

■ POUR LA

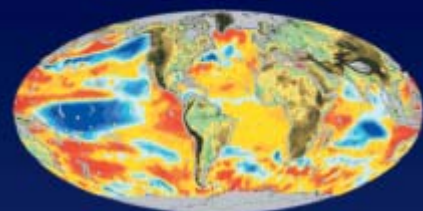
SCIENCE

Août 2001

Édition française de Scientific American

PÉTRA la cité de l'encens

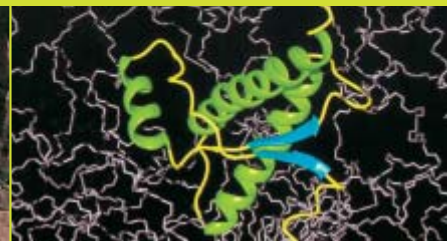
Les caprices des marées



Les plus vieilles étoiles



Les maladies à prions



Canada : \$ 8,95 / Belgique : 285FB / Suisse : 11,20FS

M 2687 - 286 - 39,00 F



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

2



SCIENCE ET ÉCONOMIE

Coûteux snobismes

par Ivar Ekeland

3

TRIBUNE DES LECTEURS

4

SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le secret du pain

par Hervé This

5



POINT DE VUE

Grave laxisme universitaire

par Jean-Pierre Kahane

7

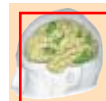


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La volcanologie au XVIII^e siècle

par Kenneth Taylor

8



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

12

■ Prise de conscience ■ Homme et machine face aux Dames ■ Billes liquides ■ Le compteur des abeilles

■ Prélude aux éruptions ■ Un scribe moléculaire ■ Des réseaux de neurones auto-organisés ■ Bouillants noyaux ■ Des planètes aux orbites chaotiques ■ L'arche de Noé des vertébrés



LOGIQUE ET CALCUL

Les premiers carrés tétra et pentamagiques

par Christian Boyer

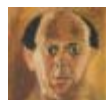
98

ÉNIGMATH

Oracle, ô des espoirs!

par Dennis Shasha

103



ART ET SCIENCE

Mathématiques dodécaphoniques

par Carlota Simoes

104



IDÉES DE PHYSIQUE

Chevaucher les ondes

par Roland Lehoucq, Jean-Michel Courty

106



ANALYSES DE LIVRES

■ L'Univers chiffonné, de Jean-Pierre Luminet

■ Enfant et raisonnement : le développement

108

cognitif de l'enfant, de Robert Siegler ■ Chercher. Jours après jours, les aventuriers du savoir, Sous la direction de Jean-François Sabouret et Paul Caro ■ Kala-azar, chroniques indiennes d'une épidémie, de Robert Desowitz ■ Pour une archéologie du geste, de Sophie A. de Beaune ■

2 encarts d'abonnement entre les pages 16 et 18, encart broché service lecteurs et carte d'abonnement entre les pages 96 et 97.

DOSSIER

Grâce aux données recueillies par les marégraphes et par les satellites, les marées, qui ne sont pas périodiques, sont désormais modélisées avec précision.

Les caprices des marées

24

par Bernard Simon

L'origine de l'élévation du niveau des océans

33

par Ch. Genthon, C. Ritz et Ch. Vincent

Pétra, une capitale aux confins du désert

34

par Robert Wenning

Longtemps tenus pour d'insignifiants imitateurs des Grecs, les Nabatéens ont fondé une civilisation arabe originale et prospère grâce au commerce de l'encens.



Le vol des insectes

42

par Michael Dickinson

Le vol stationnaire des insectes résulte d'une combinaison d'effets aérodynamiques élucidés par un modèle utilisant les lois de la similitude.

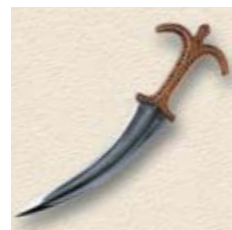


Le mystère des épées de Damas

48

par John Verhoeven

Le secret de l'acier de Damas, perdu au XIX^e siècle, semble avoir été retrouvé grâce à diverses expériences récentes de métallurgie.



L'âge des plus anciennes étoiles

60

par Brian Chaboyer

Les plus anciennes étoiles de la galaxie semblaient plus âgées que l'Univers. Ce paradoxe est enfin levé grâce aux données fournies par le satellite *Hipparcos* et aux progrès de la physique stellaire.

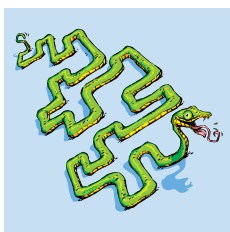


Les chemins aléatoires

68

par Wendelin Werner

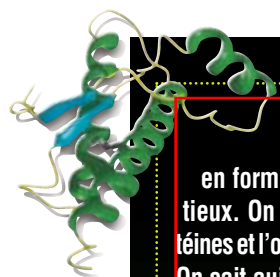
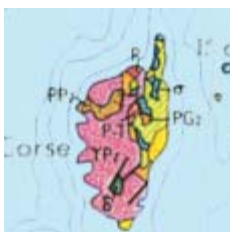
Physiciens et mathématiciens progressent conjointement dans l'étude des courbes planes qui cheminent de façon hasardeuse. Une conjecture de Benoît Mandelbrot a été élucidée.

**L'autonomie (géologique) de la Corse**

76

par Maurice Mattauer

D'origine espagnole, la Corse a été française et continentale. Elle a également subi des influences italiennes. Actuellement, elle se rapproche lentement du continent européen.

**DOSSIER**

Les protéines PrP synthétisées naturellement par les organismes vivants se transforment en formes pathogènes en présence de prions infectieux. On a élucidé la forme de plusieurs de ces protéines et l'on mesure à quel point certaines se ressemblent. On sait aujourd'hui les produire dans des cultures cellulaires et l'on améliore les tests de détection.

D'un prion à l'autre

80

par Ralph Zahn

L'énigme des prions

86

par Manfred Eigen

Des cellules productrices de prions

92

par Didier Vilette

L'amplification des prions par PMCA

93

par Claudio Soto



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

www.pourlascience.com

D'où vient l'inspiration?

Observez les films des premiers essais d'«aérostation». Les pionniers moustachus de l'aéronautique balbutiante battaient frénétiquement les ailes de leur machine volante. Las, quand ils les abaissaient, ils avaient tendance à s'élever, mais quand ils les soulevaient, lors de la seconde partie du mouvement, la machine retombait, des causes opposées produisant des effets inverses. Au total, le résultat était à peu près nul, à quelques sauts de puce près. Les oiseaux ont levé ce paradoxe : ils tournent différemment leurs ailes lors des mouvements ascendants et descendants, ce qui leur permet de briser la fatale symétrie et d'engendrer une force de portance. Le vol stationnaire des insectes (voir pages 42 à 47) est particulièrement intéressant : l'Évolution, pragmatique, a tiré parti d'effets que l'on ne sait expliquer qu'aujourd'hui.

Une question ne semble intéresser personne : faudrait-il, pour progresser techniquement, étudier, puis imiter la nature?

Ou écouter ses collègues, comme l'illustre la genèse des nouveaux carrés tétramagiques et pentamagiques. Les lecteurs de *Pour la Science* connaissent les carrés magiques de n cases de côté, où les sommes des lignes, des colonnes et des diagonales sont toutes égales. Il existe aussi des carrés bimagiques où les sommes, non seulement des nombres, mais aussi de leurs carrés, sont égales dans les directions mentionnées et n'est-ce pas étonnant, des carrés trimagiques (les différentes sommes des cubes sont aussi égales) découverts par le général Eutrope Cazalas dans les années 1930.

Yves Roussel, pour promouvoir les mathématiques, désirait faire une affiche d'un carré trimagique. Christian Boyer eut la charge de vérifier les propriétés de ce carré. La tâche accomplie, il interrogea un professeur de mathématiques, André Viricel, pour connaître un meilleur moyen informatique de vérifier et de calculer les carrés magiques. Après quelques discussions théoriques et tâtonnements informatiques, Christian Boyer passa du stade de néophyte à celui de spécialiste, puis à celui d'inventeur. Les carrés tétramagiques ont ainsi été découverts et, pendant que l'article sur ces carrés tétramagiques était édité, il a fabriqué les carrés pentamagiques, juste à temps pour modifier l'article et le titre (voir pages 98 à 102).

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Les poubelles de l'histoire

La critique rend compte d'un ouvrage historique portant sur une période connue : «il offre beaucoup de nouveau». S'agit-il d'un compliment? Résolument oui!

A priori, l'idée qu'on pourrait se faire d'un ouvrage d'histoire réussi, c'est qu'il n'y ait dedans rien de nouveau et qu'il ne contienne que du vieux garanti strictement authentique. En fait, ce que nous voulons, là comme partout, c'est du nouveau. Plus encore, peut-être, que l'éventuelle mise à jour d'éléments inconnus, nous attendons que son regard soit le nôtre, c'est-à-dire surtout pas celui de nos maîtres de la génération précédente! Maîtres aimés et respectés, nul n'en doute, mais par rapport auxquels nous tenons à nous affirmer. Pourquoi diable irions-nous nous intéresser à quelque époque révolue, sinon pour l'interpréter à notre façon? On ne voit le passé qu'avec des yeux présents. L'anachronisme est une condition *sine qua non* de l'histoire. Et il en est un grand plaisir.



Les intimidations dangereuses

En matière de débat d'idées, il existe une arme absolue et d'usage facile. Votre adversaire affirme-t-il quelque position qui vous déplaît? Prenez un air soucieux et déclarez gravement : «C'est très dangereux, ce que vous soutenez là». Vous êtes sûr de marquer le point. En effet :

1. Personne ne veut apparaître comme celui dont l'attitude risque de causer du mal.

2. Toute position est grosse de dangers. Il suffit de la pousser à l'extrême, phénomène qui finit toujours par se produire (c'est une leçon constante de l'histoire). On massacre au nom de l'amour universel ; l'attachement à la patrie dégénère en nationalisme meurtrier ; le culte exclusif de la raison conduit à un sectarisme



irrational ; la méfiance vis-à-vis des institutions connaît des dérives sanglantes, etc.

Donc, pour river son clou à un adversaire, outre imperceptiblement sa position, juste assez pour mettre en évidence les dangers qu'elle recèle nécessairement. Montrez-vous alors choqué par eux, affecté. Et vous voilà dans le rôle de l'humaniste, lui dans le rôle du fauteur de troubles : la victoire est pour vous.

Evidemment, cette arme infailible tend à tuer tout débat. Mais que voulez-vous? Les armes aussi sont dangereuses.

Libertaires et gaspilleurs

Depuis 1791 et la Déclaration des droits de l'homme, nous revendiquons des droits toujours plus variés : droit à la différence, au logement, au savoir, à la santé, etc. Un jour, nous réclamerons le droit au droit.

Pourtant, il existe un droit que personne ne perçoit comme tel, donc que personne ne revendique : gaspiller. Au contraire, chacun s'accorde à condamner le gaspillage. Quel contresens! Gaspiller fait partie des droits fondamentaux. Car il n'y a pas d'alternative.



Soit vivre dans une misère sur laquelle plane sans cesse la menace de la famine, soit pouvoir se permettre de gaspiller de temps en temps. Loin d'être un crime contre l'écologie, gaspiller est le premier acte de liberté pour se prouver qu'on n'est pas réduit aux besoins immédiats de la survie quotidienne, pour montrer et se montrer qu'on n'est pas uniquement déterminé par la brutalité des contraintes.

Certes, il est choquant que certains gaspillent plus que d'autres. Il faut réclamer un droit au gaspillage égal pour tous.

Pro-camusards et sartroux

L'accusation revient comme une ritournelle : «Où sont les Sartre? Où sont les Camus? Nous n'avons plus de grands écrivains, plus de grands penseurs.» Si vous tentez d'objecter que tout n'est peut-être pas si sombre, on a beau jeu de vous clouer le bec : "Ah? Citez-moi donc un grand nom."

Le fait est : personne, actuellement, ne règne en maître. Mais pour en déduire qu'aucune œuvre majeure n'est en cours, jugement radical, il faudrait lire tous les auteurs, ceux qui ont déjà une audience comme ceux qui n'en ont pas. Alors, et seulement alors, on serait en droit



de dire, éventuellement, que ce n'est que justice si nul ne tient le rôle du génie immortel.

Rien de tel, bien entendu. On ne peut pas tout lire. Le verdict de décadence est porté par des gens qui ne connaissent pas l'ensemble de la production dont ils affirment la médiocrité. Du coup, passent à la trappe des questions intéressantes. L'hégémonie de ceux qui la partageaient était-elle justifiée? Était-elle aussi nette qu'elle paraît l'avoir été? Y a-t-il aujourd'hui des auteurs méconnus qui mériteraient qu'on se batte pour eux? Ceux qui ne parviennent pas à une position dominante échouent-ils par manque de valeur, par manque de chance, ou parce que notre époque, plus sensible aux influences en réseau, est moins sensible aux fortes personnalités?

Déplore la faiblesse actuelle de la création, c'est prendre la banale constatation d'un phénomène social manifeste pour un jugement étayé sur le fond. C'est légitimer le suivisme en tant qu'idéal intellectuel.



Coûteux snobismes

IVAR EKELAND

De minimes différences d'appréciation et le suivisme de snobs, riches mais incompetents, augmentent beaucoup le prix des tableaux.

Combien cela vaut-il ? Il n'est pas de question plus ancienne, ni plus difficile et toute théorie économique se doit d'inclure une théorie de la valeur. Nous nous contentons de références plus vagues, car quelque part dans notre conscience flotte une notion de juste prix. Sans savoir bien justifier nos appréciations, nous nous indignons que des présentateurs de télévision ou des joueurs de football gagnent autant d'argent, et, parallèlement, nous nous émerveillons des prix atteints par des tableaux de maître.

Pourquoi cela ? Le phénomène étant moderne, les économistes classiques ne donnent pas de réponse satisfaisante : du temps d'Adam Smith ou de Karl Marx, il n'y a pas de télévision, les sportifs sont des amateurs, le marché de l'art est réduit et les chanteurs ne se produisent pas dans des stades, mais dans des cabarets.

Parmi les économistes contemporains, Sherwin Rosen, le premier à se pencher sur la question en 1981, analyse le prix des «superstars», Zidane, Madonna ou les deux Michael, Jordan et Jackson. Sa réponse est simple : ils valent ce qu'ils rapportent. À mesure que le sport s'industrialise et que les sportifs deviennent des professionnels, les enjeux financiers augmentent, et il devient essentiel que l'équipe gagne. Foin de la glorieuse incertitude du sport ! Si l'équipe perd, adieu sponsors, supporters et recettes (assistance aux matchs, droits de publicité et de retransmission, droits annexes, liés par exemple à l'utilisation du nom). Dans cette optique, un joueur susceptible de faire la différence et de transformer un match nul en victoire n'a pas de prix – ou plutôt si, il en a un : il vaut exactement ce qu'il rapporte, et un match gagné, si c'est une finale de Coupe d'Europe ou de la NBA, rapporte gros.

Pour être dans cette catégorie, que les Italiens appellent les *fuoriclasse*, point n'est besoin d'être deux ou trois fois meilleur que les autres – il suffit de l'être un peu. Ces considérations expliquent deux phénomènes qui se sont développés ces dernières années : d'une part, la course aux salaires, et aujourd'hui l'es-

sentiel des revenus des clubs va aux joueurs ; d'autre part, le fait que la grille des salaires soit très différenciée, concentrant sur quelques individus des sommes énormes, beaucoup plus importantes que ne le justifierait l'écart de qualité avec des joueurs moins bien lotis.

Pour les chanteurs, présentateurs et autres artistes de variété, la même analyse s'applique : chacun vaut ce qu'il rapporte. Si deux chanteurs sont en concurrence et si chaque acheteur n'achète qu'un seul disque, le meilleur chanteur ramasse toutes les mises, même s'il n'est qu'un tout petit peu meilleur que l'autre. Si deux émissions passent à la même heure, le présentateur le plus populaire rafle tout l'auditoire, même s'il n'est que légèrement préféré à son rival.

Bien sûr, cette analyse laisse à désirer : d'une part, les goûts peuvent différer et tout le monde ne classe pas les chanteurs ou les présentateurs dans le même ordre ; d'autre part, rares sont ceux assez sûrs de leur goût pour ne pas préférer suivre les goûts d'autrui. Les ventes de disques pop ou le succès des émissions de variétés sont aussi des phénomènes de mode, et il faudrait savoir les analyser comme tels.

C'est ce que font Gary Becker et Ken Murphy dans leur livre *Social Economics* (Harvard University Press), à propos des toiles de maître. Ils prennent l'exemple des Van Gogh et des Monet, et se demandent comment les uns peuvent valoir deux fois plus cher que les autres, alors que nul ne prétend que Van Gogh est deux fois meilleur que Monet. Ils construisent leur réponse en imaginant que la population des acheteurs potentiels soit divisée en deux catégories : d'une part les amateurs, qui font l'opinion, d'autre part les suiveurs, riches désirant placer leur argent et/ou montrer qu'ils ont du goût.

Pour simplifier l'analyse, nous supposons qu'il y a autant d'amateurs que de suiveurs, autant de Van Gogh que de Monet et autant de tableaux que d'acheteurs potentiels.

Le point important est que, du strict point de vue artistique, les uns et les autres n'accordent qu'une légère préférence aux Van Gogh sur les Monet. Cette préférence est toutefois un peu plus marquée chez les amateurs, et ce sont donc eux qui paieront la différence et achèteront les Van Gogh. Mais les suiveurs à la préférence personnelle moins marquée pour Van Gogh ont un travers qui va enclencher un mécanisme diabolique : ils voudraient bien se faire passer pour des amateurs, et donc veulent aussi détenir des Van Gogh. Le prix qu'ils sont prêts à payer pour des Van Gogh est fonction du nombre d'amateurs qui en détiennent.

Si les amateurs se répartissaient également entre les deux peintres, signifiant par là leur indifférence, les suiveurs seraient livrés à leurs propres préférences et il s'établirait, entre les Van Gogh et les Monet, un prix de marché reflétant les goûts artistiques des uns et des autres. Mais comme les amateurs n'achètent que des Van Gogh, la détention d'une œuvre du peintre maudit devient le signe d'appartenance à une catégorie sociale supérieure, et le prix que les suiveurs sont prêts à déboursier pour en faire partie devient alors exorbitant, reflétant toute autre chose que de simples goûts artistiques.

C'est bien ce qui se passe. Tous les Van Gogh sont achetés par les amateurs, ce qui les rend éminemment désirables aux yeux des suiveurs et fait monter leur cours à des hauteurs vertigineuses. Mais comme entre les Monet et les Van Gogh la différence est faible, le prix des Van Gogh tire le prix des Monet vers les mêmes sommets. Au final, tous les Van Gogh sont entre les mains des amateurs, qui les paient des prix exorbitants pour les mettre hors de portée des suiveurs, et tous les Monet sont entre les mains des suiveurs, qui les paient des sommes astronomiques parce qu'ils ne sont pas tellement moins bons que des Van Gogh. Si tous les suiveurs devenaient des amateurs, le prix des uns et des autres retomberait à des niveaux plus raisonnables. Le snobisme coûte cher.

TRIBUNE DES LECTEURS

La mer et le salé

Dans *La catastrophe du Bosphore* (voir *Pour la Science*, juin 2001), Gilles Lericolais invoque un influx réduit d'eau douce dans la mer Noire dû aux glaciations pour expliquer la fermeture de celle-ci à certains moments de son histoire. Toutefois, la découverte de la mer Noire comme lac d'eau douce pose problème dans ce contexte. Pourquoi, une fois séparée de la Méditerranée, la mer Noire aurait-elle vu sa salinité baisser? Comment le sel s'évacuait-il? Peut-être ne s'est-il pas évacué, mais seulement dilué dans un plus grand volume d'eau. Cependant, la variation de volume d'eau de la mer Noire est faible, car le niveau est limité par la hauteur du Bosphore. De plus, dans cette hypothèse, les conditions lacustres auraient prévalu en surface et pas en profondeur. À long terme, les fleuves d'eau douce amènent des minéraux et augmentent le contenu en sel. Il faut donc penser à un mécanisme de drainage du sel de la mer Noire soit ponctuellement lors de sa séparation de la Méditerranée, soit peut-être en permanence par écoulement dans une Méditerranée fermée de l'Atlantique, dont le niveau aurait baissé par évaporation.

Reinhold BRUECKNER, Orléans

Réponse de Gilles Lericolais

Les études de la sédimentation montrent que la mer Noire a connu l'eau douce à plusieurs reprises au cours du Quaternaire (depuis 2, 5 millions d'années) et que ces périodes alternent avec des conditions saumâtres équivalentes à celle que nous connaissons aujourd'hui (salinité de 18 pour mille, moitié moins qu'un océan). Comment expliquer cet état de faits? Et pourquoi la mer Noire, la mer Caspienne et la mer d'Aral n'ont-elles pas les mêmes conditions de salinité? Pour cela, il faut remonter à plus de 200 millions d'années. Au début du Jurassique, sur l'emplacement de la chaîne alpine, existait un vaste océan (la Téthys) s'ouvrant vers le Pacifique. La mer Noire est un bassin formé lors d'une subduction vers le Nord de la Téthys qui sera comblé par d'épaisses séries sédimentaires atteignant 15 kilomètres d'épaisseur. Ensuite, jusqu'à la fin du Secondaire, l'océan téthysien se ferme sous l'action de la collision entre les plaques arabe et eurasiennne donnant naissance à une suite de bassins sédimentaires d'axe Est-Ouest s'étendant de l'Autriche-Hongrie à l'Asie centrale, isolant ainsi au Crétacé supérieur (96 à 65 millions d'années) la mer Paratéthys. Au Tertiaire, cette mer regroupant la mer Noire et la mer Caspienne s'isole de l'océan; l'apport des fleuves en eau douce préserve de l'évaporation ce vaste ensemble et en dimi-

nue la salinité. Les grandes variations glaciaires, jouant sur la calotte de l'hémisphère Nord et qui débutent dès la fin du Pliocène (vers 3,2 millions d'années), affectent une grande partie de l'Europe et de l'Ouest sibérien. Au gré des cycles glaciaires/interglaciaires, la sédimentation de la mer Noire est alternativement lacustre et marine (selon que le Bosphore permet ou non les échanges avec la Méditerranée et l'océan global). En effet, la mer Noire est le réceptacle des plus grands fleuves d'Europe, qui lors des périodes glaciaires sont alimentés par de nombreux fleuves supplémentaires, coulant actuellement vers le Nord (Elbe, Vistule...), le cours de ces fleuves étant dévié par la calotte glaciaire descendant jusqu'aux rives de la Pologne. La mer Noire reçoit une importante quantité d'eau douce lors des périodes glaciaires et au moment de la fonte. Cet apport diminue à partir du moment où la calotte glaciaire libère les mers du Nord, Baltique, Blanche et de Kara. Donc au cours des périodes froides, le niveau des mers et des océans baisse, isolant notamment la mer Noire; celle-ci est alimentée par de nombreux cours d'eau lui apportant un flux d'eau douce important. Les périodes froides ont toujours été plus longues que les périodes chaudes, et les périodes de fonte produisent énormément d'eau douce. On comprend très bien que depuis trois millions d'années le bilan soit en faveur de l'eau douce. Nous sommes actuellement en période chaude, la mer Noire est connectée à la Méditerranée et, pourtant, la salinité de la mer Noire n'est que de 18 pour mille (elle est saumâtre!). Dès la reconnexion, un jeu de densités se produit également, les eaux salées plus lourdes tombent au fond et l'eau douce initiale de la mer Noire se retrouve en surface.

