

tal pour les sociétés qui produisent des microprocesseurs ou dans le domaine de la fiabilité des programmes. Aujourd'hui, les industriels utilisent des logiciels dérivés de ces programmes de démonstration automatique. Le Centre national d'études spatiales, le Centre national d'études des télécommunications et l'Aérospatiale, en relation avec des universitaires et des chercheurs du CERT-ONERA de Toulouse, par exemple, mettent en œuvre de tels développements.

En intelligence artificielle, les logiciels systèmes experts qui tentent d'égaler les experts de domaines particuliers (médecine, détection et identification de pannes, conseil en placements boursiers, etc.) comportent des mécanismes de raisonnement appelés *moteurs d'inférences* qui proviennent en grande partie des recherches en démonstration automatique. De même, les langages d'interrogation des *bases de données* exploitent, pour répondre aux requêtes des utilisateurs, des mécanismes de calcul issus de la démonstration automatique.

Le langage de programmation *Prolog*, inventé à Marseille par Alain Colmerauer et Philippe Roussel en 1972, est très prisé pour le développement d'applications en intelligence artificielle. Il est conçu autour d'un mécanisme tiré d'un démonstrateur de théorèmes. La puissance de ce langage provient de cette origine et en explique la caractéristique principale : écrire un programme *Prolog* ne consiste pas à donner des ordres à l'ordinateur (principe de la programmation classique, dite *impérative*), mais à décrire un problème que le langage se chargera de résoudre (principe de la programmation *déclarative*).

De plus, en mathématiques, les démonstrateurs de théorèmes sont souvent les composants de base des vérificateurs de preuves.

VÉRIFIER SANS RÉPIT

Les erreurs en mathématiques sont fréquentes et, parfois, passent inaperçues de longues années. Dans le cas du théorème des quatre couleurs, par exemple, des mathématiciens ont publié à deux reprises des preuves incorrectes, et deux fois l'erreur est restée ignorée durant plusieurs années. Les exemples de démonstrations fausses sont innombrables en mathématiques. On peut penser que les parties centrales des mathématiques sont exemptes de telles erreurs, car leurs résultats ont été contrôlés par de nombreux mathématiciens, et ont été recoupés. En revanche, dans les domaines avan-

cés de recherche où peu de mathématiciens travaillent, une erreur peut rester ignorée longtemps, voire indéfiniment si le résultat faux, trop en marge, n'est jamais utilisé. Les démonstrations fausses ou incomplètes de résultats justes, quoique moins ennuyeuses, sont aussi légion, et leur détection est encore plus délicate.

Il est naturel de vouloir être certain que les preuves mathématiques proposées par les mathématiciens sont bonnes. Cela pourrait être accompli en les soumettant au verdict impartial des machines. Cette idée a déjà conduit à la vérification de théorèmes mathématiques classiques.

Le projet AUTOMATH de N.G. de Bruijn, dès les années 1970, validait une partie du célèbre livre sur les fondements de l'analyse du mathématicien allemand Edmund Landau.

D'autres projets ont permis la vérification de preuves non triviales dont voici une liste très partielle :

- le théorème de Cantor sur le cardinal de l'ensemble des parties d'un ensemble (et qui indique qu'il y a plusieurs types d'infinis) ;
- le théorème des valeurs intermédiaires en analyse (qui dit qu'une fonction d'une variable continue qui prend les valeurs a et b prend aussi toutes les valeurs entre a et b) ;
- le théorème du point fixe de Banach (qui indique que, lorsque vous froissez une feuille de papier et la remettez dans le périmètre qu'elle occupait avant, alors, au moins un point est exactement au dessus de l'endroit qu'il occupait auparavant) ;
- le théorème de Wilson en arithmétique (qui stipule que p est un nombre premier, si et seulement si $(p-1)!+1$ est divisible par p) ;
- l'indécidabilité de l'arrêt d'un programme, démontrée en 1936 par Turing.

En France, le projet COQ propose ainsi un système puissant pour la formalisation et la vérification de démonstrations dans des domaines variés des mathématiques. Malgré ces succès obtenus et les incontestables progrès de ces dernières années, reconnaissons que peu de mathématiciens utilisent les programmes mis à leur disposition pour vérifier leurs démonstrations.

C'est que ceux-ci ne sont pas assez commodes, pour ce que le mathématicien ordinaire produit quotidiennement : les étapes de codage et de formalisation pour obtenir la vérification par l'ordinateur des résultats mathématiques nécessitent une patience et une familiarité qui, finalement, les réservent à quelques spécialistes. L'utilité

de ces systèmes d'aide aux mathématiciens ne fait pourtant aucun doute, car ils permettraient de valider plus rapidement les preuves produites, d'en dériver des versions testables sur d'autres systèmes (vérifier une preuve plusieurs fois ne consisterait plus à la lire, mais à la faire passer dans des vérificateurs automatiques différents), et libérerait le mathématicien de certaines parties pénibles de son travail.