Oubli du plan incliné belge

Dans l'article *La poussée d'Archimède* de Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty (voir *Pour la Science*, juin 2001), les auteurs indiquent, dans la légende de la deuxième figure, que le «plan incliné» de Saint-Louis-Arzviller, en Lorraine, est unique en son genre en Europe. Cette affirmation doit être nuancée. Le plan incliné de Ronquières, en Belgique (sur le canal Charleroi - Bruxelles), fonctionne sur le même principe depuis plusieurs dizaines d'années. Il est même plus important que son voisin de Lorraine. La différence de niveau est de 68 mètres contre 44. Les bateaux transportés peuvent peser 1 350 tonnes contre 900. Ce plan incliné a une particularité: le contrepoids est constitué par un second bac, si bien qu'il est possible de faire, en même temps, monter et descendre des bateaux.

Paul GOUVERNEUR,
Mont-Saint-Guibert (Belgique)

Fin d'une Lune de miel?

C'est avec intérêt que j'ai lu *Les libérations de la Lune* de Eric Bois (voir *Pour la Science*, juillet 2001). Cet article laisse toutefois quelques questions sans réponse: est-ce que la Lune s'éloigne de la Terre depuis la création du couple Terre-Lune? L'accélération de la Lune est-elle constante (quand la lune était plus proche, l'effet était-il plus important)? L'énergie nécessaire à l'accélération de la Lune est-elle prise sur l'énergie de rotation de la Terre et, en conséquence, la Terre tourne-t-elle de moins en moins vite?

Louis WILMES,
Weiler-la-Tour (Luxembourg)

Réponse de Eric Bois

Le mécanisme d'accélération séculaire de la Lune s'effectue à énergie totale constante du système Terre-Lune. La rotation synchrone de la Lune fut très probablement atteinte progressivement à cause des forces de friction développées par les marées, mais elle n'est pas nécessaire pour la mise en place du mécanisme en question. En revanche, il est nécessaire qu'il y ait des forces de marées exercées par la Lune sur la Terre, de telle sorte qu'il se forme un bulbe à l'équateur terrestre en avance sur la direction Terre-Lune. Un bulbe situé exactement selon la direction Terre-Lune ne provoque aucun effet séculaire. C'est l'angle entre la direction du bulbe et la direction Terre-Lune qui est le paramètre décisif dans l'intensité du mécanisme.

En conséquence directe de ce mécanisme lié aux marées, il se produit un ralentissement séculaire de la rotation de la Terre sur elle-même. Toutefois, à force d'éloignement de la Lune, il arrivera une distance Terre-Lune critique où l'action du Soleil viendra «contrarier» le mécanisme d'accélération séculaire de la Lune. D'un autre côté, en extrapolant ce mécanisme et son corollaire sur la rotation terrestre, toutes choses étant égales par ailleurs, on est conduit à imaginer un moment où, à force de ralentissement de la rotation de la Terre, la durée du jour terrestre deviendrait égale à la durée du mois lunaire. La Terre tournant sur elle-même dans la même période de temps que la Lune autour de la Terre, il ne pourrait donc plus y avoir d'avance du bulbe et par conséquent d'éloignement séculaire de la Lune.

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



Le secret du pain

HERVE THIS

Les chimistes déterminent, à fin d'améliorations, les liaisons entre les protéines qui forment le réseau de notre bonne vieille pâte à pain.

Les constituants de la farine de blé sont les clefs du succès du pain : à côté des grains d'amidon, qui gonflent quand ils sont chauffés en présence d'eau, des protéines forment, lors du pétrissage, un réseau nommé gluten. Pour améliorer le pain, il est intéressant d'étudier les associations de ces protéines. Comment les forces entre les protéines contribuent-elles aux propriétés mécaniques de la pâte à pain ? On savait que des liaisons entre des atomes de soufre portés par des protéines contribuent à la structuration du gluten ; on a découvert que d'autres forces y participent aussi.

La qualité d'un pain dépend de celle du gluten, d'où la nécessaire maîtrise de la réticulation des protéines, c'est-à-dire de l'établissement de liaisons entre ces molécules. Le gluten est un réseau « viscoélastique » : étiré, il s'allonge, puis reprend partiellement sa forme initiale quand on supprime la tension. La panification n'est possible que grâce au gluten : quand les levures dégagent des bulles de dioxyde de carbone, le volume de la pâte augmente et le réseau de protéines du gluten préserve la forme en boule de la pâte en retenant les bulles de gaz.

En 1745 déjà, le chimiste italien Jacopo Beccari a montré que l'on extrait le gluten en malaxant de la farine avec un peu d'eau, puis en passant le pâton formé sous un filet d'eau ; l'eau entraîne les grains blancs de l'amidon, laissant le gluten entre les doigts. Les chimistes ont montré que seules certaines protéines insolubles du blé contribuent au réseau du gluten : les prolamines.

Ces prolamines sont de deux types : les gliadines, qui ne sont composées que d'une seule chaîne protéique (un enchaînement d'acides aminés) et les gluténines, qui sont de gros édifices composés de plusieurs sous-unités protéiques liées par des ponts disulfure (entre deux atomes de soufre). Ces ponts disulfure relient-ils aussi les gluténines entre elles ? Selon une conception classique, le pétris-

sage établit des ponts disulfure supplémentaires entre les diverses prolamines, ponts qui se rompent et se reforment à mesure que le boulanger travaille la pâte.

Les gluténines ont une partie centrale (entre 440 et 680 acides aminés) formée de courtes séquences répétées, flanquées de deux domaines terminaux. La taille du domaine central détermine la masse moléculaire des gluténines ; les domaines terminaux contiennent des cystéines, acides aminés qui portent les atomes de soufre susceptibles de former les ponts disulfure. Toutefois les caractéristiques chimiques des gluténines n'expliquaient pas bien leurs capacités à faire le gluten.

Il y a quatre ans, l'équipe de Jacques Guéguen, à l'INRA de Nantes, avait montré que les prolamines pouvaient se lier par des « liaisons dityrosine » (la tyrosine est un acide aminé dont la chaîne latérale est composée d'un groupe CH_2 , d'un noyau benzénique et d'un groupe hydroxyle $-\text{OH}$). Sur la base de ces travaux, Katherine Tilley et ses collègues de l'Université du Kansas ont récemment démontré l'importance des liaisons dityrosine dans le gluten. Dans des pâtes à pain, à divers stades du pétrissage, ils ont extrait, dissocié et analysé par voie chimique le gluten de la farine pétrie, et ont trouvé que les concentrations en dityrosine augmentent lors du pétrissage. La question était posée : quel rôle jouait la dityrosine dans la structuration du gluten ?

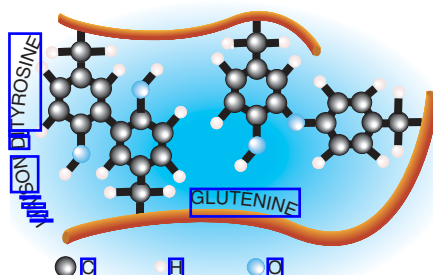
Une analyse approfondie a montré l'existence de deux types de liaisons dityrosine : dans la dityrosine, les deux groupes benzéniques sont liés par le carbone voisin du groupe hydroxyle $-\text{OH}$;

dans l'isodityrosine, un atome d'oxygène d'un groupe hydroxyle d'une tyrosine se lie au carbone voisin du groupe hydroxyle sur l'autre tyrosine.

La découverte agite la communauté des chimistes du gluten. Pour les biochimistes, ces liaisons dityrosine sont communes entre les protéines végétales, dont les séquences et les structures ressemblent à celles des gluténines ; ils connaissent aussi l'existence de ces liaisons dans les protéines, nommées résiline, des insectes et des arthropodes, et dans l'élastine et le collagène des vertébrés. Ainsi le boulanger reproduit-il le vivant en formant des liaisons dityrosine lors du pétrissage.

D'autre part, l'équipe de Nantes a observé que les liaisons dityrosine s'établissent en présence d'enzymes (péroxydases) naturellement présentes dans la farine. Le long travail de la pâte, lors de la confection du pain, a-t-il pour rôle de faire réagir les enzymes avec les gluténines et à leur donner le temps d'établir les liaisons dityrosine ? Quelles sont les parts respectives des dityrosines et des ponts disulfures dans la structuration du gluten ?

A quoi sert la détermination de ces liaisons ? À perfectionner les additifs, employés soit pour faciliter le pétrissage soit, au contraire, pour intensifier la formation du gluten : quand des composés oxydants tels l'acide ascorbique ou le bromate de potassium sont ajoutés aux pâtes à pain, le nombre de liaisons dityrosines formées augmente ; on pensait que ces additifs favorisaient la formation des ponts disulfure, mais peut-être forment-ils aussi des liaisons dityrosine. On imagine ainsi des méthodes de sélection des blés à gluten : suffirait-il de doser les dityrosines pour estimer la valeur des glutes ?



Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 25 juillet, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Grave laxisme universitaire

JEAN-PIERRE KAHANE

La trahison de l'esprit des textes universitaires a amené un scandale.

Pour la Science a déjà évoqué la soutenance de thèse d'Elisabeth Teissier sur l'astrologie, et l'atmosphère de scandale qui l'avait entourée. Je m'en tiendrai à un aspect de ce scandale, la responsabilité des universités en matière de sanction des travaux scientifiques.

Dans la tradition française, le doctorat était le grade le plus élevé décerné par la Faculté. La réglementation des thèses est précise. En lettres, cette réglementation a été fixée par un règlement du 17 juillet 1840 qui prévoit l'examen préalable, le visa et la soutenance publique.

En sciences, une circulaire du 8 mai 1880 explicite les modalités de constitution du jury et la responsabilité de ses membres avant l'autorisation de soutenance : « Ils donnent, chacun par écrit, leur approbation ou leur désapprobation et en sont responsables ; ils signent en commun un rapport d'ensemble, où ils indiquent la valeur de la thèse et font ressortir les faits nouveaux qui la rendent originale. »

L'introduction de l'*Habilitation à diriger des recherches*, en septembre 1988, et la réduction du temps considéré comme nécessaire à l'acquisition d'une thèse de doctorat, n'ont pas modifié l'exigence de grande qualité qu'exprimait déjà la circulaire de 1880. En face du nombre croissant des thèses et du risque de laisser passer des thèses médiocres, des départements ou des universités ont pris l'initiative de créer des « Commissions des thèses » et de rendre plus transparent et plus rigoureux le fonctionnement des instances universitaires et des jurys.

Il y a toujours risque de dérapage : complaisance, malveillance, incompétence ou désintérêt. Il est remarquable que les abus soient rares. Une déontologie non formalisée fait de la délivrance du grade de docteur un événement grave, qui engage l'Université dans son ensemble, le jury et chacun de ses membres. Le rôle de la soutenance publique est de placer non seulement le candidat, mais le jury, et par son intermédiaire l'Univer-

sité elle-même, sous le contrôle du public. C'est à la fois un élément de rigueur et de démocratie qui devrait être maintenu à tout prix (notons que le décret de juillet 1984 permettant qu'une partie d'une thèse soit couverte par le secret et que la soutenance ne porte que sur l'autre partie constitue une entorse sérieuse à la tradition universitaire). Comme il est rare qu'il y ait scandale, il convient de saisir en quoi il consiste et quelles sont les leçons à tirer.

Dans le cas présent, le scandale n'est pas dans l'étude de l'astrologie comme fait de société. Il tient, d'une part, aux intentions affichées par l'auteur et, d'autre part, à la désinvolture de l'Université et du jury. Précisons.

Une thèse de sociologie sur l'astrologie, la fascination qu'elle exerce, le rejet qu'elle suscite, serait bienvenue. Mais ce n'était pas le propos d'Elisabeth Teissier. L'intention était de donner un statut scientifique à l'astrologie et d'aboutir à la création d'enseignements universitaires d'astrologie. Ce but est affirmé dans d'autres écrits, mais la revendication du statut scientifique a été explicite au cours de la soutenance, et se trouvait en filigrane dans le titre de la thèse : « Situation épistémologique de l'astrologie à travers l'ambivalence fascination/rejet dans les sciences post-modernes ». Au seul vu du titre de la thèse, la vigilance s'imposait.

En sciences sociales, plus encore qu'ailleurs, n'est-il pas indispensable de mesurer l'impact social des travaux présentés, et ne convient-il pas de mettre en œuvre l'interdisciplinarité lorsque des sciences physiques et leur interprétation sont en jeu ? Il y eut manquement sous ces deux aspects. Malgré des interventions nombreuses et répétées, l'Université René Descartes ne s'est pas démarquée des prétentions d'une candidate portée par les médias. La consultation d'astronomes et d'astrophysiciens s'imposait : l'Université les ignora. Il y a donc eu vice de fonctionnement de la machine universitaire.

L'Université René Descartes, comme toute université, est astreinte à des règles qui sont aussi des garde-fous. D'abord, l'inscription au doctorat n'est pas automatique : elle passe par l'avis du directeur de thèse et une proposition de l'école doctorale concernée ou du conseil scientifique, et elle est prononcée par le président de l'université. Ensuite, la publicité du travail de thèse doit être assurée, avant la soutenance, par la large diffusion d'un résumé. Enfin, depuis 1998, les universités ont adopté une charte de thèses, qui engage à la fois l'université et le candidat, et que doivent signer le doctorant et le directeur de thèse au moment de l'inscription. Selon la charte type (que les universités ont eu la faculté de moduler), « la préparation d'une thèse doit s'inscrire dans le cadre d'un projet personnel et professionnel clairement défini dans ses buts comme dans ses exigences... ; le candidat doit recevoir une information sur les débouchés académiques et extra-académiques dans son domaine... ».

Ainsi Elisabeth Teissier devait faire état de son projet : introduire à la Sorbonne un enseignement d'astrologie. Et l'Université devait lui dire quelles portes lui seraient ouvertes ou fermées, en particulier si elle envisageait que soit créée en France une chaire d'astrologie subventionnée par mécénat, comme c'est le cas, malheureusement, aux États-Unis. Si ces règles n'ont pas été respectées, ou interprétées de façon laxiste, il y a plus que vice de forme, mais vice de fond. L'hypothèse du manque de vigilance paraît comme la plus indulgente. L'autre hypothèse serait la connivence.

L'Université René Descartes porte la responsabilité du scandale, mais toutes les universités sont concernées. Leur rôle dans la nation est en jeu. Le scandale aura été bénéfique s'il est l'occasion de prévenir de semblables errements.

Jean-Pierre KAHANE, est président de l'Union rationaliste, et ancien président de l'Université Paris-Sud.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

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

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



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

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



La volcanologie au XVIII^e siècle

KENNETH TAYLOR

À l'aube de la géologie, William Hamilton et Nicolas Desmarest ont étudié le Vésuve. Un manuscrit ancien récemment découvert éclaire leurs divergences scientifiques.

William Hamilton est plus connu pour sa carrière diplomatique et pour le scandale que provoqua la liaison de sa femme avec l'amiral Nelson (le vainqueur de Bonaparte à la bataille d'Aboukir en 1798, au début de la campagne d'Égypte) que pour son œuvre scientifique. Après avoir servi dans l'armée, il arrive à Naples en 1764, comme ambassadeur du roi d'Angleterre à la cour du royaume des Deux-Siciles, position qu'il occupe jusqu'en 1800. Il se consacre à ses deux passions : sa collection d'objets d'art, en particulier de vases grecs, et l'étude du Vésuve, qu'il observe à la lunette de son pavillon et dont il parcourt les flancs en prenant des notes (il en aurait fait l'ascension des dizaines de fois). Ses observations accompagnées de plusieurs caisses d'échantillons, qu'il envoie à la Société royale de Londres, lui valent de devenir membre de cette institution.

Les travaux de Hamilton sur le Vésuve et sur l'Etna, en Sicile, sont largement diffusés dès la fin du XVIII^e siècle. Ils sont d'abord publiés sous forme de lettres, dans les *Transactions philosophiques* de la Société royale de Londres, puis réédités plusieurs fois. Notamment, en 1776, paraît un ouvrage intitulé *Campi Phlegraei* (*Les champs Phlégréens*, c'est-à-dire la région à l'Ouest de Naples). Les quelque 50 gravures en couleurs, qui reproduisent les peintures d'un artiste dont Hamilton se faisait accompagner sur les flancs du Vésuve, complètent le texte, rédigé à la fois en anglais et en français. Pour qui ne s'est jamais rendu dans la région de Naples, ces gravures sont les premières à donner une idée des phénomènes volcaniques italiens.

À travers l'enthousiasme de Hamilton pour ces phénomènes, on apprend qu'il était convaincu de l'origine volcanique de tous les terrains

de la région. Selon lui, les éruptions, arrivées à des périodes diverses et très éloignées les unes des autres, avaient façonné le paysage et, à ce titre, elles devaient être considérées comme créatrices plutôt que destructrices.

LE RÔLE DES FEUX SOUTERRAINS

D'une façon générale, Hamilton pense que «les feux souterrains ont plus contribué à la formation des montagnes, des îles et même des espaces de terre très considérables, qu'on ne l'avait pensé jusqu'à présent» et que «plus on observera, plus on trouvera que les volcans ont été abondants dans toutes les parties du monde, beaucoup plus qu'on ne l'avait imaginé». Cependant, il se méfie de «ceux qui veulent que toute montagne ait été formée par l'explosion des feux souterrains».

En étudiant la région de Naples, Hamilton s'est aperçu qu'un volcan n'est pas une montagne où un feu souterrain s'est allumé, contrairement à ce que la plupart de ses contemporains avançaient,

mais que le feu est lui-même responsable de l'existence de la montagne : «Si je devais établir un système, ce serait que les montagnes sont produites par les volcans, et non les volcans par les montagnes.» Son voyage en Sicile le conforte dans cette opinion : «D'après les observations exactes que j'ai faites sur le Mont Etna, le Vésuve et ses environs, j'ose dire que la plupart des montagnes qui sont ou ont été des volcans, doivent sans doute leur existence à des feux souterrains, quoique cette assertion soit directement opposée à l'opinion reçue sur ce point.»

Hamilton critique Buffon, qui situe le foyer d'un volcan dans la montagne elle-même, soit en altitude. Lui-même pense que le foyer est beaucoup plus profond, puisque les forces qui en émanent peuvent soulever non seulement les montagnes, mais aussi les plaines. L'Etna, le Vésuve et probablement de nombreux autres volcans résultent d'une accumulation d'éruptions : ces volcans sont constitués d'un ensemble de monticules, comme ceux qui parsèment les flancs du Vésuve, dont Hamilton a observé la formation, ou comme le Monte Nuovo (situé près de Pouzzoles, à une dizaine de kilomètres à l'Ouest de Naples), qui s'est formé en l'espace de 48 heures, en 1538, d'après les récits historiques étudiés par Hamilton.

Le Vésuve (qui culmine aujourd'hui à 1 277 mètres) et l'Etna (haut de 3 323 mètres) résultent de longues périodes de vulcanisation. Toutefois, l'Etna est plus ancien, puisqu'il a eu le temps de grossir davantage. Hamilton distingue les cratères récents de ceux qui sont plus âgés, plus dégradés, et pense que la transformation des laves en terres fertiles dure plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires.



Selon Hamilton, les champs Phlégréens sont la meilleure région au monde pour étudier les volcans. Il s'étendent à l'Ouest de Naples et comprennent de nombreux lacs et cratères.

Dans son ouvrage, il insiste sur la simplicité et l'exactitude de ses observations. Il déclare également avoir évité le piège des «systèmes» (les théories que les scientifiques élaborent pour expliquer la formation du monde), qui donnent souvent lieu à des interprétations abusives. Il essaie, autant que possible, de mesurer et de quantifier ce qu'il observe, se déclare partisan de l'étude chimique des laves et des pierres volcaniques. Fier de ses observations, il les présente aussi bien sous la forme de récits que de peintures, qu'il s'attache à faire exécuter «sous ses propres yeux» et dont il donne une description détaillée dans les *Campi Phlegraei*.

Enfin, il considère que la région de Naples est le meilleur endroit au monde pour étudier les phénomènes volcaniques : «Le royaume des Deux-Siciles offre à cet égard le champ le plus intéressant qui soit dans l'Univers. C'est là qu'on voit des volcans existant dans toute leur force, quelques-uns sur leur déclin et d'autres totalement éteints.»

UN MANUSCRIT ANONYME

Aujourd'hui, Hamilton fait figure d'avant-gardiste : bon nombre de ses idées sont plus proches des connaissances actuelles en volcanologie que celles de ses contemporains. Comment la communauté scientifique de l'époque y réagit-elle ? À la fin du XVIII^e siècle, on voit fleurir les théories les plus variées en géologie, et les avis sont partagés : certes, Hamilton est membre de la Société royale de Londres, mais il est aussi critiqué, comme le révèle un manuscrit anonyme et non daté, intitulé *Plusieurs notes et réflexions isolées sur l'ouvrage de M. Hamilton*, que j'ai découvert à la bibliothèque de Rouen (le catalogue des manuscrits n'en dit rien).

Le manuscrit fait partie de la collection Coquebert de Montbret, du nom du bibliophile qui l'a rassemblée, au XVIII^e et au XIX^e siècles. Il se trouve dans une chemise qui porte la mention *Lettres écrites d'Italie par William Hamilton (1776 et années suivantes)*, contenant une copie d'une grande partie du texte des *Campi Phlegraei*, faite par un copiste professionnel. Le manuscrit comporte 12 pages ; il diffère du reste du contenu de la chemise par le format du papier et l'écriture, mais semble de la même époque. Son titre indique qu'il est lui-même une copie, mais il ressemble plutôt à un brouillon : de nombreux mots ont été rayés pour améliorer l'expression. L'auteur semble critiquer l'édition originale des *Campi Phlegraei*, celle de 1776, qu'il considère comme nouvelle. Il répond aux observations et aux idées de Hamilton comme



Hamilton observe l'accroissement du sommet du Vésuve, représenté sur cette gravure entre le 8 juillet et le 29 octobre 1767. Il se convainc que la formation du volcan résulte d'une accumulation de monticules.



Pour Hamilton, le Vésuve est un « bon géant », contrairement à l'opinion commune, qui ne voit dans le volcan que quelque chose de monstrueux et de maléfique : du point de vue le plus élevé de la région, il observe que les terres de la Campanie sont parmi les plus fertiles d'Italie.

si celui-ci était un contemporain, peut-être même un rival. On en déduit que le manuscrit date à peu près de l'époque de la publication des *Campi Phlegraei*. Enfin, les notes du manuscrit semblent mal organisées et le manuscrit lui-même paraît incomplet. Les remarques qui le constituent concernent les gravures de l'ouvrage de Hamilton, mais se terminent sans résumé, ni conclusion.

Qui est l'auteur du manuscrit de Rouen ? Probablement Nicolas Desmarest, l'un des apôtres de la volcanologie du XVIII^e siècle. Desmarest commence ses recherches en volcanologie en 1763, en Auvergne, où il étudie les colonnes de basalte : il est le premier à reconnaître leur origine volcanique. Cette découverte motive son élection à l'Académie des sciences, en 1771, et apparaît dans l'*Encyclopédie* de Diderot, avec deux gravure montrant les prismes de basalte des environs de Saint Sandoux et de La-Tour-d'Auvergne.

En 1765 et 1766, Desmarest fait un long voyage en Italie en compagnie du duc de La Rochefoucauld d'Enville, au cours duquel il compare les phénomènes auvergnats et italiens et s'estime satisfait de la cohérence de tout ce qu'il a vu. Au mois de décembre 1765, il se rend à Naples, où il est invité chez Hamilton. Les deux hommes ne semblent pas avoir entretenu de contact prolongé.

Desmarest adhère à la doctrine du volcanisme alors en vogue : il ne croit pas que ce soit un phénomène général dans l'histoire de la Terre. Comme bon nombre d'autres géologues du XVIII^e siècle, il présume que le volcanisme est superficiel, éphémère du point de vue géologique, et résulte d'embrasements ou de fermentations dans la partie extérieure du Globe. Il pencherait plutôt pour une doctrine neptuniste, reléguant le volcanisme au second rang par rapport au travail incessant de l'eau.

LES COLONNES DE BASALTE AUVERGNATES

Toutes les apparences concourent à identifier Desmarest comme l'auteur du manuscrit de Rouen. La comparaison du manuscrit avec des rapports de séances de l'Académie des sciences, écrits et signés par Desmarest de 1776 à 1778 (l'époque approximative à laquelle le manuscrit de Rouen a été rédigé) confirme qu'il s'agit bien de la même écriture. Cependant, le manuscrit est présenté comme une copie. Dès lors, on pourrait imaginer que ces notes sont de la main de Desmarest, mais qu'il n'en est pas l'auteur. En fait, les idées exprimées dans le manuscrit correspondent à celles qu'il a publiées de 1771 à la fin de sa vie, en 1815.

Dans son étude des basaltes, publiée dans les *Mémoires de l'Académie royale des sciences* de 1771 et de 1773, Desmarest expose ses idées en volcanologie : les feux souterrains altèrent les matériaux primitifs, tels le granite ou le calcaire, mais la variété des produits volcaniques prouve que ces matériaux ne sont pas générés par le volcan. Parmi eux, on trouve très souvent le quartz, matière réfractaire aux feux souterrains. Par ailleurs, le basalte présente des cristaux qui ont résisté aux feux souterrains : il n'est pas vitrifié, ce qui prouve que le foyer des volcans n'est pas extrêmement chaud. Enfin, Desmarest pense que le Vésuve existait déjà avant que les feux volcaniques ne ravagent la région, et qu'il s'est formé comme d'autres montagnes non volcaniques, tels les Apennins italiens. Ainsi, les idées de Desmarest s'opposent à celles de Hamilton.

Plus intéressant encore, dans les volumes de la *Géographie physique* qu'il rédige dans les années 1790 pour la collection de l'*Encyclopédie méthodique*, Desmarest aborde précisément les points traités par Hamilton : son opinion correspond parfaitement aux idées exprimées

dans le manuscrit de Rouen. Par exemple, contrairement à Hamilton, il ne croit pas que tous les lacs des environs de Pouzzoles soient des cratères d'anciens volcans, ni que tous les volcans se soient formés comme le Monte Nuovo. De plus, Desmarest emploie souvent un ton critique et désapprouvateur vis-à-vis des travaux de ses contemporains, la plupart du temps sans les nommer, comme dans le manuscrit de Rouen. Enfin, selon lui, l'endroit le plus favorable au monde pour étudier les phénomènes volcaniques n'est pas la région de Naples, mais l'Auvergne.

La découverte du manuscrit de Rouen montre que Hamilton et Desmarest ont étudié les mêmes phénomènes volcaniques en Campanie, mais qu'ils les ont interprétés différemment. Hamilton, à travers ses nombreuses années de recherches sur les terrains volcaniques italiens, fait preuve d'une perspicacité remarquable. Desmarest, qui connaît moins les volcans actifs que les volcans éteints, est moins enclin à contester les idées communément admises à son époque en volcanologie. Au XVIII^e siècle, à l'aube de la géologie, l'imagination des scientifiques les conduisait aux théories les plus variées. Ce sont leurs désaccords qui ont façonné la volcanologie moderne.

Kenneth TAYLOR est professeur d'histoire des sciences à l'Université d'Oklahoma.

Kenneth TAYLOR, *Un commentaire inédit sur les observations et les idées de William Hamilton relatives aux phénomènes volcaniques de la région de Naples, Traux du comité français d'histoire de la géologie*, 3^e série, tome 15 (à paraître).

Carlo KNIGHT, *Les fureurs du Vésuve*, Découverte Gallimard Albums, 1992.

François ELLENBERGER, *Histoire de la géologie*, Technique et documentation (Lavoisier), 1994, tome II, pp. 233 à 245.

Prise de conscience

Les perceptions inconsciente et consciente d'un mot activent différemment certaines aires du cerveau.

Les images subliminales et les his-
toires qui ont cours à leur propos
en sont la preuve : nous percevons
des stimulus – des mots ou des
images – sans en avoir conscience. Quels
mécanismes cérébraux sous-tendent
cette perception inconsciente ? Comment
cette dernière diffère-t-elle de la per-
ception consciente ? Selon une thèse
matérialiste dominante en neurosciences,
à chaque état mental donné corres-
pond un état cérébral. Cependant, existe-
t-il des états neuronaux spécifiques des
états mentaux conscients ?

L'équipe de Stanislas Dehaene, de
l'unité INSERM 334, et celle de Denis le
Bihan, du Commissariat à l'énergie ato-
mique, ont visualisé les différences entre
les traitements conscient et inconscient
à l'aide de techniques d'imagerie céré-
brale fonctionnelle. Ils ont présenté des
mots pendant 29 millisecondes sur un
écran d'ordinateur à des volontaires. Ces
mots étaient précédés et suivis, soit
d'écrans blancs sans stimulus, soit de
figures géométriques. Dans le premier
cas, les mots sont perçus consciemment,

car les écrans blancs ne perturbent pas
le traitement de l'information ; dans le
second, ils sont masqués et ne sont
pas perçus consciemment, parce que les
figures géométriques (exposées plus
de deux fois plus longtemps que le mot)
perturbent le traitement du mot : le
masque – les figures géométriques qui
entourent le mot – domine sans doute
le mot dans une sorte de « compétition
mentale ». Plusieurs tests ont confirmé
que les volontaires n'avaient aucune per-
ception ni aucun souvenir des mots mas-
qués, pourtant ils en ont une perception
inconsciente. En effet, on a montré qu'un
mot perçu inconsciemment accélère le
temps de reconnaissance de ce mot, lors-
qu'il est présenté ultérieurement, au cours
d'une nouvelle expérience : une personne
qui a eu une perception inconsciente (ou
encore une image subliminale) d'un
mot ou d'un objet reconnaît plus vite ce
mot ou cet objet qu'une personne qui n'a
pas eu ce type de perception. Ainsi, il y
a un traitement inconscient des mots,
mais on ignorait lequel.

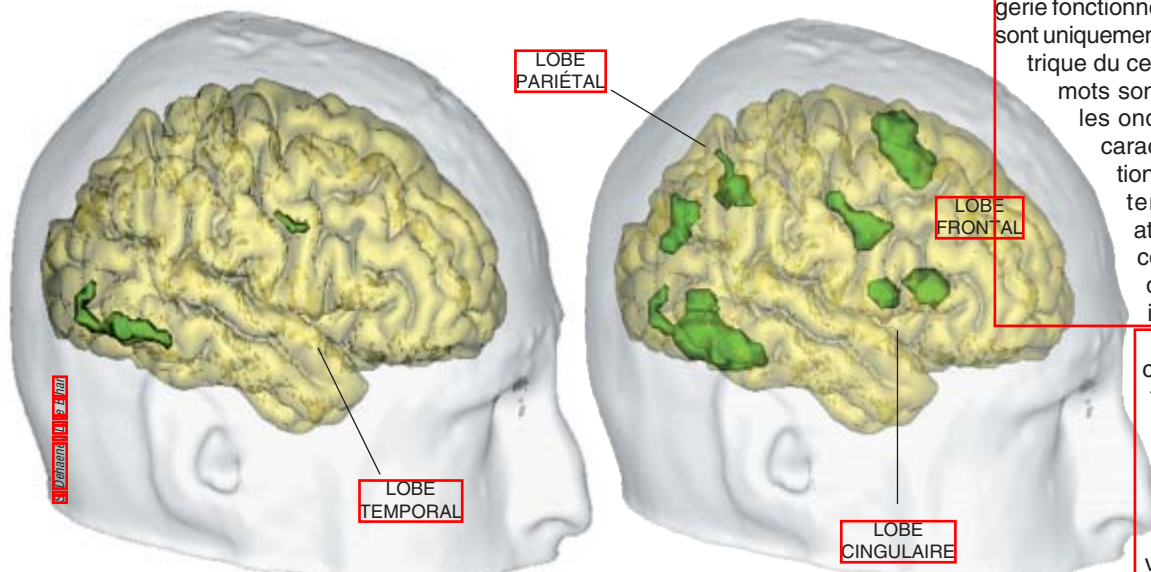
Dans une première série d'expé-
riences, les neurobiologistes ont enre-
gistré le débit sanguin dans le cerveau
par résonance magnétique : la présen-
tation de mots masqués entraîne une acti-
vation d'une région ventrale du lobe
temporal connue pour traiter la forme
visuelle des mots, indépendamment du
style d'écriture (c'est-à-dire que les lettres
soient en majuscules ou en minuscules).

Toutefois, l'activité de cette aire est
12 fois inférieure à celle observée quand
le mot est visible : la perception consciente
augmente donc l'activité de ces aires.
Est-ce tout ? Non, lors de la perception
consciente sont aussi sollicitées des
régions distantes situées dans le cortex
préfrontal et dans le cortex cingulaire anté-
rieur (associées à la planification des opé-
rations cognitives et à notre mémoire de
travail), ainsi que des zones du cortex
pariétal requises dans l'attention.

Dans une seconde étape, S. Dehaene,
D. le Bihan et leurs collègues ont carac-
térisé l'influence d'un mot perçu incon-
sciemment sur la perception consciente
du même mot. Quand le mot a déjà été
présenté masqué, l'activation qu'entraîne
la perception consciente du même mot
est inférieure à celle due à une présen-
tation consciente seule : la perception
inconsciente représente une sorte d'ha-
bituation du cerveau qui est moins activé
lorsqu'il doit traiter le mot perçu consciem-
ment après l'avoir traité de façon subli-
minale. Ainsi, le traitement inconscient du
mot réduit les activations conscientes. Par
ailleurs, l'absence d'influence du style
d'écriture montre que le traitement incon-
scient des mots est poussé, au-delà de la
simple information graphique, jusqu'à l'ex-
traction de l'identité abstraite des mots.

L'enregistrement de l'activité élec-
trique du cerveau, qui renseigne sur la
succession temporelle des aires activées,
a confirmé les résultats obtenus par l'im-
agerie fonctionnelle, dont les informations
sont uniquement spatiales. L'activité élec-
trique du cerveau diminue quand les
mots sont masqués. Par ailleurs,
les ondes électriques tardives,
caractéristiques de la percep-
tion consciente quand le traite-
ment de l'information
atteint les aires distantes du
cortex, disparaissent lors-
que les mots sont perçus
inconsciemment.

Ainsi, la prise de
conscience d'un mot consis-
terait-elle en une augmen-
tation d'activation des
régions qui traitent l'in-
formation lors de la per-
ception inconsciente,
accompagnée de l'acti-
vation de nombreuses
autres régions distantes,
mais qui participent égale-
ment au traitement des mots.



La perception inconsciente (à gauche), d'un mot sollicite des aires (en vert) du lobe temporal ventral. Ces aires, auxquelles s'ajoutent des régions

du cortex préfrontal, du cortex pariétal et du cortex cingulaire antérieur, sont beaucoup plus activées lors de la perception consciente (à droite).

Homme et machine face aux Dames

Le premier match homme-machine de l'histoire du jeu de dames va opposer un des meilleurs joueurs mondiaux au logiciel le plus performant.

Pour la première fois, un ordinateur va affronter un grand maître international de dames. Le logiciel *Buggy*, développé depuis trois ans par Nicolas Guibert, champion de France senior 1999 de jeu de dames, et Maxime Kouamé (Grand-Maître international), est considéré comme le meilleur logiciel de jeu de dames au monde, après avoir remporté les deux dernières compétitions entre logiciels. Il va se mesurer au onzième joueur mondial, N'Diaga Samb, du 13 au 19 août 2001, à la Roche-sur-Yon.

On se souvient de la victoire retentissante (mais contestée) remportée, en 1997, par le logiciel *Deep Blue*, construit par IBM, sur le champion russe d'échecs Garry Kasparov. Les logiciels de jeux de stratégie battent les humains aux échecs ou encore aux checkers, les dames anglo-américaines, mais pas au jeu de dames international. Il existe plus d'une douzaine de règles, issues du jeu de dames originel, probablement apparu au X^e siècle sous le nom *Al-qirq* (le moulin) et dont les règles ont varié avec sa diffusion. Pour le jeu de dames international, les meilleurs logiciels battent à plate couture n'importe quel joueur ordinaire, mais s'inclinent devant les meilleurs. Un programme va-t-il enfin triompher d'un maître international ?

Le logiciel *Buggy* procède, comme les autres logiciels de jeux de stratégie, en deux étapes. La première, fondée sur l'«algorithme de recherche», consiste à calculer tous les coups possibles à partir

d'une configuration des pions. Si les processeurs avaient une capacité suffisante, cette étape suffirait pour que l'ordinateur gagne à coup sûr : il analyserait, dès le premier mouvement, toutes les variantes possibles jusqu'à la fin du jeu, et jouerait à chaque fois le meilleur coup. Aujourd'hui, les logiciels ont des capacités restreintes et ne calculent à l'avance qu'un nombre limité de coups (ce nombre est nommé profondeur). Ils doivent user de stratégie, dans la seconde étape dite «d'évaluation statique», qui différencie un bon d'un excellent logiciel : la première étape relève de la simple tactique, mais la seconde doit déployer toute la finesse du jeu.

D'un coup d'œil sur un damier, les bons joueurs parviennent à estimer lesquels des pions noirs ou blancs ont l'avantage. Toute la difficulté consiste à apprendre à l'ordinateur à disposer de ce coup d'œil. Lors de cette étape, le logiciel évalue de façon globale la situation pour chacune des positions calculées lors de la première étape. Son évaluation est fondée sur le nombre de pièces, puis sur la reconnaissance de configurations connues. En pratique, les deux étapes sont imbriquées : le logiciel fait un choix parmi les coups permis, en étudiant l'arbre de décision possible. Imaginons que pour chaque position, 10 coups soient permis. Si le logiciel calcule toutes les positions possibles à trois coups de profondeur, il doit calculer $10 \times 10 \times 10 = 1\,000$ positions et évaluer chacune d'entre elles. Ces 1 000 positions évaluées, le logiciel choisit le meilleur coup en considérant que son adversaire va toujours choisir le coup qui lui est le plus favorable. Au lieu de chercher les positions à une profondeur égale à trois, le logiciel les étudie à une profondeur n , il doit calculer 10^n positions ! Même si le programme calcule 250 000 positions par seconde, la décision doit être prise dans le temps imparti. Le logiciel cherche à réduire le nombre de calculs. S'il trouve qu'un coup de l'adversaire est mauvais, il ne cherche pas les positions aux profondeurs suivantes, mais il «élague» l'arbre de décision. Pour étudier une position jusqu'à une profondeur n , il ne calcule plus, par exemple, que $10^{n/2}$ coups possibles.

Buggy a deux autres points forts : une base de fins de partie qui contient toutes les configurations à six pièces (ou moins) sur le damier et une bibliothèque d'ouvertures. Grâce à la base de données, le logiciel joue à la perfection les fins de partie, mais l'accès à cette base est long et peut pénaliser le logiciel s'il y fait trop souvent appel. Dans la bibliothèque d'ouvertures, 150 000 positions d'ouvertures ont été produites automatiquement à partir de 230 000 parties recensées. Cette armada sera-t-elle suffisante pour battre le grand maître international ?

BRÈVES

Cousu d'or

Le fil en or le plus fin du monde vient d'être fabriqué par des physiciens de l'Université de Madrid et de l'Université technique du Danemark, à Lyngby : il est composé de sept atomes seulement. Les physiciens ont relié les deux extrémités du fil aux pointes de deux microscopes à effet tunnel, et ont mesuré la résistance de la chaîne en or et la force des liaisons interatomiques : les liaisons de la chaîne sont deux fois plus fortes que celles qui lient les atomes dans l'or massif, résultat prévu par la théorie, mais jamais vérifié avant cette expérience.

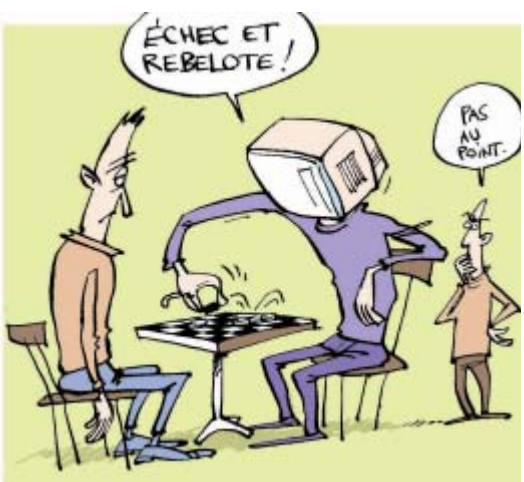
Bi-bip

L'oiseau lyre (*Menura Superba*) est un des six oiseaux imitateurs d'Australie. Les mâles de cette espèce ont développé une aptitude à copier les bruits de leur environnement (le chant d'oiseaux concurrents ou les sons caractéristiques d'autres animaux) qu'ils exploitent lors de leurs parades nuptiales. Greg Czechura, du Muséum du Queensland, vient de détecter de nouveaux sons dans le répertoire des oiseaux lyre vivant près des zones résidentielles : les sonneries de téléphones portables, des réveils électroniques et même le démarrage des vélomoteurs. Toutefois, les femelles de l'espèce ne s'y trompent pas : elle font la différence entre un téléphone portable et un oiseau-lyre.



Premières taches solaires

Dans une chronique anglaise du XIII^e siècle, un physicien de l'Université de Durham vient de découvrir un dessin de taches solaires, qui semble être le tout premier connu. Cette chronique relate de nombreux phénomènes célestes, des aurores boréales, le passage de comètes, ou encore des éclipses. Une des descriptions les plus étonnantes est celle de deux taches solaires observées le 8 décembre 1128 de la ville de Worcester, en Angleterre. La description est écrite en latin et illustrée du dessin des taches décrites. Or on connaît, par ailleurs, la description consignée dans une chronique coréenne de l'époque d'une aurore boréale observée le 13 décembre de la même année. C'est précisément la durée moyenne qui sépare l'apparition d'un groupe de taches solaires et l'apparition d'une aurore boréale. Une façon de réécrire l'activité passée du Soleil.



Du nouveau pour une vieille bactérie

La tuberculose est due à une bactérie, le bacille de Koch, qui s'attaque à différents organes, mais les poumons sont généralement les premiers exposés. Ces agents pathogènes se logent dans les alvéoles pulmonaires, où ils sont avalés par les éboueurs de l'organisme, les macrophages. Toutefois, ces cellules sont tenues en échec et colonisées par la bactérie qui s'y multiplie. Les macrophages infectés passent dans le sang et sont disséminés vers d'autres cibles. Du moins le croyait-on. Camille Locht et ses collègues de l'Institut Pasteur de Lille viennent de montrer que le mécanisme de pénétration de ces bactéries dans l'organisme semble assuré non pas par les macrophages, mais par les pneumocytes (des cellules de l'épithélium pulmonaire) grâce à la molécule d'adhérence HBHA. Cette protéine est indispensable à la colonisation des organes autres que le poumon. Elle représente une nouvelle cible thérapeutique au moment où la tuberculose réémerge : en bloquant cette molécule, on cantonnerait l'infection aux poumons, et on éviterait une contamination grave des autres organes.

Autant en emporte le vent

Thomas Schoener et ses collègues de l'Université de Californie étudiaient les effets de l'introduction artificielle de prédateurs sur des écosystèmes insulaires de l'archipel des Bahamas. Soudain, l'ouragan Floyd dévasta les lieux. Les œufs d'une espèce de petits lézards qui constituaient le plat favori des prédateurs introduits ont été épargnés. En revanche, sur les deux tiers des îles où les prédateurs avaient été introduits, cette espèce s'est éteinte. Aux dires de l'équipe californienne, c'est une occasion unique et accidentelle, d'étudier les effets des catastrophes naturelles et des changements climatiques sur la biodiversité. Contre mauvaise fortune...