C'est pourquoi un projet international appelé QED (des trois mots *quod erat demonstrandum*, qui signifient «ce qu'il fallait démontrer») tente de se mettre en place depuis 1994. Son but est très ambitieux, et ses promoteurs le comparent à la rédaction du traité général de mathématiques de Bourbaki entreprise il y a quarante ans en France. Il s'agit de faire coopérer tous les spécialistes du domaine, de façon à accélérer les progrès.

La capacité à découvrir de nouvelles démonstrations non triviales et à vérifier celles produites par les mathématiciens a atteint un niveau intéressant ; d'après les tenants du projet, tous les mathématiciens l'utiliseront d'ici peu.

Avec le succès récent de *Deeper Blue* sur Gary Kasparov, le 11 mai 1997, dans une compétition en bonne et due forme, et malgré les commentaires sceptiques qu'il a provoqués (voir *Pour la Science*, juin 1997), nous assistons à la naissance d'une intelligence artificielle aux capacités spécialisées, mais dont on ne peut plus dire qu'elle échoue dans tout ce qu'elle entreprend.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.
e-mail : delahaye@lifl.fr

W. McCUNE et R. PADMANABHAN, *Automated Deduction in Equational Logic and Cubic Curves*, Lecture Notes in Computer Science n° 1095, Springer-Verlag, ISBN 3-540-61398-6, 1996.

C.W.H. LAM, *How Reliable Is a Computer-Based Proof?* in *The Mathematical Intelligencer*, vol. n° 12, pp.8-12, 1990.

M. RUSINOWITZ, *Démonstration automatique. Techniques de Réécriture*, InterEditions, Paris, 1989

T. L. SAATY et P. C. KAITEN, *The Four-Color Problem, Assaults and Conquests*, Dover Publications, Inc. New York, 1977, 1986.

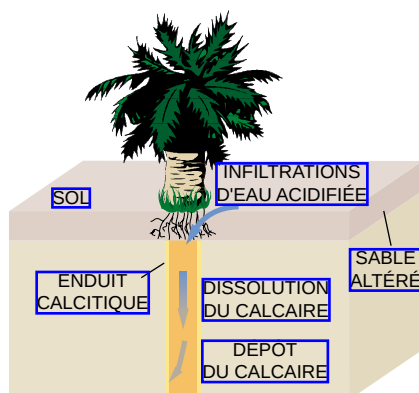
L. WOS, *The Automation of Reasoning : An Experimenter's Notebook with Otter Tutorial*, Academic Press, New York, 1996.

Cheminées de sable

Aux environs de Tabarka, au Nord-Ouest de la Tunisie, la mer est bordée de falaises qu'elle taille dans d'anciennes dunes littorales. Formées il y a 30 000 ans, ces dunes apportées par le vent ont ensuite été consolidées par un ciment calcaire. Elles sont trouées par un grand nombre de cheminées, cylindres remarquablement réguliers et verticaux. Le diamètre moyen de ces perforations est d'une trentaine de centimètres, et leur profondeur est souvent supérieure à un mètre (le marteau qui figure sur les photographies a une longueur d'environ 30 centimètres). Leurs parois sont tapissées d'un enduit calcitique de quelques centimètres d'épaisseur (flèches sur la photographie ci-dessous), et elles sont bourrées de

sables rouges. Quelle est l'origine de ces cheminées? L'explication la plus courante y voit les empreintes «en creux» de troncs

d'arbres, tels des palmiers, enfouis sous les sables dunaires : la consolidation ultérieure des sables aurait conservé ces empreintes après la décomposition des végétaux. Toutefois, la présence d'arbres progressivement enfouis par les sables aurait perturbé la stratigraphie, ce qui



n'est pas le cas. En outre, la couleur du sable qui remplit les cheminées reste inexplicée et le fait que, souvent, les arbres ne poussent pas rigoureusement verticaux, mais légèrement penchés, est négligé.

Des arbres sont bien à l'origine de ces cheminées, mais ils étaient situés à la surface des anciennes dunes après leur consolidation, pas à l'intérieur. L'altération climatique de la surface des dunes a en effet créé un sol où des arbres ont poussé. L'eau de pluie, acidifiée par la présence d'arbres à longue durée de vie et à troncs épais, a dissous préférentiellement le ciment calcaire en dessous (voir le schéma). Les cheminées ainsi formées ont ensuite été comblées par les produits d'érosion du sol, rougis par l'oxydation des minéraux ferrugineux présents en surface.

Roland PASKOFF





© 2007 A. P. 239.07

Les fibres optiques

Chacune des fibres optiques d'un réseau de télécommunication peut transporter environ dix milliards de bits par seconde, l'équivalent de dizaines de milliers de conversations téléphoniques. Ces fibres, aussi fines qu'un cheveu, sont formées de deux couches de verre concentriques, l'âme et la gaine, entourées d'une couche protectrice. Les impulsions lumineuses, émises par un laser ou par une photodiode, se propagent dans l'âme, sans pénétrer la gaine, dont l'indice de réfraction est inférieur (l'indice de réfraction d'un matériau caractérise la vitesse de la lumière dans celui-ci).

LES FIBRES MULTIMODES À SAUT D'INDICE ont une âme de grand diamètre (jusqu'à 100 micromètres). La lumière qui circule en zigzag, par réflexions multiples, parcourt une plus grande distance que celle qui va tout droit.