Bateau pirate dans les Caraïbes

Des archéologues allemands ont trouvé le *Merchant Jamaica*, qui avait coulé à la fin du XVII^e siècle près d'Haïti. Ils ont identifié le couvercle d'un pot fabriqué entre 1650 et 1670 en Angleterre. Le bateau était probablement celui d'Henry Morgan (1635-1688), l'un des plus célèbres pirates anglais de cette époque. Avec le soutien de son pays, il pillait les bateaux espagnols naviguant dans les Caraïbes (alors sous domination de l'Espagne).

Billes liquides

Des gouttes d'eau truquées, qui ne mouillent pas, prennent la forme de cacahuètes en roulant.

Déplacer une goutte d'eau posée sur une surface solide n'est pas chose facile. Même si cette surface est inclinée, la goutte y reste souvent collée, à cause du contact qu'elle établit avec le solide : pensons par exemple aux gouttelettes de pluie qui adhèrent aux vitres (pourtant verticales). Afin de réaliser des surfaces peu mouillantes à l'eau, où les gouttes ne resteraient pas accrochées, une première stratégie consiste à s'inspirer de substrats naturels, tels la feuille de lotus, l'aile de papillon ou encore la plume de canard. Ces substrats sont hydrophobes (une sorte de cire les recouvre) et texturés, c'est-à-dire pourvus d'aspérités qui rendent la surface rugueuse (c'est d'ailleurs la texture de l'aile de papillon qui lui donne ses belles irisations). À cause du caractère hydrophobe de la surface, l'eau ne peut pas s'insinuer entre les aspérités de la texture et repose donc sur un patchwork de solide et d'air. Plus les aspérités sont petites, plus la goutte est entourée d'air et plus sa forme est sphérique, comme dans un nuage. En minimisant le contact avec l'eau, ce type de surface réduit l'adhésion des gouttes.

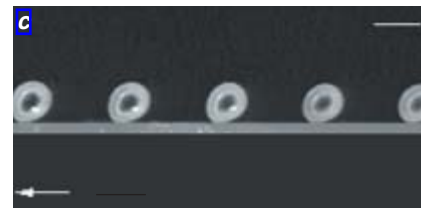
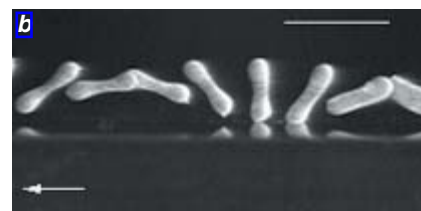
Une autre stratégie, pour réduire encore davantage le contact, consiste à modifier la surface de la goutte, et non plus celle du solide. On part d'une poudre fine (dont les grains mesurent entre un et dix micromètres de diamètre) et hydrophobe, par exemple de la suie, que l'on mélange à quelques millimètres cube

d'eau : les grains couvrent spontanément la surface de l'eau, leur caractère hydrophobe leur interdisant de pénétrer dans le volume. On forme ainsi une sorte de capsule, que nous avons appelée bille liquide, dont la surface est recouverte de grains hydrophobes et dont l'intérieur est rempli d'eau. On peut ensuite transférer cette bille sur un solide quelconque (où elle garde une forme quasi-sphérique), voire même sur de l'eau, où elle flotte.

Cette capsule molle est à mi-chemin entre un solide et un liquide. Le contact qu'elle établit avec son substrat est inhabituel, puisqu'il n'est plus dû qu'à son poids. Ce contact diminue avec la taille de la bille : les micro-billes liquides descendent plus facilement sur un plan incliné, puisque la taille du contact, donc les frottements, sont réduits, au contraire d'une goutte ordinaire, d'autant plus difficile à déplacer qu'elle est petite. Deux billes liquides de tailles différentes dévalent une pente à des vitesses différentes, mais c'est la plus petite qui va le plus vite !

L'état hybride d'une bille a des conséquences plus curieuses encore. Au lieu de glisser, la bille roule sur le plan incliné, comme si elle était solide. Cependant, elle est déformable, comme un liquide. Or, sa vitesse est inhabituellement élevée pour une goutte (à cause du contact réduit qu'elle a avec la surface, elle va 100 à 1 000 fois plus vite qu'une goutte normale), si bien qu'elle se déforme sous l'effet de la force centrifuge.

On observe deux modes de déformation. Dans le premier cas, la goutte, sphérique au départ, prend la forme d'une cacahuète, qui rebondit sur la surface comme une gymnaste sur sa poutre. Cet objet résiste aux chocs qu'il subit lors des rebonds et transporte donc le liquide sans fuite. Dans le second cas, la goutte prend en roulant (quasi-tautologiquement, pour-



Cette goutte d'eau d'un millimètre de diamètre, recouverte d'une poudre hydrophobe (a), ne mouille pas la plaque de verre où elle repose, mais se reflète sur ses deux faces. Lorsqu'elle dévale un plan incliné à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde, elle prend la forme d'une cacahuète (b) ou d'une roue (c), sous l'effet de la force centrifuge (la caméra qui a pris ces clichés successifs est inclinée du même angle que le plan ; les traits blancs correspondent à une longueur de un centimètre).

rait-on dire) la forme d'une roue. Les théoriciens avaient imaginé ces deux formes. En particulier, Lord Rayleigh avait prédit qu'une goutte en rotation pouvait se transformer en roue. Par ailleurs, lors d'une expérience récente réalisée par la NASA, on avait observé la caca-huète, en mettant une goutte en rotation dans l'espace (hors du champ de la gravitation). Toutefois, on pensait que la roue était instable, une hypothèse que l'astrophysicien Subrahmanyan Chan-

drasekhar avait avancée. Dans nos expériences, la roue progresse sur un plan incliné, qui semble la stabiliser.

Les billes liquides soulèvent de nombreuses questions, liées à leurs frottements avec les solides et à leurs déformations. Elles pourraient aussi avoir un intérêt pratique : on envisage de les utiliser pour transporter de petits volumes de liquide sur de grandes distances et à grande vitesse, notamment en microfluidique. Ces objets, faciles à réaliser au laboratoire,

apparaissent parfois spontanément dans la nature. Une forte pluie sur une route couverte de pollens ou de poussières engendre parfois ce qu'on appelle, dans le Sud-Ouest, un « verglas d'été », constitué de billes liquides. Ces billes se forment probablement aussi sur les sols argileux (l'argile est hydrophobe), où elles pourraient donner lieu à un type d'érosion original.

Pascale AUSSILLOUS et David QUÉRÉ
Laboratoire de physique de la matière condensée, Collège de France

Le compteur des abeilles

Les abeilles évaluent les distances grâce à la quantité d'images perçues pendant leur trajet.

Une abeille éclaireuse explore les prés voisins de sa ruche à la recherche de nourriture, du pollen ou du nectar. Après avoir repéré un parterre de fleurs mûres, elle retourne à la ruche prévenir ses congénères et leur indiquer l'endroit. Pour ce faire, elle danse en libérant une substance olfactive, une phéromone, qui attire les abeilles ouvrières ainsi recrutées pour aller quérir de la nourriture. Le prix Nobel de médecine Karl von Frish (1886 – 1983) a montré qu'une danse en rond indique une nourriture très proche qui ne requiert aucune information pour la trouver, alors qu'une danse en forme de huit, dite frétilante, rend compte, d'une part, de la distance à parcourir et, d'autre part, de la direction à prendre pour accéder à la source de nourriture. Comment ces informations sont-elles codées ?

L'angle de la danse avec la verticale est identique à celui de la direction de la nourriture avec celle du Soleil. La durée de cette danse indique la distance, mais comment les abeilles l'estiment-elles ? En 1963, Martin Lindauer avait montré que les abeilles évaluent les distances par l'énergie dépensée pour les parcourir. Or, les travaux de Harald Esch, de l'Université d'Indiana, contredisent cette hypothèse. Selon lui, les abeilles évaluent les distances grâce au flux optique, c'est-à-dire à la quantité d'images perçues par unité de temps. Par exemple, dans un train, les objets proches, qui passent devant nos yeux rapidement, créent un flux optique plus important que ceux qui sont éloignés et, par conséquent, plus lents.

Dans un premier temps, les éthologues ont habitué des abeilles (*Apis mellifera ligustica*) à traverser un tunnel de huit mètres de longueur, orienté vers le Sud et placé à trois mètres de la ruche. Les côtés et le plancher du tunnel étaient tapissés de carrés blancs et noirs disposés aléatoirement, alors que le plafond était grillagé. Enfin, une coupelle d'eau sucrée était placée au fond du tunnel. Les abeilles qui atteignaient cette solution, puis revenaient à la ruche, dansaient pendant 358 millisecondes.

Ensuite, avec des abeilles qui ne passaient pas par le tunnel, ils ont établi les correspondances entre la durée des danses et l'éloignement de la nourriture : selon l'échelle obtenue, une danse de 358 millisecondes représente une distance de 72 mètres, et non les 11 mètres que les abeilles éclaireuses avaient réellement parcourus. Effectivement, des observateurs ont vu un maximum d'abeilles recrutées par celles qui avaient traversé le tunnel, mais qui, elles, ne passaient pas

par le tunnel, explorer une région distante de 70 mètres dans la direction du tunnel.

Ainsi les abeilles, habituées à une « densité » moyenne d'objets sur leur trajet, étaient trompées par la présence des carrés noirs et blancs : la quantité d'images perçues par unité de temps étant supérieure à la normale, elles pensaient avoir parcouru une distance supérieure à la longueur réelle du tunnel. L'expérience a été renouvelée avec succès avec un tunnel de six mètres de longueur et orienté vers le Nord-Ouest. Toutefois, d'autres paramètres, tels l'altitude du vol et les éléments du paysage influent sur le flux optique. Ainsi, les abeilles recrutées qui suivent les consignes de la danse de l'abeille éclaireuse convertissent une quantité d'images en une distance précise qui les sépare de la nourriture.



Les abeilles indiquent, par une danse, à leurs congénères l'endroit où se trouve la nourriture. La durée de cette danse indique la distance estimée grâce à la quantité des images perçues pendant le trajet. Les abeilles qui passent par le tunnel tapissé de carrés blancs et noirs (à gauche) apprécient mal les distances, car le flux optique (la quantité d'images perçues) est artificiellement augmenté.

Petit trou noir

Depuis environ 10 ans, les astronomes se sont persuadés que le centre des grandes galaxies – dont la Voie lactée – renferment chacun un énorme trou noir de plusieurs millions, voire des milliards de masses solaires. La matière qui se trouve violemment aspirée par ces monstres est chauffée à des températures considérables et émet de grandes quantités de rayonnement, ce qui expliquerait que les noyaux des galaxies produisent beaucoup d'énergie à partir d'un très faible volume (du même ordre que celui du Système solaire pour une production d'énergie équivalente à celle de dizaines de milliards de soleils). Cependant, en étudiant la vitesse de révolution des étoiles de la galaxie M33 autour du centre de cette galaxie, David Merritt, de l'Université d'État du New Jersey, et ses collègues viennent d'établir qu'elle renferme un trou noir central n'excédant pas (si toutefois il existe) 3 000 masses solaires (1 000 fois moins que le plus petit trou noir central connu). Si ce résultat était confirmé, il remettrait en cause un des rares faits qui semblaient acquis quant au mécanisme encore inconnu de formation des galaxies.

La croissance des dinosaures

Une équipe de paléontologues franco-portugaise a montré que les mécanismes de croissance des os des théropodes, des dinosaures carnivores, sont plus proches de ceux des oiseaux, leurs descendants, que de ceux des tortues et des crocodiles. Ils ont étudié les os d'embryons vieux de 150 millions d'années, provenant du gisement de Lourinha, à 60 kilomètres de Lisbonne. Jusqu'à présent, la biologie des théropodes était mal connue, car les fossiles découverts étaient surtout des embryons de dinosaures végétariens du Crétacé supérieur, vieux de 70 millions d'années.

Les moustaches du phoque

Le phoque suit une proie en détectant, grâce à ses moustaches, le sillage du poisson. Une équipe allemande a simulé le mouvement d'un poisson au moyen d'un sous-marin miniature et a constaté que le phoque est capable de suivre l'engin à longue distance, même dans l'obscurité, alors qu'il échoue lorsque ses moustaches sont recouvertes par un bandeau. Les moustaches, très sensibles aux vibrations de l'eau, joueraient le rôle d'un détecteur. C'est la première fois que l'on identifie chez un animal ce type de repérage des proies.



Science

Prélude aux éruptions

Un modèle expérimental de volcan explique l'origine des jets de gaz précurseurs des éruptions volcaniques.

Le 15 juin 1991, aux Philippines, le volcan Pinatubo se réveille après 500 ans d'inactivité, envoyant dans l'atmosphère un immense nuage de gaz et déversant sur ses flancs une lave qui balaiera tout sur son passage faisant 850 morts et détruisant les habitations d'un million de personnes. Le bilan a été lourd, mais il a pourtant été limité par la prévision de la catastrophe. Pendant les deux mois qui l'ont précédée, des éruptions annoniatrices riches en gaz et de faible volume avaient alerté les autorités du réveil du volcan et des mesures avaient été prises pour évacuer les personnes vivant à proximité. Ces jets précurseurs ont aussi été observés pour d'autres volcans, tels la Soufrière de l'île de Montserrat, aux Antilles, et le volcan Usu, au Japon. Pourquoi ces gaz initialement dissous dans le magma précédent-ils le magma? Empruntent-ils un réseau connecté de fissures? Thierry Menand et Stephen Tait, de l'Institut de physique du Globe de Paris, proposent un modèle expérimental de volcan, en laboratoire, qui rend compte des caractéristiques des jets de gaz précurseurs.

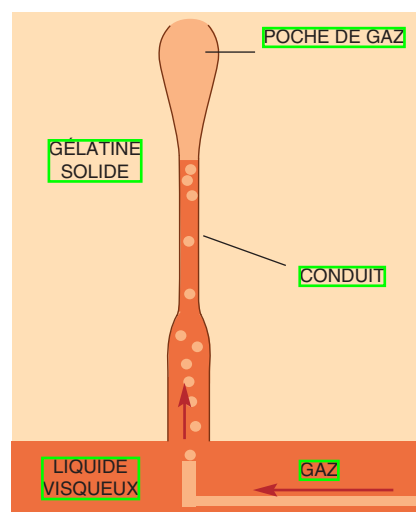
La source d'un volcan est une chambre magmatique, réservoir situé à quelques kilomètres sous la surface, où le magma s'accumule jusqu'à ce que la pression qu'il subit l'en éjecte. À mesure que le magma remonte, sa pression diminue et les gaz auparavant dissous s'échappent de la lave. L'observation des fissures magmatiques fossiles montre que ces gaz ont tendance à s'accumuler à l'avant des fissures et à former une poche. Dans le modèle expérimental de T. Menand et S. Tait, un cube de gélatine de 50 centimètres de hauteur simule la roche, et un liquide visqueux le magma. Le cube de gélatine obstrue hermétiquement la cuve contenant le liquide, et l'on en augmente la pression. On amorce un conduit dans la gélatine par une encoche. À mesure que l'on augmente la pression, le liquide se fraye un chemin vertical dans la gélatine. Puis, on stabilise la pression, et le liquide continue à monter lentement; on injecte alors dans la cuve quelques bulles d'air comprimé qui déforment la fissure: une poche de gaz apparaît à l'avant du liquide alors que celui-ci continue de progresser vers le haut. En même temps qu'elle se forme, la poche s'élève de plus en plus vite dans la gélatine. Le liquide, à cause

AP Photo/KC Sasahara



des frottements avec les parois du conduit, monte moins vite. Malgré l'accélération, le débit du liquide reste constant, ce qui signifie que la section du conduit diminue: la cheminée se referme derrière la bulle de gaz, laquelle continue à progresser et perce la surface de la gélatine quelques instants avant le liquide.

Ce modèle est-il une bonne image de la réalité? La pression des gaz précurseurs augmente jusqu'à la limite de rupture de la gélatine. Le modèle montre qu'une fois cette limite atteinte, la poche de gaz se désolidarise du magma, car, du fait de sa faible viscosité, elle avance plus vite que le liquide. Dans ce modèle, le liquide emprunte le même chemin que les gaz et l'intervalle de temps entre le jet précurseur et la véritable éruption dépend de la viscosité du liquide. Dans la réalité, cet intervalle dépend de la nature des gaz dissous et des pressions auxquelles ils quittent le magma. Le modèle prévoit toutefois qu'il est plus court dans le cas des volcans à lave basaltique, peu visqueuse, que dans les volcans où la lave contient de la silice. Cette hypothèse semble confirmée par le volcan Parícutin, au Mexique, où des gaz et des cendres sont émis quelques heures avant que le magma n'atteigne la surface, alors que dans le cas des éruptions à silice, des semaines, voire des mois (pour le volcan Pinatubo), séparent les deux événements.



Dans ce modèle, une couche de gélatine simule la roche et un liquide visqueux le magma. Les gaz injectés s'accumulent en une poche qui progresse dans la gélatine, devant le «magma».

Un scribe moléculaire

Grâce à des mutations et à des sélections, des biologistes ont mis au point une molécule d'ARN qui copie des molécules... d'ARN.

La biologie des êtres vivants est régie par un dogme : l'ADN code l'ARN et l'ARN code les protéines (l'ADN est l'acide désoxyribonucléique, l'ARN l'acide ribonucléique). En a-t-il toujours été ainsi ? De nombreux biologistes pensent que cette organisation requiert trop d'acteurs moléculaires pour être apparue *ex nihilo*. Selon eux, la vie serait née avec l'apparition de molécules simples capables de se répliquer elles-mêmes sans avoir recours à une machinerie complexe : le meilleur candidat pour ces molécules primordiales est l'ARN, dont certains, nommés ribozymes, sont doués de propriétés catalytiques, c'est-à-dire qu'ils favorisent certaines réactions chimiques. Toutefois, aucun fossile moléculaire d'un tel ARN n'existe et aucun ribozyme connu ne copie des brins d'ARN. Pourtant, l'équipe de David Bartel, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a mis au point une molécule d'ARN qui copie un brin modèle.

Les ARN sont constitués de nucléotides, c'est-à-dire d'assemblages d'une molécule azotée, nommée base, choisie parmi quatre (l'uracile, la cytosine, la guanine et l'adénine), d'un sucre (le ribose) et d'un acide phosphorique. C'est l'enchaînement des bases qui code l'information contenue dans l'ARN. Les bases sont complémentaires deux à deux : ainsi, la cytosine se lie à la guanine et l'adénine à l'uracile. La copie d'un brin d'ARN se fait par ajout successif des nucléotides complémentaires du brin modèle. Les nucléotides complémentaires sont présents sous une forme triphosphate : lorsqu'ils sont liés, une molécule de pyrophosphate (deux molécules d'acide phosphorique) est libérée. La copie démarre quand, sur le brin modèle, est déjà fixé un petit brin complémentaire initiateur.

Les biologistes avaient à leur dispo-

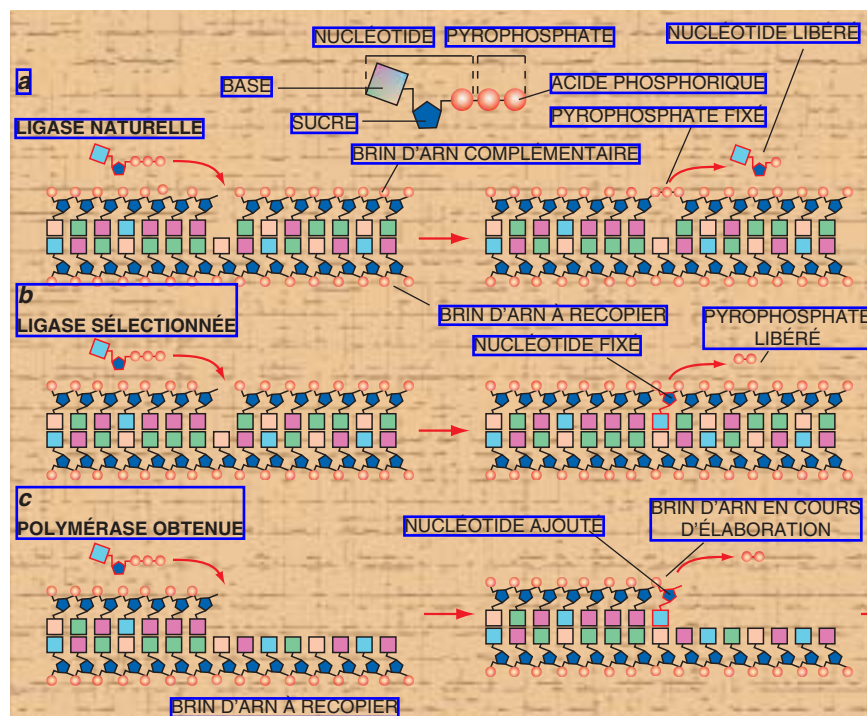
sition une molécule d'ARN catalytique connue, une ligase, qui lie deux petits brins d'ARN, chacun complémentaire d'une partie d'un brin modèle plus grand (voir la figure). Cependant, cet ARN fixait le pyrophosphate entre les deux brins complémentaires et libérait le nucléotide, alors qu'elle aurait dû faire exactement l'inverse ! L'un des deux brins complémentaires joue le rôle d'initiateur. Ainsi, les biologistes ont tenté de modifier la ligase afin qu'elle libère le pyrophosphate et fixe le nucléotide et afin qu'elle lie à l'initiateur non pas un brin, mais un seul nucléotide. En fait, ils cherchaient à transformer cette ligase en une polymérase, le ribozyme qui copie les brins d'ARN nucléotide par nucléotide.

En 1993, les biologistes avaient franchi la première étape : la ligase qu'ils ont obtenue à partir de séquences aléatoires sélectionnées libérait bien le pyrophosphate et fixait le nucléotide, mais elle restait une ligase. Aujourd'hui, ils ont soumis le noyau catalytique – la partie active

de la molécule – de la ligase de deuxième génération à des mutations aléatoires. Puis, ils ont modifié certaines parties pour obtenir les propriétés recherchées : par exemple, ils ont rajouté un fragment aléatoire de 76 nucléotides à une extrémité de la molécule originale afin de créer une cavité où s'insère l'ARN à copier. Auparavant, l'activité de la ligase dépendait de la séquence de l'ARN à copier. La nouvelle molécule (qui agit maintenant comme une polymérase) recopie tous les brins d'ARN quelle que soit leur séquence.

Les biologistes ont sélectionné les différents ARN obtenus et étudié leurs propriétés de répllication. Après 18 opérations de mutation et de sélection, ils sont parvenus à un ARN de 189 nucléotides capable de copier jusqu'à 14 nucléotides de n'importe quel brin modèle, avec une fidélité de 96,7 pour cent.

La vie est-elle née avec les ARN ? Les travaux de D. Bartel rendent cette hypothèse plausible.



Les ARN catalytiques, ou ribozymes, sont des ARN qui favorisent une réaction. Un ribozyme naturel, nommé ligase, lie deux brins d'ARN complémentaires sur un brin modèle avec une molécule de pyrophosphate et libère un nucléotide (a). À partir de cette ligase naturelle, des biologistes ont d'abord sélectionné une ligase (b) qui lie deux brins complémentaires par un nucléotide. Puis, dans un deuxième temps, ils ont mis au point une polymérase qui, à partir d'un brin initiateur copie un brin modèle par additions successives de nucléotides (c).

Vous cherchez un article scientifique ou technique ?

//articlesciences.inist.fr

Le moteur de recherche et de commande d'articles scientifiques et techniques

Un service de l'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

www.inist.fr

Des réseaux de neurones auto-organisés

Des robots commandés par un nouveau type de réseau de neurones s'adaptent à des situations nouvelles, sans oublier ce qu'ils ont déjà «appris».

Les réseaux de neurones artificiels sont de plus en plus utilisés pour contrôler l'activité de robots que l'on nomme animats. Au cours de l'évolution d'un animat dans son environnement, son réseau de neurones change de configuration en fonction des stimulus qu'il reçoit, mais aussi de ses configurations antérieures. Ainsi, le réseau de neurones contient, à chaque instant, des informations sur les objets qui entourent l'animat et sur les conséquences de ses actions passées. Contrairement aux systèmes plus rigides dont le comportement est déterminé par des décisions définies à l'avance, l'animat est doué d'une certaine autonomie et d'une capacité d'apprentissage. Toutefois, les réseaux de neurones artificiels ont un grave défaut : ils ont tendance à apprendre de façon globale (ils codent toutes les informations avec le même niveau de priorité) et une modification notable de l'environnement peut les conduire à remettre en cause l'ensemble des comportements appris indépendamment du contexte : c'est l'«oubli catastrophique». Nous avons proposé et testé, au cours de simulations informatiques, un nouveau modèle de réseau capable de s'en affranchir.

Le plus souvent, pour éviter l'oubli catastrophique, on hiérarchise à l'avance les informations traitées par l'animat. Le

réseau de neurones est ainsi divisé en modules spécialisés, par exemple, dans les tâches de reconnaissance de l'environnement ou encore de gestion des mouvements. Toutefois, cette méthode est peu satisfaisante, parce que cette modularisation reflète davantage les *a priori* du chercheur qu'une division des tâches fondée sur la façon dont le robot extrait des informations pertinentes de son environnement.

Pour créer un nouveau modèle, nous nous sommes inspirés de la neurobiologie. En effet, selon les neurobiologistes, l'information traitée par un réseau de neurones – le cerveau – est codée non seulement dans les motifs formés par les groupes de cellules qui sont actives à chaque instant, mais aussi dans l'évolution au cours du temps de ces motifs. Cette dépendance temporelle provient, semble-t-il, du fait qu'un neurone n'est activé qu'après une phase pendant laquelle il ne fait qu'accumuler les impulsions émises par les neurones auxquels il est connecté. En conséquence, il change d'état d'autant plus vite qu'il a été fortement stimulé. Nos neurones artificiels simulent ce comportement de façon simple : à chaque séquence, le programme ne réévalue que l'état des neurones les plus stimulés à la séquence précédente. Nous avons appelé ce mode d'activation, le mode ordonnancé.

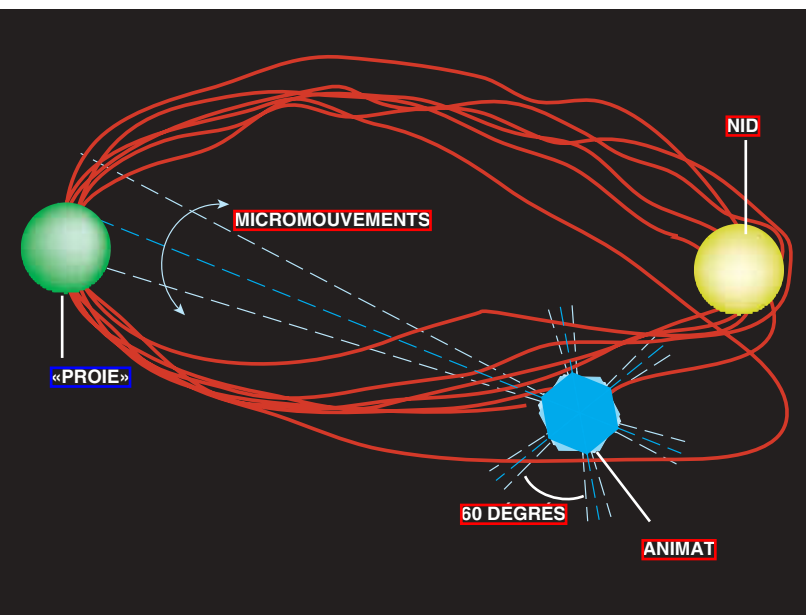
Notre animat évolue dans une pièce à deux dimensions contenant une «proie» qui se déplace aléatoirement et qu'il doit capturer et ramener à un «nid» fixe. Nous avons délibérément limité ses capacités sensorielles et motrices : il ne dispose d'aucune information sur sa propre position dans la pièce, ni sur celle du nid, ni sur la distance qui le sépare de sa cible. Ses six «yeux» lui indiquent simplement le secteur (de 60 degrés) où se trouve la cible et il ne perçoit les murs qu'à très faible distance. Par ailleurs, lors de sa «venue au monde», le réseau neuronal de l'animat est «brut» (nous n'avons introduit aucun module préalable) et toutes les cellules sont connectées entre elles. Au cours de l'évolution de l'animat, ces connexions sont renforcées ou affaiblies par un algorithme d'apprentissage qui favorise celles qui accompagnent les comportements à succès.

A cause du mode d'activation ordonnancé, tout se passe comme si l'influx nerveux se propageait à une vitesse finie dans le réseau. Ainsi, le nombre de neurones activés dans un comportement donné est limité par la vitesse à laquelle l'environnement évolue autour de l'animat. L'algorithme d'apprentissage ayant tendance à fixer les motifs de neurones qui provoquent les «bons» comportements, des populations de neurones différenciées émergent et l'animat les utilise pour réaliser des comportements différents : tout se passe comme si une structure en modules apparaissait spontanément dans le réseau.

Cette modularité n'est pas contenue à l'avance dans la structure du réseau. Si elle est difficile à observer directement, elle est mise en évidence par le fait, vérifié lors des simulations, que le phénomène d'oubli catastrophique disparaît. En outre, on observe d'intéressantes conséquences dans le comportement de l'animat. Il développe, notamment, des stratégies de repérage et d'approche de la cible fondées sur des micro-mouvements (de petites fluctuations du mouvement autour d'une trajectoire moyenne). Ces stratégies sont intéressantes parce qu'elles rappellent celles que l'on observe chez un grand nombre d'animaux et parce qu'elles émergent spontanément (nous n'avons en rien favorisé leur apparition).

Ce modèle offre un nouveau champ de recherche. Il devra être testé pour des tâches et des environnements dynamiques plus complexes. Ainsi, l'animat devra bientôt affronter le monde réel...

Guillaume BELSON et Hédi SOULA,
Institut national des sciences appliquées de Lyon



Le robot (en bleu) commandé par un réseau de neurones ne perçoit de ses cibles, la «proie» (en vert) ou le «nid» (en jaune) que leur présence ou non dans des secteurs de 60 degrés. Grâce au nouveau réseau de neurones, il adopte spontanément une stratégie «astucieuse» : à l'aide de petites fluctuations de sa trajectoire, il maintient sa cible entre deux capteurs ce qui améliore sa précision. Ces «micro-mouvements» rappellent, par exemple, ceux qui animent les yeux des mouches. Dans le cas où la cible est immobile, cette stratégie qui vise à maintenir une orientation moyenne constante entre le robot et la cible explique l'allure quasi elliptique de la trajectoire qu'il apprend, de lui-même, à parcourir.

Bouillants noyaux

Lorsque qu'un noyau atomique se «vaporise», sa température baisse brièvement.

Avez-vous déjà renversé de l'eau sur une plaque chauffante à 300 °C? Loin de disparaître, les perles liquides qui se forment sont projetées de droite et de gauche, parce que leur base se vaporise instantanément au contact de la plaque. Selon les lois classiques de la thermodynamique, sa température se maintient à 100 °C tant qu'une goutte «survit». Philippe Chomaz du GANIL, et Francesca Gulminelli, à l'Université de Caen, ont émis l'hypothèse que la température d'une goutte assez petite baisse brièvement pendant son ébullition! Ils ont eu cette intuition après qu'un autre physicien du GANIL, Bernard Borderie, a observé un phénomène thermodynamique comparable à ce qui arrive à une goutte d'eau sur une plaque chauffante : la «vaporisation nucléaire».

Au GANIL, ces physiciens étudient le comportement thermodynamique d'un système nucléaire dont on augmente l'énergie interne. Pour cela, ils précipitent des noyaux les uns contre les autres, et fabriquent des «systèmes nucléaires chauds», c'est-à-dire des milieux intermédiaires constitués de nucléons (protons ou neutrons). En faisant varier l'énergie du choc, ils en modifient la température. Ils ont ainsi mesuré trois régimes différents de collision : l'évaporation nucléaire, la multifragmentation et la vaporisation nucléaire. L'évaporation se produit à des énergies de collision relativement basses ; les deux noyaux sont peu modifiés, mais laissent échapper des particules légères, telles que des protons (des noyaux d'hydrogène) ou des deutons (un proton et deux neutrons). Quand l'énergie du choc augmente (dès 2×10^{13} joules par nucléon), le milieu nucléaire intermédiaire émet de nombreuses particules et des fragments lourds (plus lourds que des noyaux d'hélium) : c'est la multifragmentation. La vaporisation a lieu lorsque l'énergie de collision dépasse 5×10^{15} joules par nucléon ; le

milieu nucléaire intermédiaire est alors comparable à un gaz de particules constitutives des noyaux, contenu dans un volume triple de celui des noyaux avant la collision. Alors que les deux premiers régimes étaient connus depuis plusieurs années, la vaporisation a été découverte récemment au GANIL.

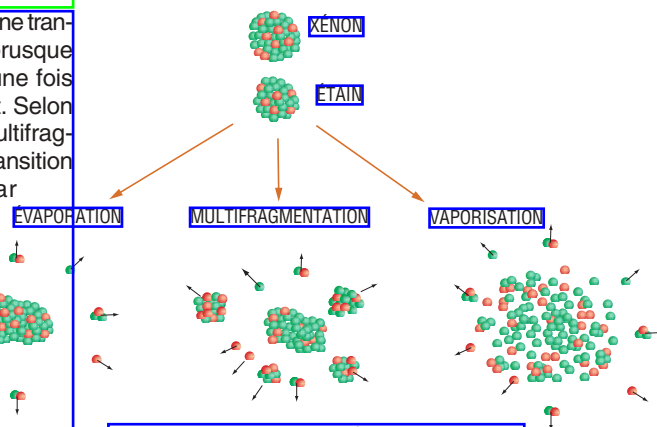
B. Borderie et ses collègues ont notamment envoyé un faisceau de noyaux de xénon (54 protons et 77 neutrons) sur une cible d'étain (50 protons et 69 neutrons). Dans le cas d'une collision frontale, ces deux noyaux fusionnent en un seul système nucléaire chaud, dont l'énergie dépend des conditions du choc. Après de multiples collisions, l'équipe a déterminé la capacité calorifique du milieu nucléaire intermédiaire en fonction de son énergie interne. La capacité calorifique d'un système est l'énergie qu'il faut lui fournir pour augmenter sa température de un kelvin. Cette grandeur est en général positive. Toutefois, dans le cas du milieu nucléaire intermédiaire, on constate que lorsque l'énergie interne atteint 4×10^{13} joules – soit l'équivalent d'une température de 70 milliards de degrés! – la capacité calorifique devient brièvement négative. L'énergie interne du milieu nucléaire intermédiaire décroît durant un court instant avant de recommencer à augmenter. Sur la courbe tracée par les physiciens, le phénomène se traduit par une «divergence».

Un tel comportement atteste d'une transition de phase, c'est-à-dire du brusque changement d'état du système une fois qu'un seuil énergétique est atteint. Selon P. Chomaz et F. Gulminelli, la multifragmentation est comparable à la transition liquide-gaz que subissent, par exemple, des gouttelettes d'eau déposées sur une plaque chauffante. Tandis que dans la phase d'évaporation, le milieu nucléaire est comparable à un liquide, il se rapproche d'un gaz dans la phase de vaporisation. Toutefois, à la température critique, un «liquide nucléaire» a une capacité calorifique négative ; il se refroidit brièvement pendant la multifragmentation.

Comment s'explique cette particularité ? Pour produire et lancer les fragments

qui constituent le milieu vaporisé, le système consomme de l'énergie. Quand le nombre de particules qui le constituent est grand, le refroidissement associé à cette dépense énergétique n'a guère d'influence sur le comportement du système global. En revanche, un système constitué d'un petit nombre de particules (c'est le cas d'un milieu nucléaire) devient sensible au coût énergétique de la vaporisation.

Jusqu'à présent, on n'avait encore jamais décrit de système qui se refroidit pendant une transition de phase! Toutefois, les lois de la thermodynamique ont été élaborées pour les systèmes macroscopiques. P. Chomaz et F. Gulminelli pensent que les propriétés thermodynamiques des transitions de phase de systèmes à grand nombre de particules ne subsistent pas lorsqu'on étudie les changements d'états de système à petit nombre de particules. Selon eux, les transitions de phase à l'échelle élémentaire seraient toujours accompagnées d'un bref refroidissement du milieu à la température critique. Si tel est le cas, le phénomène devrait se retrouver pour tout corps subissant une transition de phase à cette échelle, notamment pour les microgouttelettes d'eau sur une plaque chauffante. Hellmut Haberland et son équipe de l'Université de Fribourg l'ont également observé lors de la fusion de minuscules morceaux de sodium qui ne comportent que 147 atomes.



Lorsque des atomes de xénon frappent une cible d'étain, il se produit soit une évaporation, où les deux noyaux sont peu modifiés et laissent échapper des protons, notamment ; soit une multifragmentation, où diverses particules et des fragments lourds sont émis ; soit une vaporisation libérant un gaz de particules.

Vous cherchez des services personnalisés d'information scientifique ?

//connectsciences.inist.fr

Le portail CNRS d'information scientifique et technique

Un service de l'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

www.inist.fr

Des planètes aux orbites chaotiques

Les lois de la gravitation universelle imposent à certaines des planètes découvertes autour d'étoiles lointaines des comportements très différents de celui des astres du Système solaire.

En 1999, un système de trois planètes gravitant autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* a été découvert par Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien de Siding Springs. *Upsilon Andromedae* est une étoile semblable au Soleil située à 44 années-lumière ; elle est visible à l'œil nu dans l'hémisphère Nord. Ces trois planètes ont des masses importantes (respectivement de l'ordre de une, deux et quatre fois la masse de Jupiter). Il s'agit de planètes géantes qui gravitent relativement près de leur étoile (si ces planètes géantes étaient dans le Système solaire, toutes les trois seraient contenues à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter). Ainsi, elles sont plus proches les unes des autres que les planètes géantes du Système solaire. De ce fait, les interactions gravitationnelles qui s'exercent entre ces trois astres sont considérables et doivent rendre leurs trajectoires fort complexes. Éric Bois et ses collègues de l'Observatoire des sciences de l'Université de Bordeaux ont construit une série de modèles de systèmes planétaires leur permettant d'étudier les orbites de ces planètes pour différentes configurations compatibles avec les observations faites sur ces systèmes. Leurs calculs montrent que les trajectoires des planètes au voisinage d'*Upsilon Andromedae* sont, dans la plupart des cas, chaotiques. Leurs résultats suggèrent que beaucoup de systèmes planétaires découverts autour d'étoiles lointaines sont dynamiquement très différents du Système solaire.

Dans le cas du Système solaire, les interactions entre les planètes sont faibles. De ce fait, on peut calculer l'orbite de chaque planète en ne considérant, dans un premier temps, que son interaction avec le Soleil : on obtient alors les orbites en forme d'ellipse découvertes par Johannes Kepler. On peut ensuite moduler ces ellipses à l'aide des effets complémentaires

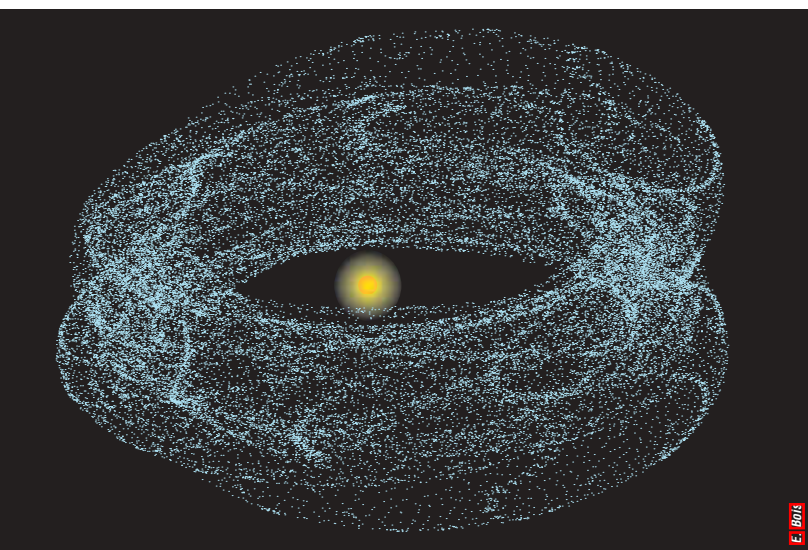
produits par la présence des autres planètes. Dans le cas du système d'*Upsilon Andromedae*, cette approche est impossible.

É. Bois, A. Maciejewski, B. Dauphole, K. Goździewski, L. Kiseleva et N. Rambaux ont utilisé un modèle numérique simulant les interactions gravitationnelles en jeu dans le système d'*Upsilon Andromedae*. Ils ont placé les trois planètes dans différentes configurations initiales compatibles avec les observations. En effet, les méthodes actuelles de détection des planètes autour d'étoiles lointaines ne permettent d'évaluer que leurs périodes de révolution et une valeur minimale de leurs masses. De ce fait, plusieurs paramètres, par exemple, les masses exactes des planètes et l'inclinaison dans l'espace de leurs orbites respectives, ne sont pas complètement déterminés par les mesures.

Le système *Upsilon Andromedae* est très instable : les caractéristiques des orbites varient de façon chaotique et sont radicalement modifiées en quelques milliers d'années. C'est le cas, par exemple, de leurs excentricités (un paramètre qui détermine l'aplatissement d'une trajectoire elliptique par rapport au cercle parfait). L'excentricité d'une orbite elliptique est comprise entre zéro (correspondant à une orbite circulaire) et une valeur inférieure à un (correspondant à une orbite parabolique). Si l'excentricité devient égale ou supérieure à un, la planète est éjectée du système. Alors que les orbites du Système solaire sont durablement stables et restent proches d'un plan moyen, les simulations montrent que l'excentricité de la deuxième planète d'*Upsilon Andromedae*, par exemple, peut assez rapidement balayer près de 60 pour cent de l'intervalle des valeurs de l'excentricité d'une ellipse. É. Bois et ses collègues ont même montré que, pour certaines conditions initiales compatibles avec les observations, le système est tellement instable qu'il se désintègre en éjectant sa planète la plus extérieure dès les premiers 1 000 ans.

Par ailleurs, les trajectoires de ces planètes ne peuvent pas être des figures planes. En mécanique, on montre que si la force qui s'exerce entre deux masses est portée par une droite passant par leurs centres de gravité respectifs, le mouvement qu'elles adoptent reste toujours dans un même plan. Cependant, si les deux corps ne sont pas rigoureusement sphériques, il faut, pour calculer leur attraction mutuelle, découper chaque astre en petits volumes élémentaires et calculer la somme de leurs interactions mutuelles. En général, la force résultante ne permet plus, en toute rigueur, que le mouvement des planètes soit confiné dans un plan, même si son effet est très faible. Toutefois, le système d'*Upsilon Andromedae* est chaotique et très sensible aux petites perturbations, de sorte que cette interaction élémentaire est suffisante pour empêcher les planètes de graviter dans un plan commun autour de leur étoile.

Ainsi, notre Système solaire, avec ses orbites durables, ne semble pas être un modèle universel. De nombreuses étoiles semblables au Soleil ont des températures et des longévités qui seraient favorables à l'apparition de la vie, mais si elles sont dotées de planètes semblables à celles d'*Upsilon Andromedae* – dont les conditions climatiques doivent varier brutalement au rythme de leurs trajectoires chaotiques – il est peu probable que la lente évolution chimique nécessaire au développement d'une biosphère puisse y avoir lieu. L'étude dynamique des nouveaux systèmes planétaires pourra peut-être, à l'avenir, fournir des indications aux exobiologistes qui cherchent à déterminer la fréquence à laquelle la vie apparaît dans l'Univers. Par ailleurs, avec les méthodes actuelles de détection, la détermination des masses et des orbites des planètes extrasolaires dépend d'une hypothèse implicite : on leur attribue des trajectoires elliptiques assez stables. Les comportements dynamiques mis en évidence par l'équipe de Bordeaux incitent à la prudence quant à la validité de cette hypothèse. La célébrité de Kepler ne saurait traverser tout l'Univers !



Les trois planètes qui gravitent autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* (au centre) ont des trajectoires chaotiques, comme l'illustre cette simulation, réalisée à Bordeaux. Elle représente les 17 000 premières révolutions de la deuxième planète de ce système (les échelles n'ont pas été respectées).

L'arche de Noé des vertébrés

De nombreuses espèces de vertébrés auraient survécu au cataclysme qui a entraîné la disparition des dinosaures, sur le continent indien au cours sa dérive de l'Afrique vers l'Asie.