Toute la lumière d'une impulsion n'arrive donc pas au même moment au point de réception : l'impulsion est étalée dans le temps. Pour éviter les recouvrements, on espace les impulsions, ce qui limite la quantité d'information transmise. Ces fibres sont réservées à des transmissions à courte distance, dans des endoscopes par exemple.

UNE RÉFLEXION INTERNE TOTALE sur l'interface de la gaine et de l'âme oblige la lumière à rester dans cette dernière. Selon les lois de Descartes, le sinus de l'angle entre le rayon lumineux transmis et la perpendiculaire à l'interface est égal au sinus de l'angle du rayon incident multiplié par le rapport des indices. Comme ce dernier est supérieur à un (l'indice de la gaine est inférieur à celui de l'âme), aucun rayon lumineux n'est transmis lorsque le rayon incident est assez rasant (*en rouge*). Un rayon lumineux qui arrive sur l'interface avec un angle assez grand (*en jaune*), en revanche, traverse la gaine et sort de la fibre.

IMPULSION D'ENTRÉE

IMPULSION DE SORTIE

IMPULSION D'ENTRÉE

IMPULSION DE SORTIE

IMPULSION D'ENTRÉE

IMPULSION DE SORTIE

LES FIBRES MULTIMODES À GRADIENT D'INDICE ont une âme dont l'indice de réfraction diminue progressivement du centre vers la gaine. Les rayons qui dévient légèrement de l'axe ne zigzaguent pas : ils se courbent seulement. En outre, ce gradient d'indice impose aussi une vitesse de la lumière supérieure vers la gaine qu'au centre de l'âme. La lumière propagée par réflexions multiples met donc presque autant de temps pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur que celle qui se propage en ligne droite. Les impulsions sont ainsi moins dispersées. Ces fibres sont utilisées pour les réseaux locaux.

LES FIBRES MONOMODES ont une âme très fine (moins de huit micromètres de diamètre) et la différence d'indice entre l'âme et la gaine est plus faible que dans les fibres multimodes. La lumière se propage parallèlement à l'axe : les impulsions se dispersent peu. Les réseaux téléphoniques et la télévision par câble utilisent ce type de fibres.

sary ross

ÂME

GAINE

PROTECTION

John MacChesney, Laboratoires Bell.

Entomologie

Biologie des coléoptères chrysomélides

Pierre Jolivet. Éditions Boubée, 1997.

Les coléoptères chrysomélides ? Vous connaissez ces insectes dont le type le plus connu est le doryphore de la pomme de terre. Celui-ci n'est pas un rare représentant d'une petite famille, puisque, en France, il partage son caractère destructeur des cultures avec les criocères sur les asperges, les altises sur de nombreuses plantes potagères ou industrielles, les cassides sur les betteraves ou les artichauts, etc. Au total, la famille compte plus de 40 000 espèces dans le monde.

Si l'immense majorité des chrysomélides se nourrit de plantes, certaines espèces ont des régimes et des comportements étonnants. Au Brésil, *Aristobrotica angulicollis* est entomophage et attaque un autre coléoptère, *Epicauta aterrima*. Les cucurbitacées attirent les deux insectes, mais la promiscuité du chrysomélide provoque chez *Epicauta* une réaction d'immobilisation réflexe, qui le fait tomber au sol, où il est rejoint et dévoré. D'autres espèces sont étroitement associées aux fourmis : ce sont des « symphytes ». Ainsi, en Afrique de l'Ouest, *Hockingia curiosa* et *Isnus petasus* vivent dans les épines à base dilatée des acacias que fréquentent les fourmis *Crematogaster*.

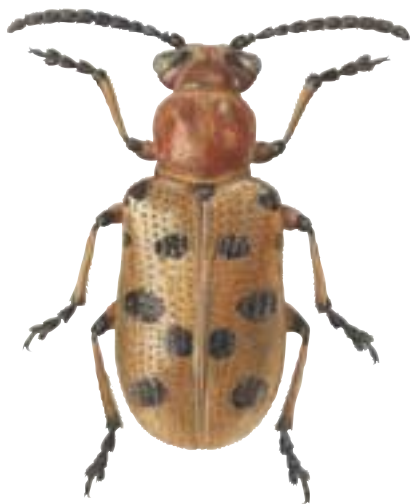


Jacques C. Aquari

Un criocère de l'asperge : *Crioceris asparagi*.

L'éthologie des chrysomélides réserve également des surprises. Beaucoup d'entre eux utilisent leurs excréments pour protéger leurs œufs ou leurs larves : c'est le cas des clytrines, dont les coques fécales ressemblent à des graines végétales, ou bien des cassides Sud-américains, qui utilisent leurs déjections pour construire des oothèques compartimentées, avec un œuf par case. La protection des œufs prend parfois une forme plus active : la ponte est alors conservée sous les élytres, et des soins maternels peuvent s'exercer jusqu'aux larves, engendrant ainsi une subsocialité.