Il y a 65 millions d'années, un cataclysme planétaire, vraisemblablement la chute d'un astéroïde combinée à une intense activité volcanique, mettait fin au règne des dinosaures et bouleversait le monde vivant. Jusqu'à présent, on admettait que la plupart des vertébrés terrestres avaient également été détruits au cours de cet épisode. Pourtant Michel Milinkovitch, de l'Unité de génétique de l'évolution, et Franky Bossuyt, de l'Unité d'écologie et de systématique, à l'Université libre de Bruxelles, ont échaudé un nouveau scénario d'après diverses données géologiques et génétiques : de nombreuses espèces se seraient multipliées sur le sous-continent indien lors de sa dérive entre l'Afrique et l'Asie, et auraient survécu, à bord de cette arche de Noé, au cataclysme survenu vers -65 millions d'années. La traversée aurait duré quelque 75 millions d'années (entre -130 et -55 millions d'années), du moment où le sous-continent indien s'est séparé de la plaque Africaine jusqu'à celui où il aurait touché la plaque eurasiennne. Alors certains vertébrés auraient recolonisé le monde selon ce nouveau scénario *Out of India*.

En analysant le patrimoine génétique des grenouilles *Ranidae* actuelles, F. Bossuyt et M. Milinkovitch ont montré que les grenouilles de Madagascar et d'Inde forment deux groupes qui ont divergé au moment où ces deux masses de terre se sont séparées. Cette séparation a eu lieu il y a 88 millions d'années. À partir de ce moment-là, les grenouilles qui se trouvaient du côté de Madagascar ont évolué vers les espèces actuelles typiques de cette région, tandis que celles restées sur la plaque qui allait devenir l'Inde

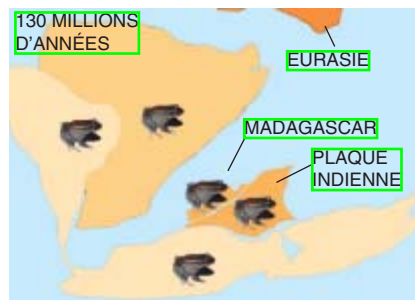
ont évolué vers les espèces actuelles endémiques d'Inde.

La séparation de l'Inde et de Madagascar est l'événement clé de l'histoire des *Ranidae* qui est à la base de la reconstruction de leur arbre généalogique. Cet arbre nous apprend ainsi que certaines lignées ancestrales de grenouilles se sont multipliées au cours du Crétacé sur la plaque indienne et sur celle de Madagascar. Certaines se sont éteintes au moment du cataclysme, mais d'autres ont subsisté jusqu'au moment de la collision de la plaque indienne et de la plaque asiatique, il y a 55 millions d'années : une fois la jonction établie, les espèces qui avaient été apportées par la plaque à la dérive ont commencé à coloniser le reste du monde. Ce scénario expliquerait pourquoi tant de lignées de *Ranidae* vivent en Indonésie, en Chine du Sud et aux Philippines : elles y sont beaucoup plus nombreuses que dans le reste du monde. Il justifierait aussi que les premiers fossiles du genre *Rana* apparaissent en Europe seulement il y a une trentaine de millions d'années (bien après la jonction Inde-Asie).

Toutefois, cette vision des vertébrés issus de l'Inde s'oppose à la théorie *Out of Africa*, qui postule que les animaux auraient colonisé le monde via l'Eurasie en partant d'Afrique après le cataclysme ayant abouti à l'extinction des dinosaures. Selon l'équipe de Bruxelles, ce dernier scénario a plusieurs points faibles : il n'explique pas le petit nombre d'espèces de *Ranidae* d'Afrique, ni les similitudes entre les *Ranidae* d'Inde et de Madagascar. On conçoit difficilement comment ces amphibiens, quittant les côtes africaines, auraient traversé l'océan sur plusieurs milliers de kilomètres, pour atteindre le continent indien.

Si la biodiversité des *Ranidae* a été préservée sur la plaque continentale de l'Inde lors de sa traversée d'Afrique vers l'Inde entre -130 et -55 millions d'années, alors des centaines d'autres espèces appartenant à divers groupes d'animaux, notamment des mammifères, ont vraisemblablement survécu de la même façon avant de débarquer sur le continent de l'Eurasie. Ce radeau à la dérive aurait été une planche de salut pour de nombreuses espèces.

Sébastien BOHLER



Il y a 88 millions d'années, une plaque s'est séparée de Madagascar, entraînant avec elles divers animaux, dont les grenouilles *Ranidae*. Durant le cataclysme qui eut lieu il y a 65 millions d'années et qui provoqua l'extinction des dinosaures, de nombreuses espèces disparurent. Lorsqu'il y a 56 millions d'années, la plaque, qui allait devenir l'Inde, toucha la plaque eurasiennne, les animaux qui y avaient survécu, notamment les *Ranae*, commencèrent à coloniser ce continent. Les espèces de *Ranidae* d'Inde et de Madagascar ont évolué indépendamment.

Vous cherchez de l'Information Scientifique et Technique ?

//www.inist.fr

L'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

Les caprices des marées

BERNARD SIMON

Contrairement à une idée reçue, les marées ne sont pas des phénomènes périodiques. Grâce aux mesures recueillies par les marégraphes et par les satellites, elles sont désormais modélisées avec précision.

On consulte les annuaires des marées comme des annuaires téléphoniques, pourtant les marées constituent un véritable casse-tête. D'un port à l'autre, à quelques kilomètres de distance, les amplitudes varient parfois de plusieurs mètres. À travers le monde, les différences sont encore plus marquées : la marée atteint une hauteur de 16 mètres dans la baie de Fundy, au Canada, tandis qu'elle est imperceptible en mer Noire. Même en plein océan Atlantique, il existe des points où le niveau de la mer ne fluctue jamais ! Les origines astronomiques des marées (l'influence de la Lune et du Soleil) sont connues depuis longtemps, mais des paramètres terrestres, tels le relief des fonds sous-marins, la profondeur de la mer, le profil des côtes notamment, compliquent le phénomène.

Le niveau des mers croît et décroît au cours de la journée, mais aussi au cours des siècles. Au dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, le niveau moyen des mers était sans doute situé 120 mètres au-dessous de celui d'aujourd'hui. Des marégraphes, situés le long des côtes, mesurent en continu le niveau de la mer, par exemple depuis le XVIII^e siècle à Brest ; on connaît ainsi son évolution moyenne sur de longues périodes. D'après les séries de mesures disponibles, le niveau moyen de la mer s'élèverait en de nombreux sites côtiers, mais il serait hasardeux d'en tirer une conclusion applicable à tous les océans. Aujourd'hui, techniques spatiales, marégraphes numériques et ordinateurs ultra-puissants, tout est mis en œuvre pour le suivi et la prévision de l'évolution du niveau des mers.

La légende des marées

Avant notre ère, les marées, décrites par des voyageurs lointains, tel le Grec Pythéas, étaient souvent considérées comme des légendes ou, du moins, comme des phénomènes exagérés ! Avant Newton et la théorie de la gravitation, les marées ont parfois donné lieu à des interprétations hasardeuses, voire farfelues. Toutefois, dès le début de notre ère, Plin l'Ancien fit une description correcte des marées, qui établit le lien avec le mouvement apparent de la Lune.

Sur les côtes européennes de l'Atlantique et de la Manche, la marée se manifeste comme une variation de la hauteur d'eau entre un minimum, la basse mer, et un maximum, la

VARIATION
DU NIVEAU
MOYEN DES MERS

23

0

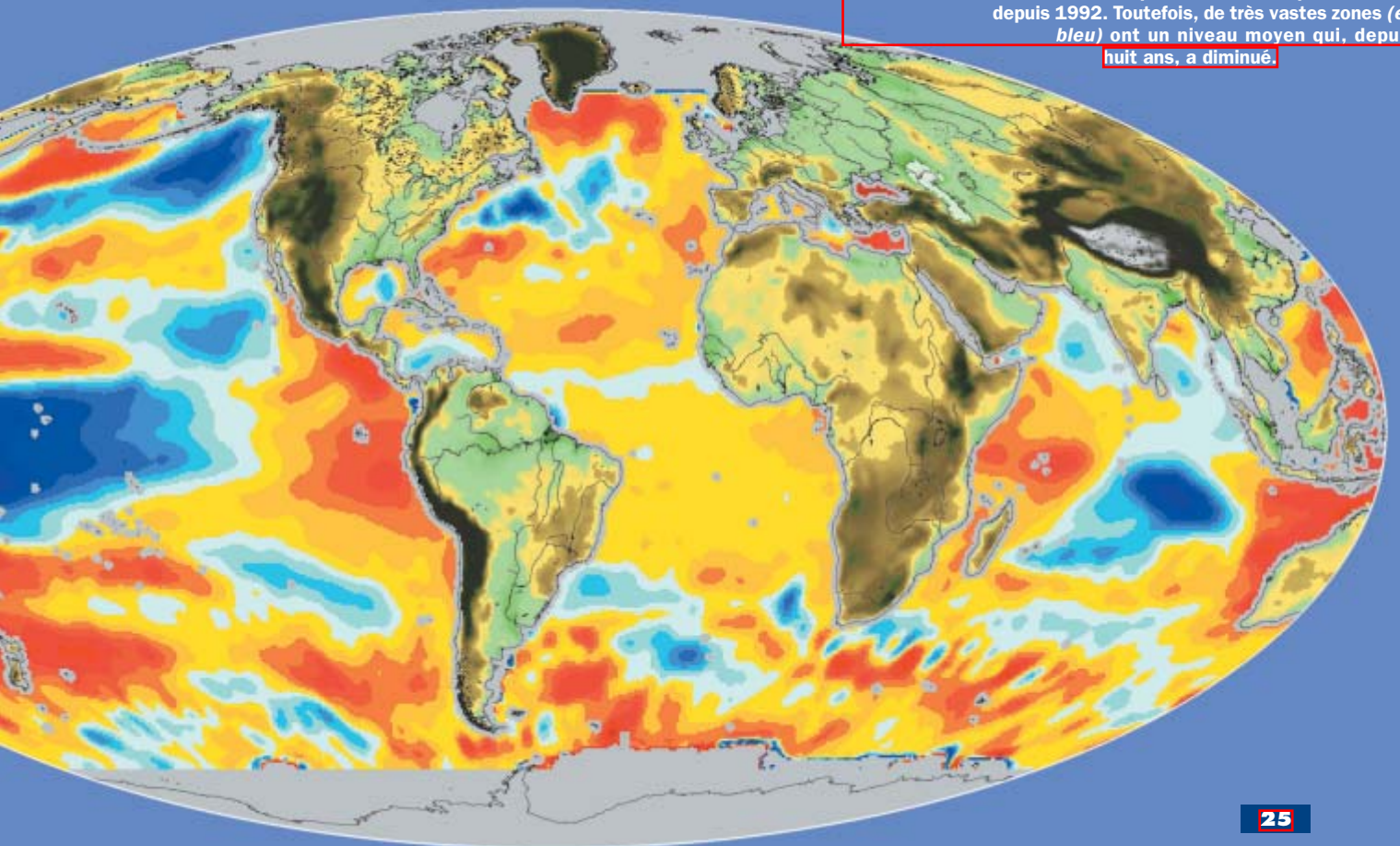
-22

MM/AN

EN L'AN 2000, LE NIVEAU MOYEN DES MERS EST ÉVALUÉ À 23 MM/AN



1. LE NIVEAU MOYEN DES MERS AUGMENTE (en rouge), d'après les mesures effectuées par le satellite *Topex-Poséidon* depuis 1992. Toutefois, de très vastes zones (en bleu) ont un niveau moyen qui, depuis huit ans, a diminué.



pleine mer. Les maxima (ou les minima) se succèdent toutes les 12 heures et 25 minutes en moyenne. La marée est provoquée par l'attraction gravitationnelle de la Lune, mais la pleine mer a toujours un retard sur la culmination de la Lune, c'est-à-dire sur le moment où la hauteur de la Lune au-dessus de l'horizon est maximale. Ce retard, presque constant, diffère d'un point à l'autre, mais, à un endroit donné, il s'écarte assez peu d'une valeur moyenne, que les marins nomment établissement moyen.

Au premier abord, la marée se manifeste comme une variation cyclique de la hauteur d'eau. La Lune tourne autour de la Terre dans le même sens de rotation que celle-ci, et on définit le jour lunaire comme l'intervalle entre deux passages de l'astre par le plan méridien d'un lieu (le plan méridien est le plan qui contient l'axe de rotation de la Terre et la verticale au-dessus de l'observateur). Le jour lunaire est un peu plus long que le jour solaire, de 50 minutes environ : si la Lune se situe au-dessus d'un point terrestre à midi, le lendemain, elle ne s'y trouvera qu'à midi et 50 minutes (environ). Ainsi, chaque jour, la pleine mer a lieu approximativement 50 minutes plus tard que le jour précédent (de même que la basse mer).

L'amplitude des marées subit aussi des variations cycliques entre des maxima, nommés vives-eaux, et des minima, nommés mortes-eaux, qui se succèdent tous les 14 à 15 jours, au rythme des demi-lunaisons. Les vives-eaux ont toujours lieu après une durée nommée l'âge de la marée, qui suit une pleine Lune ou une nouvelle Lune, événements astronomiques regroupés sous le nom de syzygies, lors desquels la Terre, la Lune et le Soleil sont situés dans le même plan méridien. Dans cette configuration où la Lune et le Soleil sont en conjonction ou en opposition par rapport à la Terre, les forces d'attraction de la Lune et du Soleil respectivement s'ajoutent ou se retranchent. L'âge de la marée est, comme l'établissement moyen, différent d'un point à l'autre, mais il est à peu près constant en un lieu donné.

Grâce à l'âge de la marée, on prévoit les horaires des vives-eaux et des mortes-eaux, car les jours de syzygie, les pleines mers et les basses mers ont lieu approximativement à la même heure. Ces jours-là, le Soleil et la Lune sont dans le même plan méridien. Lorsque le Soleil passe dans le plan méri-

dien de l'observateur, il est midi solaire (lorsque le Soleil est sur le plan méridien supérieur) ou minuit solaire (lorsque le Soleil est sur le plan méridien inférieur). Donc la pleine Lune ou la nouvelle Lune ont aussi lieu à midi ou à minuit, soit à zéro heure solaire. Or, la pleine mer a lieu, comme on l'a vu, avec un retard à peu près constant (égal à l'établissement moyen) sur le passage de la Lune. Ainsi, en additionnant le retard par rapport au passage de la Lune (l'établissement moyen) et celui spécifique à la pleine Lune ou à la nouvelle Lune (l'âge de la marée) à zéro heure solaire, on obtient l'heure (en temps solaire) de la pleine mer ou de la basse mer un jour de vives-eaux.

Une ou deux marées par jour?

De nombreuses caractéristiques des marées échappent à une interprétation simple. Ainsi, les observations effectuées le long des côtes qui nous sont familières ne sont pas universelles. En effet, dans le monde, les marées n'ont pas toujours la même fréquence. À Brest, la marée présente deux pleines mers et deux basses mers par jour : elle est dite semi-diurne. Ce type de marée est dominant en Atlantique, mais, dans l'océan Pacifique, il est fréquent d'observer des marées de type diurne, où une seule pleine mer et une seule basse mer ont lieu par jour, comme à Udaça en Sibérie. Il existe aussi des marées semi-diurnes dites à forte inégalité diurne, comme à San Diego, en Californie, où les pleines mers et les basses mers ont des amplitudes très différentes au cours d'une même journée et, enfin, des marées mixtes, parfois diurnes, parfois semi-diurnes.

Dans l'Atlantique, lorsque des types de marées différents du semi-diurne dominant apparaissent, par exemple à l'Est de Terre-Neuve ou au voisinage des Antilles, la partie semi-diurne disparaît presque et laisse apparaître la composante diurne, pourtant très faible. Les deux composantes diurnes et semi-diurnes (nous reviendrons sur leur origine) coexistent plus ou moins dans toutes les marées. Une marée qualifiée de semi-diurne, comme celle de Brest, présente, en réalité, des inégalités diurnes.

Pourquoi une marée par jour à Udaça et deux à Brest? Un peu de théorie s'impose. La Terre, soumise à l'action gravitationnelle exercée par un

astre, subit une accélération dirigée vers l'astre, telle que, selon le principe d'équivalence, la force d'attraction est équilibrée par la force d'inertie. Cette force inertielle est la force centrifuge, appliquée en tout point de la Terre au cours de son mouvement autour du centre de masse du système composé par la Terre et par l'astre. Au centre de la Terre, cet équilibre est parfait : un observateur y serait soumis à une force nulle. Alors que la force d'inertie reste identique pour tout point de la Terre, la force d'attraction, fonction de la distance à l'astre, est variable : plus le point terrestre est proche de l'astre, plus la force est importante. La différence entre ces deux forces constitue la force génératrice de la marée (voir la figure 3).

La force génératrice atteint sa valeur maximale lorsque l'astre est au zénith (la verticale supérieure) et au nadir (la verticale inférieure). En revanche, lorsque l'astre se trouve à l'horizon, la force est minimale. La Lune est le moteur principal de la force génératrice de marée, la part du Soleil est légèrement inférieure à la moitié de celle de la Lune, et celle des planètes est négligeable. En calculant la force génératrice grâce à la construction dite de Proctor et en étudiant ses variations au cours de la rotation de la Terre autour de son axe polaire, on met en évidence les différents types de marées (voir l'encadré de la page 29), en fonction de la latitude de l'observateur et de la déclinaison de l'astre (l'angle entre la direction de l'astre et le plan de l'équateur). Cette construction géométrique fait apparaître les deux périodes fondamentales effective-

2. TOUTES LES MAREES DU MONDE N'ONT PAS LA MÊME PÉRIODE. Quatre types majeurs de marées existent dans le monde : le type «semi-diurne», comme à Brest, présente deux pleines mers et deux basses mers par jour ; le type «diurne», par exemple à Udaça en Sibérie, n'a qu'une pleine mer et qu'une basse mer par jour ; et le type «semi-diurne à forte inégalité diurne», comme à San Diego, en Californie, avec des pleines mers ou des basses mers de hauteurs très différentes au cours d'une même journée. D'autres marées sont mixtes (semi-diurnes et diurnes, en alternance). Le type semi-diurne (en bleu) domine dans l'Atlantique et le type semi-diurne à inégalité diurne, dans le Pacifique (en vert). Les marées sont variées dans l'océan Indien. Partout, on trouve des marées diurnes (en rouge) et des marées mixtes (en jaune). Les amplitudes des marées dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien varient sans lien avec le type de marée des plus faibles (en vert foncé) aux plus fortes (en rouge).

vement observées, diurne et semi-diurne, qui, en se superposant, sont à l'origine de tous les types de marées.

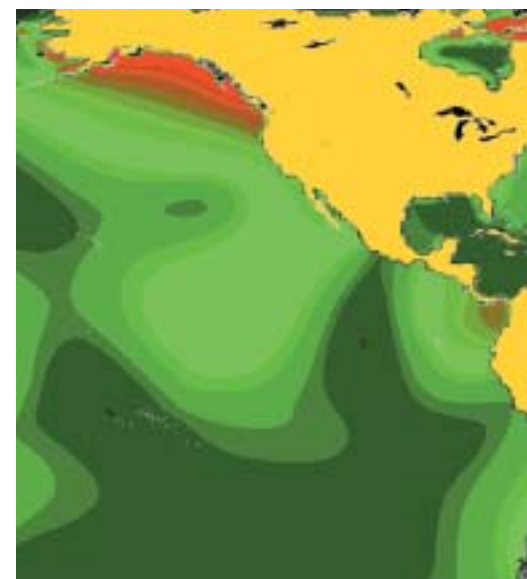
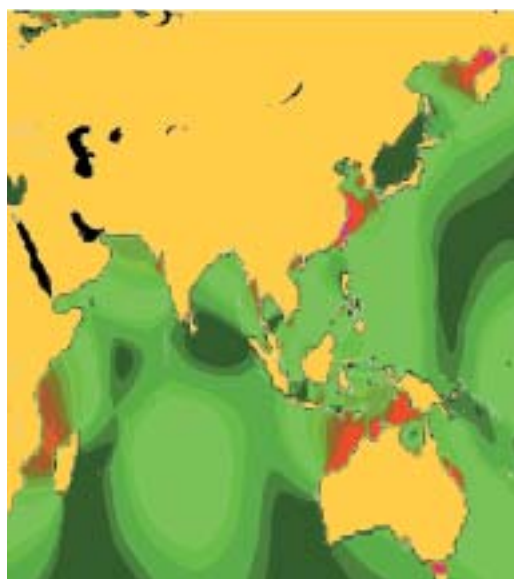
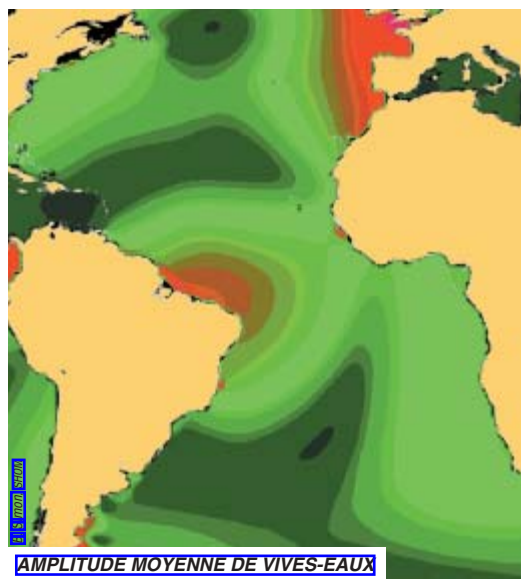
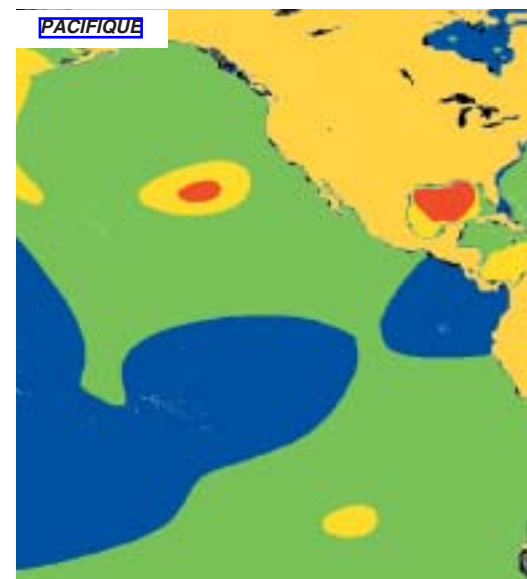
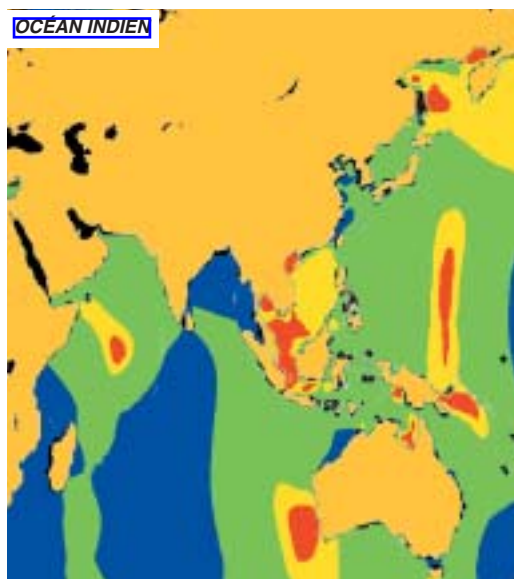
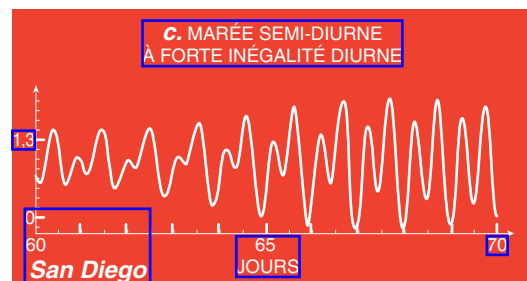
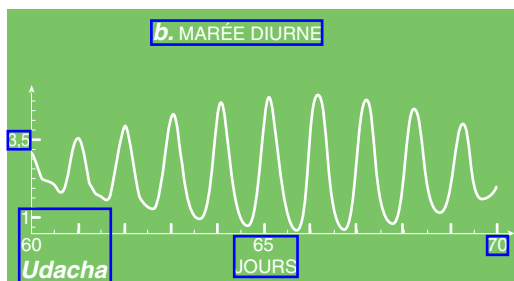
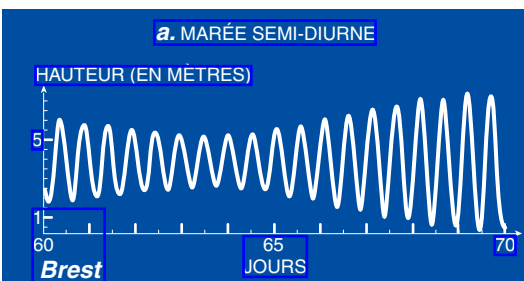
Les marées ne sont pas périodiques