À rapprocher de ce comportement, la cycloaxie est une forme évoluée de grégarisme : il s'agit d'une protection en cercle, qui rappelle le réflexe de défense des bœufs musqués ; ici les larves se groupent de sorte qu'une partie se réunit, au centre, les autres indi-

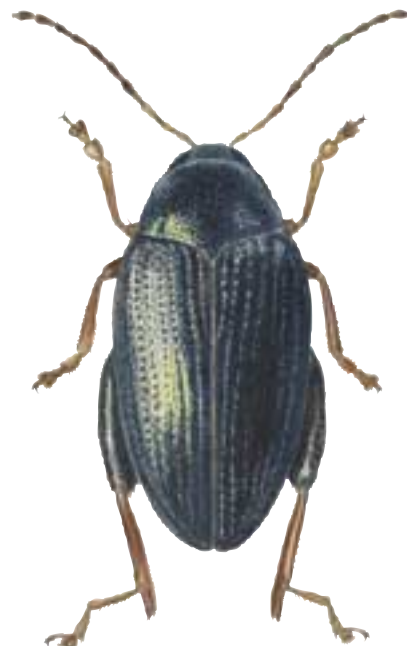


Crioceris 12-punctata, un chrysomélide nuisible.

vidus formant un anneau où têtes ou extrémités abdominales sont juxtaposées, à la périphérie. L'ensemble présente des mouvements coordonnés de défense, avec attitude menaçante, émission de sang, régurgitation, morsure...

Une autre faculté connue chez ces insectes est l'auto-hémorrhée, ou saignée réflexe. C'est la réaction caractéristique du crache-sang, *Timarcha*, qui rejette de l'hémolymphe par les articulations des pattes et la bouche. Ce phénomène est largement répandu, surtout chez les adultes. Enfin quelques espèces produisent des substances toxiques ou répugnatoires, de sorte que certaines altises d'Afrique du Sud sont utilisées comme poison de flèches par les Boshimans du Kalahari.

Si la reproduction est classique chez un grand nombre de chrysomélides, on a observé quelques cas de viviparité, comme chez les *Platyphora* des environs



La grosse altise du colza.

de São Paulo : les femelles fécondées donnent directement naissance à des larves, qu'elles laissent tomber une à une sur les feuilles.

L'habitat enfin : les chrysomélides se sont adaptés à tous les milieux, même extrêmes. Tout un groupe, celui des Donaciinés, est aquatique, passant sa vie dans l'eau jusqu'à l'état larvaire, et, parfois même, jusqu'à l'état adulte. Les larves trouvent souvent l'air nécessaire à leur respiration dans les tissus aëri-fères des plantes.

Certains genres, comme *Timarcha*, semblent préadaptés à la vie subdésertique : ils n'ont pas d'ailes, portent des élytres soudés ainsi qu'une vaste cavité sous-élytrale qui, par son hermétisme, réduit la transpiration et permet à l'abdomen de se gonfler et de stocker eau, nourriture ou œufs.

Les hautes montagnes ne rebutent pas ces insectes étonnants : en Équateur, *Elytrophraera nivalis* s'élève jusqu'à 4 200 mètres ; en Chine, *Oreomela* atteint 4 850 mètres, et *Chrysolina zanayana* 5 020 mètres ! L'Arctique recèle quelques représentants acclimatés aux conditions thermiques extrêmes. La viviparité ou l'évolution rapide des œufs et des larves sont des adaptations à ces conditions qui imposent des arrêts de développement ; elle est accrue par une résistance au froid stupéfiante : des larves de *Chrysolina subsulcata* sont encore actives à -3 °C, et l'accouplement s'effectue dès 0 °C.

La riche biologie des chrysomélides est loin d'être suffisamment explorée, et ce livre, (où manque, en bibliographie,

Biologie

L'origine des espèces aujourd'hui. L'espèce existe-t-elle? L'impasse ponctualiste.

M. Delsol, J.-P. Parent, R. Mouterde, C. Ruget, J.-M. Exbrayat, P. Sentis, avec la collaboration de L. Boudchiche et J.-P. Nicollin. Éditions Boubee et Association A.A.A., 1995.

Huit noms figurent en page de titre et en couverture de l'ouvrage, qui n'est cependant ni un recueil d'articles ni à proprement parler un livre collectif. Michel Delsol a réalisé un livre d'auteur, adossé à un travail collectif ou, plus exactement, une concertation collective. Il développe un argument qui lui est propre, appuyé sur une masse considérable de données, dont beaucoup sont empruntées à la littérature disponible et dont certaines ont résulté de demandes adressées aux cosignataires de l'ouvrage ; dans certains cas (données paléontologiques inédites), l'ouvrage incorpore des notes transmises par certains des cosignataires (J.-P. Parent, R. Mouterde, C. Ruget). Le travail rappelle celui de Darwin, qui savait, dans sa correspondance, mettre au travail les collègues sur un matériel empirique pertinent et mobiliser ainsi une recherche qu'un seul ne pouvait mener à bien.

Le triple titre de l'ouvrage doit être pris au sérieux. *L'origine des espèces aujourd'hui*, titre principal, ne peut manquer d'évoquer Darwin. Le livre est un plaidoyer radical en faveur de la conception darwinienne originelle de l'espèce, mais avec des arguments et des faits d'aujourd'hui. Les deux sous-titres explicitent les deux cibles de l'ouvrage. *L'impasse ponctualiste* fait référence à la «théorie des équilibres ponctués» de N. Eldredge et S.-J. Gould (1972) : l'ouvrage entier peut être lu comme une critique systématique de cette théorie. L'autre sous-titre, *L'espèce existe-t-elle?*, vise la théorie synthétique de l'Évolution ou, plus exactement, le concept flou de l'espèce que les synthétistes ont trop souvent entretenu, en raison de leurs dissensions internes. Ce qui fait l'intérêt de ce livre, c'est justement qu'il soit écrit par le plus ardent des défenseurs de la théorie synthétique de l'évolution, au moins en langue française.

M. Delsol est un gradualiste intégral. C'est cette position forte qui lui permet de mener l'offensive à la fois contre la

la mention du *Traité d'entomologie appliquée à l'agriculture*, par A.S. Balachowsky, auquel le tome 2 consacre plus de 300 pages aux chrysomélides, dont 100 pages sur le doryphore par P. Grierson!) est une bonne mise au point pour tous ceux qui seront tentés de multiplier les observations sur ce groupe.

Jacques d'AGUILAR

Environnement

Îles, vivre entre ciel et mer

Sous la direction de Jean-Denis Vigne. Éditions du Muséum national d'histoire naturelle/Nathan, 1997.

Les jours d'intense pollution urbaine ou de stress professionnel, on se prend à rêver de l'île, sanctuaire d'une nature belle et généreuse. Partir, découvrir, renaître. C'est un fantasme exotique et l'utopie d'une société différente, d'un monde à inventer. Les écrivains et les naturalistes voyageurs ont forgé une culture de l'îlénité et la conscience écologique de mondes curieux et fragiles.

Si la naissance des îles est presque toujours liée à la tectonique des plaques, qu'elles soient détachées d'un continent ou surgies des eaux, les moyens de peuplement sont variés et nombreux : passifs (vents, courants, radeaux de fortune) ou actifs (vol, nage). Les aventures migratoires des espèces végétales ou animales ne sont pas sans péril, et il est vraisemblable que les échecs ont été plus nombreux que les réussites.

Force est de constater combien les communautés insulaires sont particulières et étranges. Les espèces endémiques, qui peuvent en donner d'autres par «radiation adaptative», résultent de bien surprenantes modifications par rapport aux espèces pionnières. Avec l'aide de l'ornithologue John Gould, Charles Darwin a compris que les pinsons des Galápagos étaient, non les variétés d'une seule espèce, mais 13 espèces différentes, issues d'un ancêtre commun. La face du monde en a été changée, puisque la mutabilité des espèces et le concept évolutionniste sont devenus des paradigmes. Avec leurs becs de longueurs, épaisseurs et formes différentes, les pinsons ont diversifié leur régime alimentaire, évitant ainsi une concurrence meurtrière sur un territoire restreint.

L'homme, lui, n'arrive pas par hasard sur une île : son histoire maritime commence avec le cabotage, à la recherche de ressources halieutiques, et se poursuit par la conquête de nouveaux territoires, avec des embarcations perfectionnées et des cartes marines. Comme pour les peuplements végétaux et animaux, les sociétés humaines n'échappent pas aux particularismes insulaires. Vivre sur une île, c'est accepter des relations sociales qui se croisent et se heurtent : «On est tous cousins sur une île» ; c'est à la fois de l'entraide et de l'étouffement, des rivalités, des haines et un fort sentiment d'appartenance au lieu.

Enfin l'anthropisation est à l'origine d'effets dévastateurs sur les écosystèmes insulaires. Après une nécessaire prise de conscience de la diminution de la biodiversité, les îles ne sont plus, uniquement, des réserves, mais elles deviennent des lieux d'innovation et des modèles de développement durable, idée clef de la Conférence de Rio de Janeiro, en 1992.

Superbement mis en page, ce livre collectif, dont les chapitres sont rédigés par les meilleurs spécialistes, propose un texte riche d'enseignements et des illustrations de qualité. Bien que l'ouvrage ne soit pas un catalogue, il faut le relier à la remarquable exposition qui se tient à la Galerie de l'évolution du Jardin des plantes jusqu'au 5 janvier 1998.

Michèle FEBVRE



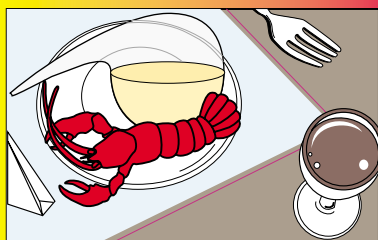
Maïao, une île de la Société.

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 23 septembre 1997.

FRANCE

info



Les cichlidés ont connu récemment une explosion de spéciation : plus de 500 espèces vivent dans plusieurs grands lacs africains. Cette évolution reste d'interprétation difficile.

théorie des équilibres ponctués et contre les conceptions de l'espèce de certains synthétistes (en particulier T. Dobzhansky).