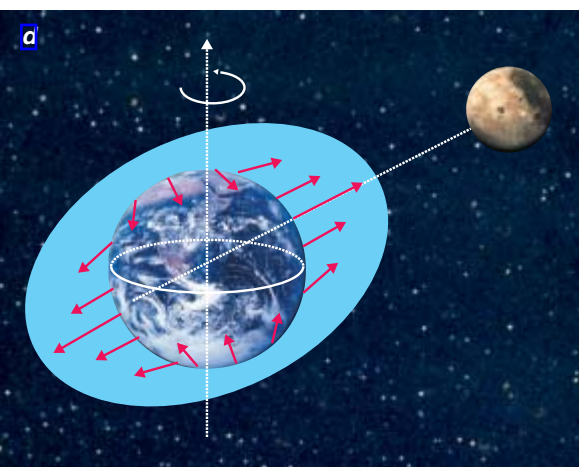
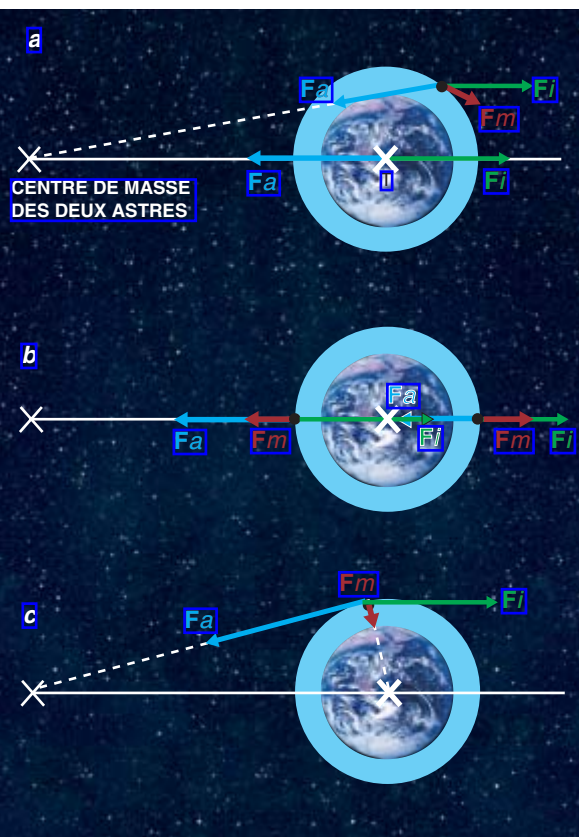
Étudions désormais les variations de la force génératrice de marée en fonction des mouvements réels des astres (la Lune et le Soleil). Les choses se compliquent ! La force génératrice présente des variations très subtiles, tant

les mouvements relatifs de la Terre, de la Lune et du Soleil sont complexes (voir la figure 4). Ces mouvements n'ont pas de solution analytique, mais peuvent toutefois être décrits à l'aide de cinq paramètres indépendants : la période de révolution de la Lune (27,32158 jours) ; la période de révolution du Soleil (365,24219 jours) ; la période de révolution du périhélie lunaire (8,84753 ans) ; la période de révolution des nœuds de la Lune (18,61336 ans) ; et la période de révolution du périhélie

solaire (209,36 siècles). À ces périodes, on ajoute la période de rotation de la Terre, de 24 heures (en moyenne).

Considérons un observateur terrestre qui suit les mouvements apparents de la Lune et du Soleil, supposés situés sur une sphère éloignée, telle que leur direction est considérée comme constante d'un point à l'autre de la Terre. Les périodes de la Lune et du Soleil n'étant pas égales, l'angle entre leurs plans méridiens varie de façon continue. Lorsqu'il est nul ou





3. LA FORCE GÉNÉRATRICE DES MARÉES est la résultante de la force d'attraction F_a et de la force d'inertie F_i (a). La Terre, soumise à l'action gravitationnelle d'un astre, subit une force d'attraction F_a compensée par la force d'inertie F_i (la force centrifuge) en tout point du Globe. Au centre de la Terre, les deux forces se compensent exactement. À la surface, la force d'attraction l'emporte lorsque l'astre est au-dessus de l'horizon. En revanche, la force d'inertie, identique en tout point, est supérieure lorsque l'astre est au-dessous. La force génératrice F_m des marées est maximale lorsque l'astre se trouve au zénith et au nadir (b). Elle est minimale lorsqu'il se trouve à l'horizon (la direction de l'astre fait un angle de 90 degrés avec la verticale au point d'observation) (c). Au final, à un instant donné, la répartition de la force génératrice des marées en tout point de la Terre a une forme de bourrelets (d).

égal à 180 degrés, la situation correspond à la syzygie d'après la construction de Proctor : les forces génératrices de la marée provoquées par le Soleil et la Lune s'ajoutent et engendrent une force résultante qui est, comme nous l'avons vu, maximale.

L'amplitude de la force varie au rythme des lunaisons, mais d'autres périodes jouent également un rôle. La composante semi-diurne est maximale lorsque l'astre passe dans le plan de l'équateur : s'il s'agit du Soleil, la situation correspond à l'équinoxe de printemps ou d'automne. Quand la Lune se trouve également au voisinage de l'équateur lors des équinoxes, le maximum de la force génératrice est encore plus élevé. Ce sont les grandes marées d'équinoxe. Deux configurations peuvent contribuer à augmenter encore ce maximum : quand le périgée lunaire et quand le nœud ascendant approchent le plan de l'équateur (les périgées sont, sur les orbites, les points orbitaux les plus proches de la Terre et les nœuds sont les intersections de l'orbite de la Lune et de l'écliptique. Le nœud ascendant est l'intersection dans le sens Sud-Nord et le nœud descendant dans l'autre sens).

Parmi les cinq paramètres utilisés pour décrire les mouvements de la Lune et du Soleil, la période de révolution du périgée lunaire est voisine de la moitié de celle du nœud ascendant. Cette propriété est probablement à l'origine de l'opinion très répandue, mais fautive, que la période des nœuds lunaires constitue une période de la marée. Certes, une configuration des positions relatives du périgée et du nœud lunaire se retrouve environ tous les 18,61 ans, simplement décalée de 37 degrés. Toutefois, ce décalage augmente à chaque révolution du nœud lunaire, et il faut attendre près de 180 années pour retrouver une configuration voisine. En fait, aucun des cinq paramètres qui décrivent les mouvements des astres n'a de période commune. Les périodes des événements astronomiques en jeu dans les marées sont incommensurables deux à deux. Par conséquent, et contrairement à une idée reçue, la force génératrice de marée n'est pas périodique, et la marée elle-même n'est donc pas un phénomène strictement périodique ! Les marées ne reviennent pas avec la régularité d'un métronome, mais de cinq à la fois qui, chacun battant à un rythme différent, se superposeraient de façon complexe.

Grâce à la description des mouvements des astres, on explique certaines

caractéristiques des marées, telle l'apparition des maxima, mais d'autres, telles les variations de l'amplitude d'un point à l'autre dans l'océan, échappent encore à cette explication. Elles semblent indépendantes de la répartition géographique de la force génératrice à la surface du Globe. En effet, la force génératrice ne représente pas le déplacement réel des masses d'eau océaniques. La surface océanique a, comme nous allons le voir, un comportement très différent.

Des ondes sur la mer

En 1775, soit près d'un siècle après les travaux de Newton, Laplace (1749-1827) introduisit le potentiel générateur de la marée dans une théorie présentée à l'Académie Royale des sciences. Il développa ensuite cette idée et l'exposa en 1799 dans son *Traité de mécanique céleste*. Il fut le premier à traiter la marée comme un problème de mouvement de masses d'eau, et non plus comme un problème statique. Les équations hydrodynamiques formulées par Laplace restent à l'origine de tous les développements ultérieurs et elles permirent d'établir une formule dite de Laplace, applicable aux prévisions. Cette formule s'appuie sur deux principes : les masses d'eau soumises à une force périodique oscillent avec une période identique à celle de la force qui engendre les oscillations (principe des oscillations forcées) ; le mouvement global d'un système soumis à de petites forces est égal à la somme des mouvements élémentaires (principe de la superposition des petits mouvements). En bref, ces principes posent l'hypothèse de la linéarité de la réponse des océans à la force génératrice de marée. Laplace admet que, puisque la force génératrice de marée peut être décomposée en forces périodiques élémentaires, la marée elle-même peut être décomposée en oscillations de mêmes périodes.

Selon le point de vue de Laplace, toujours valide aujourd'hui, sous l'action de la force génératrice de marée, des ondes sont engendrées et diffusées à travers les océans. Ces ondes se propagent à des vitesses qui dépendent de la profondeur. Comme toutes les ondes, elles sont réfléchies, réfractées ou dissipées en fonction des conditions de propagation du milieu. Elles peuvent interférer entre elles, renforcer ou, au contraire, atténuer certaines fréquences. La marée observée en un point est le résultat de la superposition de toutes ces ondes élémentaires, qui arrivent de

tous les points des océans et qui, chacune sur leur trajet, ont rencontré des conditions de propagation différentes.

Quand on représente les points de l'océan où la pleine mer est atteinte à la même heure, des lignes apparaissent, nommées lignes cotidales (voir la figure 5). Elles se coupent en des «points amphidromiques». Les ondes de marées tournent autour de ces «nœuds», qui correspondent à une amplitude quasi nulle des marées. Dans l'océan, il existe des points où la marée est presque nulle, bien que la Lune y exerce une force d'attraction comme en tout point de la Terre. Cette description est très éloignée du schéma simpliste, qui décrit les marées comme des bourrelets liquides en direction de la Lune.

L'hypothèse de linéarité proposée par Laplace s'applique très bien aux marées observées par grande profondeur, lorsque la hauteur d'eau est très

supérieure à la dénivellation due aux marées. En revanche, près des côtes, la proximité du fond a deux effets notables : d'une part, l'écoulement turbulent près du fond provoque une dissipation d'énergie assimilable à un frottement ; d'autre part, la vitesse de l'onde de marée augmentant avec la profondeur, l'onde de marée se déplace plus vite lors des pleines mers que lors des basses mers. Ces phénomènes hydrauliques complexes déforment la courbe de marée près des côtes, et la réponse de la mer à la force génératrice n'est plus linéaire. La bathymétrie prend alors beaucoup d'importance, et des combinaisons de fréquences fondamentales apparaissent au cours de la propagation dans les zones de faible profondeur. Les prévisions précises de la marée se sont longtemps heurtées à cette difficulté. La méthode dite harmonique la résout : elle consiste à développer la force géné-

ratrice en composantes harmoniques élémentaires. Elle a été mise au point grâce aux travaux de l'école britannique initiée par lord Kelvin, puis développée jusqu'à fournir une méthode universelle de prévision des marées. Elle s'appuie sur une formulation théorique dont certains paramètres restent à déterminer expérimentalement, par l'analyse, dite harmonique, des observations issues des marégraphes. Les paramètres locaux sont suffisamment précis pour les prévisions usuelles, à condition que les mesures soient enregistrées sur de longues durées, pendant une année au moins pour des marées dont l'amplitude est comparable à celles des côtes françaises de la Manche ou de l'Atlantique. Cette méthode présente l'inconvénient de ne permettre des prévisions que où existent des observatoires de marées (le long des côtes ou en mer, lors de campagnes de mesures).

LA CONSTRUCTION DE PROCTOR

La force génératrice des marées est représentée en tout point grâce à la règle dite de Proctor. Elle donne la direction et le module relatif de la force génératrice en tout point M de la Terre. Les différents types de marées (diurne, semi-diurne, semi-diurne à forte inégalité diurne) trouvent leur origine dans les variations de la force génératrice, en fonction de la latitude φ de l'observateur M et la déclinaison δ de l'astre (l'angle entre sa direction et l'équateur) quand la Terre tourne sur elle-même. La construction est simple. Le point P est la projection de M sur la direction de l'astre qui passe par le centre de la Terre T . D'après des considérations géométriques et en supposant que la distance de l'astre (la Lune ou le Soleil) est suffisamment grande pour que sa direction soit considérée comme fixe vue de tout point de la Terre, le point F se positionne sur cette même droite de telle sorte que $TF = 3 \times TP$. Le vecteur MF représente la force génératrice F_m de la marée au point M . Lorsque la Terre tourne sur elle-même, le point M passe par les points M_1, M_2, M_3 à différents moments d'une journée (M_1 et M_3 sont par exemple décalés de 12 heures).

a) Marée semi-diurne à inégalité diurne

La force génératrice F_m est maximale quand M se situe en M_1 . Quand la Terre tourne sur elle-même, F_m diminue. Elle est minimale en

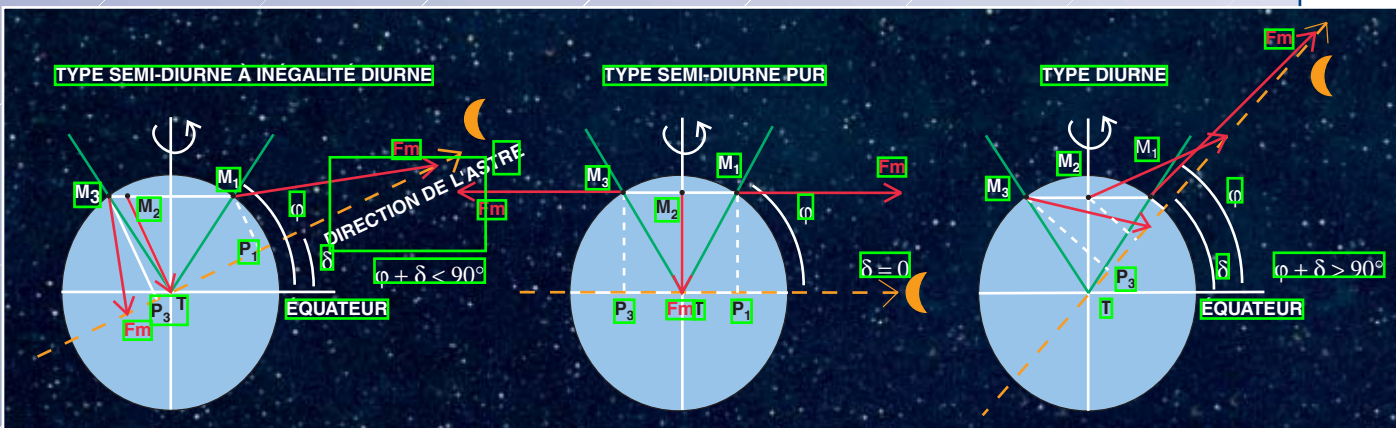
$M = M_2$ (F_m est dirigée vers T), puis augmente à nouveau pour atteindre un deuxième maximum, dit maximum secondaire (en M_3). Elle décroît ensuite jusqu'au minimum M_2 , et augmente jusqu'à la position M_1 initiale. Au final, en 24 heures, F_m présente deux maxima de module différent : la marée est de type semi-diurne à inégalité diurne. C'est le cas dans les zones géographiques situées hors de l'équateur, à une latitude telle que la somme de la latitude et de la déclinaison soient inférieures à 90 degrés.

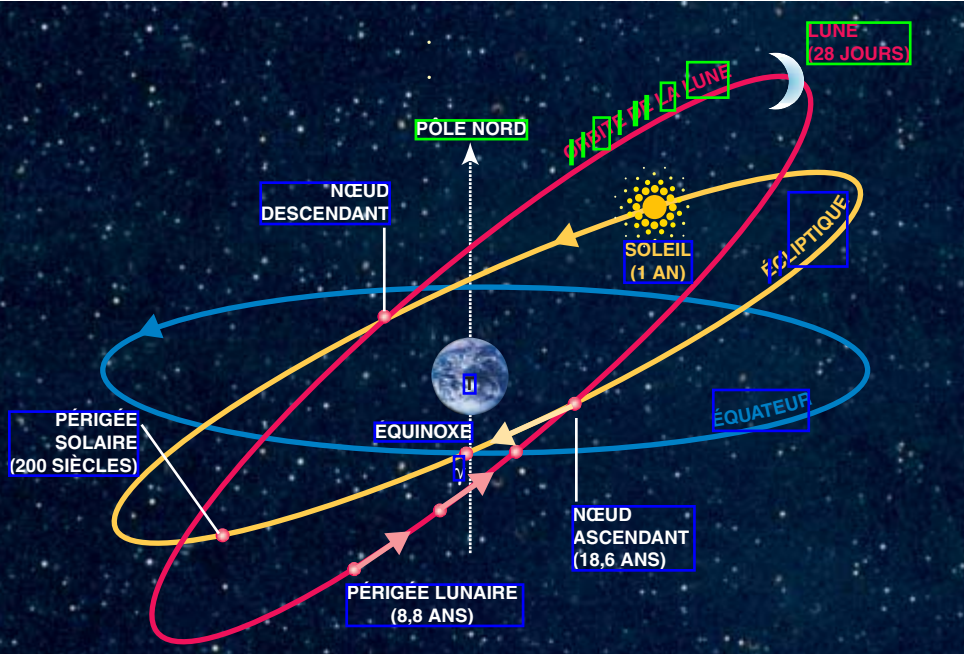
b) Marée semi-diurne pure

La force génératrice F_m présente aussi deux maxima par jour, mais le maximum secondaire en M_3 est de même valeur qu'en M_1 . Le même jour, les marées ont la même amplitude : elles sont de type semi-diurne «pur», ce qui se produit quand l'astre est situé dans le plan de l'équateur ($\delta = 0$).

c) Marée diurne

La force génératrice F_m est maximale en M_1 . Elle diminue de façon continue jusqu'à M_3 , puis elle augmente à nouveau. En 24 heures, F_m n'est passée que par un seul maximum : il y a une seule marée par jour. Ce cas concerne les régions telles que la somme de la latitude et de la déclinaison soient supérieures à 90 degrés.





4. LA LUNE ET LE SOLEIL SONT RESPONSABLES DES MAREES (la part du Soleil étant inférieure à la moitié de la force engendrée par la Lune). Les mouvements apparents sont représentés par rapport à un observateur terrestre fixe central. L'orbite de la Lune, celle du Soleil (nommée écliptique) et le plan de l'équateur sont représentés par des ellipses. L'intersection de l'écliptique et de l'équateur, nommée le point vernal, correspond au passage du Soleil de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord au moment de l'équinoxe de printemps. Les nœuds, ascendant dans le sens Sud-Nord et descendant sinon, sont situés aux intersections de l'orbite de la Lune et de l'écliptique. Les périgées sont, sur les orbites, les points les plus proches de la Terre. Leurs mouvements apparents provoquent des marées plus ou moins importantes, dont les amplitudes fluctuent avec des périodes complexes, combinaisons de cinq périodes de révolution différentes (celles de la Lune, du Soleil, du périgée lunaire, solaire et des nœuds de la Lune). Par exemple, les marées ont des amplitudes maximales aux nouvelles Lunes et aux pleines Lunes, aux équinoxes, et quand le périgée lunaire et le nœud ascendant approchent le plan de l'équateur. Comme les périodes sont incommensurables deux à deux, les marées ne sont pas des phénomènes périodiques.

Une approche globale des marées

Une approche plus ambitieuse que la méthode harmonique consiste à résoudre directement le problème physique de la formation et de la propagation des ondes de marée dans leur milieu. Les pionniers de cette méthode sont D. Bernoulli, W. Whewell, H. Poincaré et J. Harris. Compte tenu de la complexité de la bathymétrie et du profil de côtes, il n'était pas envisageable d'obtenir des solutions exactes sans de puissants moyens de calcul. Des solutions analytiques ont néanmoins été trouvées qui expliquent à grands traits la propagation de la marée dans des bassins océaniques et qui rendent compte de l'existence de points amphidromiques.