La théorie des équilibres ponctués affirme qu'une fois formées, les espèces changent peu : le changement se produit essentiellement lors d'événements de spéciation, rapides à l'échelle géologique. Ou, pour dire les choses de manière plus technique : l'anagenèse, c'est-à-dire l'évolution à l'intérieur des lignées («évolution phylétique») est de faible ampleur, l'essentiel du changement évolutif se produit lors des épisodes de cladogenèse (divergence de lignées). Pour le ponctualiste, l'évolution des espèces fait donc alterner des «stases» (longues périodes d'équilibre) et des «crises» (épisodes de spéciation par cladogenèse et d'extinction).

Contre le ponctualisme, M. Delsol invoque trois grandes classes d'arguments. Premièrement la documentation paléontologique est dramatiquement dépourvue de moyens pour établir les discontinuités postulées par la théorie ponctualiste. Cette difficulté est bien connue : S'il se produit effectivement des changements rapides lors d'un événement de spéciation, les traces du changement seront extrêmement difficiles à trouver dans l'archive fossile. L'auteur estime que les cas proposés par les ponctualistes ne sont pas convaincants, ne reposent que sur des preuves indirectes et ne sont guère que des reconstructions spéculatives.

Deuxièmement, il existe des cas bien documentés d'anagenèse dans les séries fossiles. Outre les travaux de P.-D. Gingerich sur les mammifères, d'importantes données peuvent être trouvées dans des travaux stratigraphiques récents, par exemple sur les ammonites (J.-L. Dommegues) et sur les foraminifères (C. Ruget). De tels travaux fournissent des preuves directes en faveur du gradualisme. Toutefois l'auteur reconnaît que de tels faits ne suffisent pas à établir de

manière statistique que l'évolution biologique a été principalement graduelle.

Enfin la dernière grande classe d'arguments a trait à la cladogenèse et s'appuie sur des données qui n'appartiennent pas à la paléontologie (domaine d'élection de la théorie des équilibres ponctués), mais à la zoologie. M. Delsol s'efforce de montrer que rien ne corrobore la vision de la cladogenèse (divergence de lignées) comme événement rapide. Cet argument est dirigé à la fois contre la théorie des équilibres ponctués et contre les synthétistes qui, comme T. Dobzhansky, déclarent que «la spéciation au sens strict (c'est-à-dire le développement de l'isolement reproductif) est une crise qui se déroule avec une relative rapidité». En s'appuyant sur une documentation et des schémas impressionnants, M. Delsol montre à quel point les représentations classiques de la divergence dans la théorie synthétique (du genre : une large avenue qui se sépare en deux autres) sont simplificateurs.

En particulier, il fait valoir l'ampleur des phénomènes d'hybridation entre espèces. Même si les données sont souvent obtenues en laboratoire, ces phénomènes lui paraissent suffisants pour mettre en doute la représentation de la divergence des espèces comme une «crise relativement rapide» à l'échelle des temps géologiques. Il faut donc être gradualiste aussi à l'échelle de la cladogenèse, et l'être sans doute beaucoup plus que les synthétistes ne l'ont jamais été. La divergence des lignages est un phénomène lent et souvent réversible.

L'ensemble de ces arguments, plus quelques autres dans le détail desquels nous n'entrerons pas (en particulier, une critique de la notion de «stase évolutive»), conduit les cosignataires de l'ouvrage à contester la représentation commune de l'espèce dans la biologie évolutive contemporaine. D'un point de vue horizontal (ou synchronique), M. Del-

sol estime que le critère d'interstérilité devrait être réservé au niveau taxonomique du genre. Au niveau de ce que les biologistes nomment espèce, l'isolement reproductif est une affaire de degré. D'un point de vue vertical, l'anagenèse ou évolution phylétique est dûment établie par les paléontologues dans certains cas, et probable dans la majorité des cas. Par conséquent, que l'on regarde l'évolution de manière horizontale (point de vue comparatif du zoologiste) ou de manière verticale (perspective du paléontologue), la conclusion s'impose qu'«il n'y a pas d'espèces en soi» ; les réalités que les biologistes appellent de ce nom offrent le spectacle d'un changement lent, graduel et indéfiniment continué.

Interrogé, M. Delsol se reconnaît volontiers comme nominaliste sur la question de l'espèce, et il se réclame à juste titre de Darwin, dont on peut ici rappeler la célèbre formule : «En bref, nous devons traiter les espèces de la même manière que les naturalistes traitent les genres, lorsqu'ils admettent que ce sont simplement des combinaisons artificielles, inventées par commodité... Nous serons au moins libérés de la vaine recherche de l'essence inconnue et inconnaisable du terme espèce.» En outre, toujours comme Darwin, M. Delsol est «gradualiste» en un sens méthodologique plus radical que ne le veut le sens usuel de ce terme dans la littérature évolutionniste contemporaine. Partout dans l'évolution il voit à l'œuvre le principe de continuité, le principe de la variation en degré. À la suite de G.G. Simpson, il admet que tous les intermédiaires sont possibles entre des scénarios d'évolution lente et des scénarios d'évolution rapide et discontinue. Les ponctualistes peuvent donc bien avoir raison dans certains cas, mais M. Delsol estime que les preuves disponibles plaident en faveur de la plus grande généralité du second scénario.

Voici donc un livre provocateur, dans l'état actuel du débat évolutionniste. Réquisitoire intraitable contre la théorie des équilibres ponctués – au nom des faits –, critique ouverte de la représentation commune de l'espèce comme une «entité» (les espèces ne sont pas des entités, mais des processus), ce livre est aussi un plaidoyer en faveur des méthodes zoologiques en évolution. L'auteur est conscient qu'il ne met pas fin au débat qui oppose les ponctualistes aux gradualistes : pour cela, il faudrait procéder à une évaluation statistique que, faute de données directes suffisantes, nul naturaliste ne peut aujourd'hui proposer. Toutefois loin des débats à la mode, et au plus près des faits, ce praticien, philosophe à ses heures, développe un argument qui donne à réfléchir.

Jean GAYON

Biologie

L'évolution a-t-elle un sens ?

Michael Denton, Fayard, Paris, 1997, 540 p., 220 francs.

Michael Denton, biochimiste en Nouvelle-Zélande, est connu pour *L'évolution, une théorie en crise*, qui fit la joie des créationnistes et de l'extrême droite religieuse, et la consternation des biologistes. On ne savait si les erreurs qui servaient d'arguments relevaient de l'incompétence ou de la falsification. Une préface malencontreuse d'un regretté académicien de toute autre spécialité acheva la confusion.

Ici, les choses sont claires : dès la préface, M. Denton annonce un essai de théologie naturelle dans la tradition de Paley et des traités de Bridgewater – il ne s'agit donc pas de science ! On remarquera que l'ouvrage a été publié grâce à Jean Staune, journaliste au *Figaro Magazine* et animateur d'une association anti-évolutionniste masquée en «Université européenne».

Du niveau des galaxies à celui du cerveau humain, en passant par la terre, l'eau, la chimie, l'ADN, l'évolution «dirigée», l'auteur constate l'«évidence» que le monde est parfait, unique, biocentré, anthropocentré, qu'il n'aurait pu être autrement et que cela est incontournable, même s'il ne peut pas plus le prouver que ses prédécesseurs. La bibliographie historique est souvent intéressante : les citations se rencontrent peu dans les «bibles darwiniennes», et elles y sont parfois fautives.

Des interprétations de l'auteur sont divertissantes, comme la proposition selon laquelle les 95 pour cent non codants de l'ADN d'une espèce programmeraient le devenir de ses descendantes. Ou bien l'affirmation que «Pour qu'il y ait évolution dirigée, [comme l'auteur en est convaincu], il faut que le dogme central [de la biologie moléculaire selon lequel l'information va seulement des gènes vers l'organisme, et pas l'inverse] soit intangible- il faut que règne le déterminisme génétique !». M. Denton retrouve ainsi le «Tout génétique» de l'extrême-droite anglo-saxonne, en stockant la volonté divine dans l'ADN.

Biologistes avertis ou historiens des sciences s'amuseront peut-être du parfum dix-huitième de ce galimatias ennuyeux et anti-scientifique, mais on peut craindre qu'un public débutant s'y

égare. Les Éditions Fayard feraient mieux de traduire les nombreux textes pertinents sur l'évolution qui n'existent pas en français...

André LANGANEY

Chimie

Sir Christopher Ingold, a Major Prophet in Organic Chemistry

K.T. Leffek. Éditions Nova Lion Press, 1996.

Lorsqu'on a sous les yeux la formule d'un produit chimique, sa structure peut nous apparaître simple (la molécule d'hydrogène semble simple au vu de sa formule H_2), un peu compliquée (H_2O pour l'eau), plus compliquée (pour l'aspirine) ou extrêmement compliquée, comme pour le docitaxel, qui constitue, sous le nom de *Taxotère*, un des médicaments anticancéreux les plus prometteurs ; mais, dans tous les cas, ces molécules dont les formules sont des représentations nous apparaissent comme constituées

PUBLICATION JUDICIAIRE

Contrairement à ce qui est indiqué dans l'ouvrage de Félix KLEIN, *Leçon sur certaines questions de géométrie élémentaire* et de R. FEYNMAN *Le Mouvement des planètes autour du soleil* publiés par DIDEROT MULTIMEDIA - DIDEROT EITEUR ARTS ET SCIENCES dans la collection Jardin des Sciences, Monsieur LEVY-LEBLOND n'est pas directeur de collection chez DIDEROT MULTIMEDIA - DIDEROT EITEUR et ne porte aucune responsabilité dans leur publication.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-46-34-21-42
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : M. Debaine-Francfort, Bettina Debü, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Anne Masé, Patrick Michel, Claude Olivier, Philippe Pallu de la Barrière, Guy Paulus, Pierre Pfeiffer, Myriam Sibuet, Jean-Paul Squifflet.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, 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, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.
Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B et en pages 28 à 31 un encart publicitaire CEP.

d'atomes liés. Avant même de connaître la nature exacte des liaisons chimiques, les chimistes avaient compris que la formation et la rupture de ces liaisons étaient responsables des transformations chimiques. Ils s'étaient préoccupés de comprendre ces mécanismes de réaction, afin de comprendre les transformations elles-mêmes, de les prévoir et de les maîtriser.

Ce qui est remarquable, en chimie organique, c'est que ce genre de préoccupations a commencé dans la dernière partie du siècle dernier, alors que les chimistes ignoraient tout de la nature des liaisons chimiques. Les choses sérieuses ont commencé en 1916, quand le chimiste américain Gilbert Newton Lewis a proposé la théorie électronique de la liaison (l'électron avait été mis en évidence en 1897). Cette théorie qui stipule que les liaisons chimiques sont assurées par des électrons reste fondamentalement opérationnelle : la liaison la plus fréquente, dans les composés du carbone, est la liaison covalente, qui résulte de la mise en commun de deux électrons associés en un doublet.

Partant de la théorie de Lewis et l'appliquant concrètement aux problèmes de la chimie organique, Robert Robinson (1886-1975), puis Christopher Kelk Ingold (1893-1970) élaborèrent ce qui allait devenir la théorie électronique des mécanismes réactionnels en chimie organique, théorie qui est, dans ses fondements, toujours opérationnelle et qui constitue l'une des plus belles aventures de la chimie de ce siècle.

C'est une biographie de l'un des deux, Ingold, que nous présente, au terme d'une carrière universitaire au Canada, un de ses anciens élèves : K.T. Leffek. Près de 40 ans après la mort d'Ingold, l'auteur reste visiblement sous le charme de son ancien patron. D'où un exposé attrayant et chaleureux de la vie quotidienne et familiale d'Ingold, et un exposé clair (le nombre de formules chimiques est limité) des résultats importants obtenus par Ingold et ses collaborateurs. Le fonctionnement de la communauté chimique britannique de l'époque est bien décrit, notamment grâce à de nombreux entretiens que l'auteur a eus avec d'anciens collaborateurs et collègues d'Ingold. Enfin, cette biographie, détaillée, est agréablement illustrée et pourvue d'un appareil critique excellent, sans être lourd.

Une rivalité scientifique entre Ingold et Robinson se transforma rapidement, chez Robinson, en animosité personnelle ; essayons de résumer la saga scientifique. Robinson s'est intéressé très tôt à la chimie des produits naturels, qui allait le conduire au prix Nobel de chimie, en 1947. Dès 1916, il s'intéresse aux mécanismes des réactions et propose, en 1922, ses

premières interprétations électroniques, fondées sur la théorie de Lewis, mais il continue de s'intéresser aux produits naturels. En 1925, Ingold publie le premier d'une longue série d'articles où il propose également une interprétation électronique des mécanismes de réaction, mais en remettant en cause les résultats et les interprétations de Robinson.

S'ensuit la polémique qui occupe la presse chimique anglaise jusqu'en 1926. Finalement, Robinson quitte le champ des mécanismes réactionnels, après avoir présenté ses conceptions au Conseil Solvay de chimie, à Bruxelles, en 1931, et dans deux articles qu'il publie, très curieusement, dans des périodiques chimiques à faible diffusion. Il se concentre alors sur la chimie des produits naturels, tandis qu'Ingold continue de plus belle ses travaux et devient bientôt le maître incontesté des mécanismes réactionnels électroniques.

Même si Robinson a pour lui l'antériorité des idées de base, Ingold a le grand mérite d'avoir formalisé les concepts et le vocabulaire, édifié un ensemble cohérent et fait accepter sa théorie, notamment grâce à de nombreux articles de revue et par des livres qui ont fait date. À la différence de Robinson, il s'est intéressé à l'utilisation de la mécanique quantique en chimie : on peut sans doute dater de 1933 le début de la chimie organique théorique, puisque, cette année-là, le concept de «mésomérie», qu'Ingold avait élaboré, fut interprété par Linus Pauling sous le nom de «résonance», par des calculs de physique quantique : les électrons de liaison étant répartis entre plusieurs atomes de carbone («délocalisés»), la structure d'une molécule telle que le benzène ne peut pas être représentée par une seule formule classique ; la structure exacte est intermédiaire entre les différentes formules classiques (les «formes limites») qu'il est possible d'écrire pour la molécule.

Jusqu'à la fin de sa vie, Robinson ne cessa d'affirmer sa priorité et accusa Ingold de lui avoir volé ses idées. Il publia même son ressentiment dans un chapitre de ses *Memoirs of a Minor Prophet*, en 1976, d'où le clin d'œil de K.T. Leffek dans le choix du titre de sa biographie de Ingold. Nombreux sont ceux qui pensèrent que Robinson ne permit pas à Ingold de recevoir le prix Nobel, mais, comme l'écrit K.T. Leffek, Robinson se contenta plus probablement de ne pas promouvoir la candidature de son adversaire, ce qui fut suffisant.

K.T. Leffek conclut le très bon chapitre consacré au duel de ces deux géants en rappelant que le mérite, en science, revient à celui qui a su convaincre, non à celui qui a eu l'idée en premier...

Georges BRAM