La résolution pratique des équations de l'hydrodynamique pour les ondes de marée n'a été possible qu'à partir des années 1970. La méthode consiste à découper le domaine étudié (une partie de l'océan) en éléments à géométrie simple, nommés mailles, et à leur appliquer deux principes fondamentaux : le principe de conservation et le principe fondamental de la dynamique. D'après le principe de conservation, la varia-

tion de la hauteur d'eau dans une maille résulte de la différence entre la quantité d'eau qui y entre et celle qui en sort. Cette différence dépend des courants qui traversent les bords des mailles. Le principe fondamental de la dynamique indique que les variations de vitesse des courants dans une maille dépendent des forces extérieures qui s'exercent sur la colonne d'eau contenue dans la maille. Ces forces sont de trois types : les forces de pression dues aux différences de hauteurs d'eau entre les mailles voisines, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre qui tend, dans l'hémisphère Nord, à infléchir la direction du courant vers la droite, et les forces de freinage, assimilables à des frottements au voisinage du fond et des parois des mailles.

Toutes les mailles sont interdépendantes, et le problème est résolu de façon globale. Les mouvements n'existent qu'à condition d'être induits par un «moteur», constitué ici par la force génératrice et la marée aux bords du domaine étudié. En pratique, le choix de la dimension des mailles est fondamental : plus elle est petite, plus la résolution est élevée. En contrepartie, plus les mailles sont petites, plus les calculs sont longs.

Aujourd'hui, un des défis majeurs consiste à améliorer la connaissance des profondeurs. Il serait illusoire d'améliorer la résolution d'un modèle si la description du milieu n'était pas réalisée à une échelle équivalente. De ce point de vue, les cartes marines sont peu aptes à fournir une bathymétrie adaptée à la modélisation. Elles font ressortir les éléments qui intéressent la sécurité de la navigation, les reliefs susceptibles de présenter un danger sont accentués, ce qui peut fausser la représentation des fonds. D'autre part, de nombreuses régions du Globe ne sont pas encore hydrographiées. En 1995, nous avons entrepris de constituer une base de données bathymétriques sous forme numérique, qui améliore la modélisation numérique de la marée.

D'importants progrès ont aussi été réalisés grâce aux mesures par satellites. Les techniques spatiales ont suscité un regain d'intérêt pour la modélisation des marées dans les océans. L'altimétrie satellitaire est fondée sur le principe du radar. La technique consiste à mesurer le temps de parcours aller et retour d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent à la surface de la mer. On en déduit la distance parcourue par les impulsions, et donc la hauteur du satellite au-dessus de la surface, avec une précision de quelques centimètres. Cette technique comporte un certain nombre de difficultés. D'abord, il faut connaître avec précision l'altitude du satellite à partir de stations situées sous sa trace. Trois techniques sont utilisées pour positionner le satellite : GPS (*Global Positioning System*, «système de positionnement global»), le système français de géodésie spatiale DORIS (*Doppler orbitography and radiolocation integrated by satellite*) ou la télémétrie laser. Ensuite, l'altimètre à bord doit être calibré en comparant le résultat de la mesure par satellite à une mesure directe par un marégraphe.

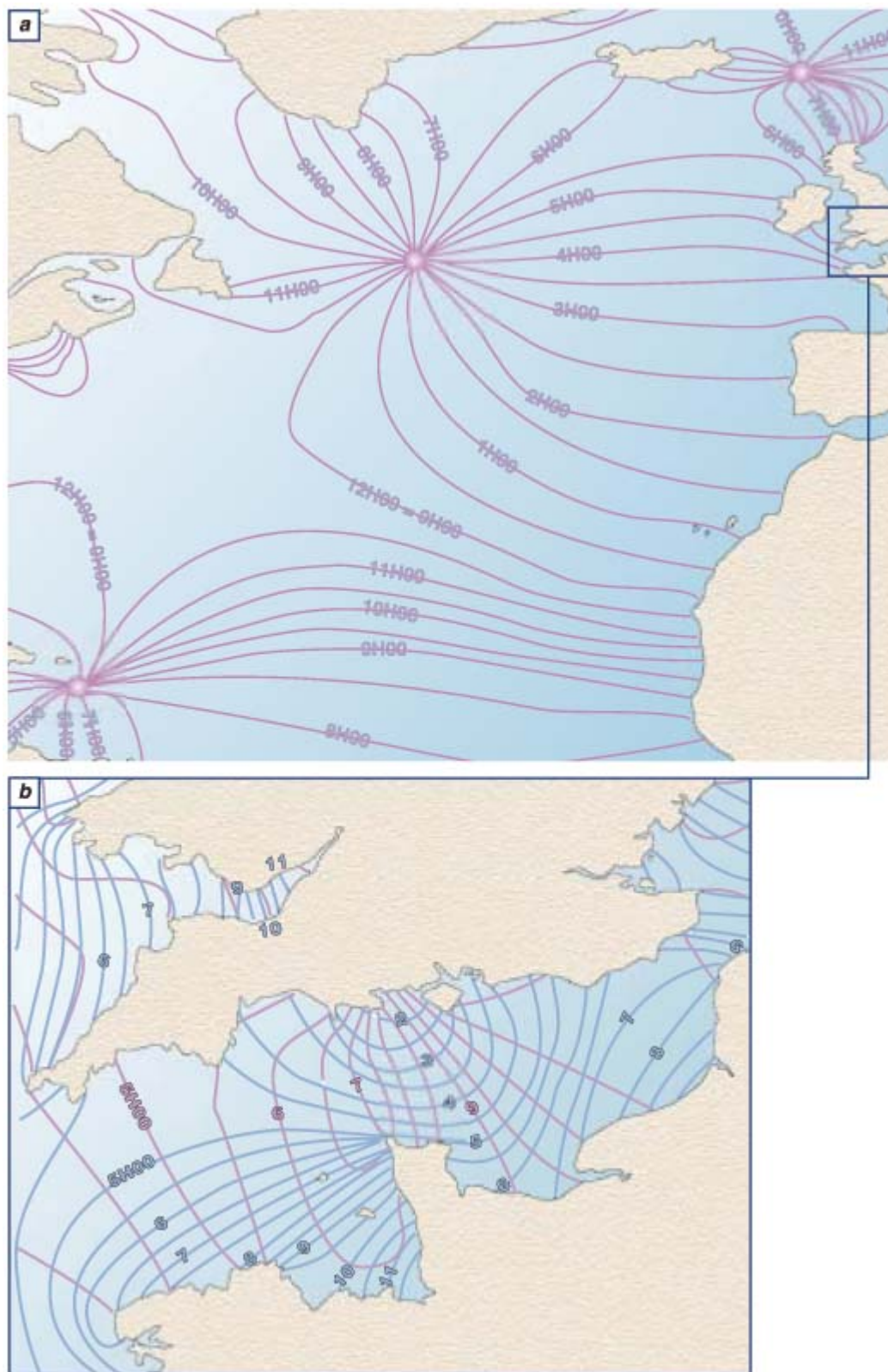
L'altimétrie satellitaire nécessite de disposer de stations marégraphiques de référence. Par ailleurs, elle ne fournit pas de données exploitables hors des traces des satellites, ni près des côtes (la trace du faisceau radar de l'altimètre sur la mer a un rayon d'une dizaine de kilomètres ; dès que le faisceau vise en partie une bande côtière, les mesures sont perturbées). Enfin, quelques jours séparent le survol d'un même point, ce qui pose des problèmes pour analyser des signaux de périodes plus courtes, tels ceux de la marée.

Le satellite *Topex-Poséidon*, lancé en 1992, utilise des altimètres radar pour effectuer des mesures du niveau de tous les océans (50 000 points mesurés par jour). Ces mesures, précises à trois centimètres près, servent à établir des cartes de topographie dynamique. Elles varient beaucoup en cours d'année et d'une année sur l'autre. Elles montrent toutefois qu'en huit ans, le niveau moyen des mers a augmenté de plus de 20 millimètres par an dans certaines régions, mais il a aussi diminué de 15 à 20 millimètres dans d'autres zones (voir la figure 1).

Les satellites apportent des progrès considérables, mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, ils ne vont pas remplacer les marégraphes. Au contraire, le rôle des marégraphes est renforcé pour la calibration en altimétrie et pour l'observation traditionnelle des marées. Les stations de Brest et de Marseille, sous la responsabilité du SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine) et de l'IGN (Institut géographique national), font partie du réseau mondial GLOSS (Global Sea-Level Observing System, «système d'observation global du niveau de la mer») de surveillance du niveau de la mer. Nous entretenons le Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM), qui regroupe, dans les principaux ports de France, des marégraphes côtiers numériques. Ils enregistrent en permanence la hauteur d'eau à l'aide d'appareils à ultrasons ou électromagnétiques, reliés par le réseau téléphonique et qui alimentent le fichier de données marégraphique du SHOM, à Brest.

La station marégraphique de Brest enregistre le niveau de la mer de façon quasi continue depuis le début du XIX^e siècle. Elle constitue une référence mondiale pour l'étude des évolutions à long terme. Le site de Marseille est également intéressant. En 1882, l'IGN y a installé un marégraphe pour déterminer le niveau moyen de la mer en Méditerranée, destiné à servir de référence pour les altitudes terrestres en France ; le marégraphe fonctionne toujours.

Les niveaux moyens annuels varient beaucoup en fonction de paramètres météorologiques (la force des vents, les champs de pression, etc.) et des courants océaniques. Les fluctuations sont si importantes que les durées d'enregistrement doivent atteindre un siècle pour que l'on puisse détecter une évolution à long terme. D'après les



5. L'ATLANTIQUE NORD (a) PRESENTE TROIS POINTS FIXES, où l'amplitude des marées est presque nulle. Ces «nœuds» se situent aux intersections des lignes dites cotidiales (en rose), où la pleine mer est atteinte au même instant. Les ondes de marées tournent autour de ces points amphidromiques. Dans l'Atlantique Nord-Est, les ondes de marée progressent du Sud au Nord. Dans la Manche (b), où l'on ne trouve pas de points amphidromiques, les lignes cotidiales (en rose) progressent d'Ouest en Est, signe que les ondes de marée se propagent dans cette direction (alors que les mouvements apparents de la Lune et du Soleil s'effectuent en sens inverse). Elles résultent d'une réfraction des ondes de l'Atlantique Nord sur le talus continental. Par ailleurs, d'après les lignes d'égales hauteurs d'eau (en bleu), l'amplitude des marées varie beaucoup entre le Nord et le Sud de la Manche.



L'IMAGES - J. VIGIER

6. PRES DES CÔTES, la réponse de la mer à la force génératrice n'est plus linéaire. Le relief des fonds prend beaucoup d'importance.

mesures des marégraphes à Brest et à Marseille, le niveau moyen a augmenté d'environ 12 centimètres en 100 ans.

Le rejet de dioxyde de carbone d'origine fossile dans l'atmosphère est souvent invoqué. Pourtant, l'élévation du niveau moyen à Brest était déjà sensible avant le début de l'ère industrielle et ne présente pas d'accélération perceptible, ce qui semble exclure cette hypothèse. À Marseille et dans d'autres sites méditerranéens, le niveau moyen de la mer décroît même depuis le début des années 1960. Cette diminution proviendrait d'une augmentation de la densité de la Méditerranée, due à un déficit de l'apport d'eau douce par les fleuves et les précipitations.

Les observations de Marseille et de Brest ne sont pas représentatives de l'ensemble de celles disponibles dans le monde sur de longues durées, qui révèlent, certes, une augmentation moyenne de l'ordre de 10 à 20 centimètres par siècle, mais qui présentent une dispersion très élevée d'un site à l'autre. En outre, ces observatoires sont surtout situés dans l'hémisphère Nord.

La croûte terrestre descend-elle?

La croûte terrestre n'est pas stable ; elle est soumise à des déformations élastiques dues à la force génératrice de marées qui s'exerce aussi sur la croûte (elle provoque des «marées terrestres»), à des déformations locales induites par les marées océaniques (la surcharge océanique) et à des mouvements d'origine sismique ou tectonique. Les marégraphes ne détectent pas ces mouvements verticaux de la croûte terrestre. Par conséquent, nous devons mesurer soit les élévations de la croûte terrestre, soit les variations du niveau de la mer par rapport à un repère absolu.

Grâce aux satellites, on positionne désormais, avec une précision centimétrique, des points terrestres et les niveaux des marégraphes dans un système de référence géocentrique nommé ITRS (*International terrestrial reference system*, «système de référence terrestre international»), un repère absolu, qui s'affranchit des repères terrestres.

Nous avons aussi entamé des campagnes annuelles de mesures gravimétriques. L'accélération due à la pesanteur varie comme l'inverse du carré à la distance au centre de la Terre. Nous mesurons l'accélération avec une précision suffisante pour détecter des variations de hauteur de quelques millimètres et nous surveillons ainsi l'évolution de la croûte terrestre localement.

La bathymétrie va profiter de ces progrès. L'une de nos missions est de fournir des cartes pour la navigation maritime. Les profondeurs portées sur ces cartes sont rapportées en principe au niveau des plus basses mers théoriques (par conditions météorologiques moyennes), nommé zéro hydrographique ou zéro des cartes. À proximité d'un observatoire de marées, le zéro est rapporté à des repères matériels. On calcule la profondeur que l'on veut porter sur la carte en retranchant à la profondeur mesurée par sondage la hauteur de marée lue au marégraphe et rapportée au zéro hydrographique. Cependant, les sondages au large posent des difficultés. Sans marégraphe, on a recours à la modélisation numérique de la marée et aux observations les plus proches (afin de prendre en compte les effets météorologiques, par exemple), mais la stabilité du zéro hydrographique positionné de cette manière n'est pas assurée. Depuis

quelques années, nous travaillons sur le principe suivant : la position de la surface moyenne de la mer fournie par l'altimétrie satellitaire et la surface instantanée au moment du sondage est mesurée à l'aide d'un GPS. On place ces deux surfaces dans le même repère ITRS et on positionne le zéro hydrographique par rapport au niveau moyen du point de sondage bathymétrique à l'aide de la modélisation numérique de la marée.

Les études locales progressent aussi beaucoup, grâce aux progrès des mesures. Même si, pour l'instant, l'influence de l'effet de serre n'est pas avérée, le niveau moyen des mers augmente de l'ordre de un à deux millimètres par an. Les prévisions des marées que nous établissons seront-elles fiables dans quelques années ? Comme la profondeur joue un rôle primordial dans le «comportement» de la mer, nous avons étudié l'impact d'une augmentation virtuelle de 60 centimètres du niveau des mers autour du Mont-Saint-Michel, à l'aide d'une modélisation numérique développée en collaboration avec le Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales à Toulouse (LEGOS). Nous avons montré que l'amplitude des marées diminuerait un peu : en vives-eaux, la diminution ne serait que de trois centimètres, ce qui représente seulement 0,2 pour cent pour ce site, où l'amplitude est exceptionnelle. Et ailleurs ? Des études restent à mener, mais elles sont difficiles à mettre en place, car elles requièrent une connaissance locale approfondie de la bathymétrie. Or, pas de mesures de la profondeur sans prévisions précises des marées, et pas de prévisions des marées sans bathymétrie précise : c'est l'histoire du poisson qui se mord la queue.

Bernard SIMON est ingénieur au Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

P. LAPLACE, *Traité de Mécanique Céleste*, 2 livre 4, 1799 et 5 livre 13, 1825.

H. POINCARÉ, *Leçons de mécanique Céleste*, Tome III - Théorie des marées, Gauthier-Villars, Paris, 1910.

B. SIMON et al, *La marée*, coll. Les guides du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 1997.

D. CARTWRIGHT, *Tides, a scientific history*, Cambridge University Press, 1999.

L'origine de l'élévation du niveau des océans

Le niveau des mers monte : lors de la dernière période glaciaire, il y a 21 000 ans, le niveau moyen des mers était inférieur de 120 mètres à celui d'aujourd'hui. D'où viennent les quelque 50 millions de kilomètres cubes d'eau supplémentaires ? Cet excès d'eau était alors stocké sous forme d'immenses calottes glaciaires, au Nord du continent américain et de l'Europe. Les glaciers continentaux étaient également plus étendus qu'aujourd'hui, et, dans nos régions, ils remplissaient le fond des vallées alpines. À mesure de la déglaciation, la température moyenne de la surface de la planète a augmenté d'environ 5 °C. Ces calottes et glaciers se sont rétractés, le niveau des mers a augmenté à une vitesse moyenne supérieure à cinq millimètres par an. Puis, il y a 6 000 ans, cette élévation s'est ralentie jusqu'à 0,5 millimètre par an, pour atteindre 0,1 à 0,2 millimètre par an seulement, en moyenne, au cours des derniers 2 000 ans.

En revanche, elle aurait brusquement augmenté au xx^e siècle, d'après les mesures effectuées depuis le début du siècle par des marégraphes. Toutefois, les marégraphes ne sont pas assez nombreux, ni assez bien répartis sur tous les océans pour que nous reconstituions sans ambiguïté les variations du niveau moyen global des mers. En outre, ils mesurent l'altitude de la surface de la mer par rapport à leur point d'ancrage, qui n'est pas forcément immobile. Ce dernier peut varier en fonction de l'activité tectonique, ou encore des mouvements de la croûte terrestre. La valeur de l'élévation du niveau des mers au xx^e siècle n'est, par conséquent, pas connue avec précision, mais elle est probablement comprise entre 10 et 20 centimètres.

Cette élévation rapide du niveau des mers provient-elle du réchauffement climatique actuel, qu'il soit dû ou non à l'activité humaine ? Des observations en surface montrent une augmentation moyenne globale de la température comprise entre 0,4 et 0,8 °C depuis la fin du xix^e siècle. Ce réchauffement climatique récent aurait peut-être provoqué une rétraction des glaciers et des calottes polaires. On observe en effet, depuis plus d'un siècle, un recul de nombreux glaciers dans le monde, dans les vallées alpines par exemple. Il n'est cependant pas régulier. La fonte est parfois interrompue par des périodes d'extension, et certains glaciers se sont même développés au cours des dernières décennies, preuve que le changement climatique n'est pas réparti de façon homogène sur le Globe. Dans certaines régions, la température aurait même diminué de un à deux dixièmes de degré lors de la seconde moitié du xx^e siècle. D'après les évaluations récentes, le retrait moyen des glaciers aurait contribué, au cours du xx^e siècle, à une élévation du niveau des mers comprise entre un à quatre centimètres.

Le retrait des glaciers est manifeste, mais l'évolution du volume des calottes polaires est moins marquée. Ainsi, le Groenland aurait contribué à l'élévation du niveau des mers pour un centimètre, au maximum, et l'Antarctique aurait contribué, non pas à une augmentation, mais à une diminution du niveau des mers ! Ce paradoxe n'est qu'apparent. La température de l'Antar-

tique reste tellement basse que la fonte est négligeable. En revanche, l'élévation de température de la planète provoque une augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère : les précipitations et le stock de glace augmentent sur la calotte. En résumé, les deux calottes auraient des contributions faibles et qui se compensent. En revanche, elles subissent toujours les conséquences de la déglaciation entamée voilà plus de 20 000 ans. À cause de cette déglaciation, les deux calottes auraient contribué à une élévation du niveau des mers atteignant cinq centimètres au xx^e siècle, bien supérieure à la contribution associée au seul changement climatique durant le xx^e siècle.

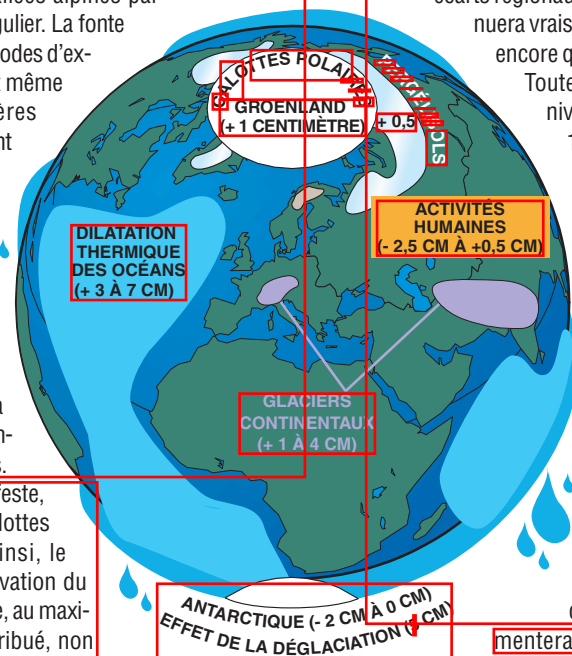
Une simple addition indique que la fonte des glaciers et des calottes ne peut expliquer l'augmentation du niveau des mers au xx^e siècle. D'où vient le reste ? Une partie de la glace stockée dans les sols gelés en permanence, les pergélisols, pourrait avoir fondu et avoir été évacuée vers l'océan. Ces pergélisols occupent 25 pour cent des terres dans l'hémisphère Nord, mais le contenu en eau de ces sols est faible : la fonte des pergélisols au xx^e siècle aurait contribué à moins de 0,5 centimètre.

D'autres contributions, liées à des activités humaines, telle l'agriculture, modifient le stockage d'eau sur les continents et les cycles d'évaporation. Cette contribution, mal connue, aurait représenté une baisse de un à deux centimètres par siècle. En fait, la contribution majeure à l'élévation du niveau des océans proviendrait de l'océan lui-même, par... dilatation ! L'eau se dilate avec la température et cette contribution atteint trois à sept centimètres en un siècle, soit un tiers de l'élévation totale estimée. Au total, l'évolution des glaciers, des calottes polaires et du pergélisol, la dilatation thermique des océans, et les stockages et déstockages d'eau sur les continents, toutes incertitudes confondues, peuvent expliquer l'élévation observée du niveau des mers au xx^e siècle.

Le réchauffement du climat qui est apparu au cours des dernières décennies va probablement se poursuivre et s'intensifier, avec des écarts régionaux considérables. Le niveau des mers continuera vraisemblablement à augmenter, mais on ignore encore quelles seront les régions les plus touchées.

Toutes origines confondues, une élévation du niveau des mers moyen global comprise entre 10 et 90 centimètres est prévue pour la fin du xxi^e siècle. Les glaciers, le Groenland et la dilatation thermique des océans auront sans doute une contribution positive. L'élévation du niveau des mers devrait s'accélérer à la fin du xxi^e siècle : même pour un réchauffement stabilisé à la fin de ce siècle, les glaciers pourraient disparaître presque totalement en moins de trois siècles, ce qui contribuerait à une élévation du niveau des mers de 50 centimètres. Si un réchauffement climatique, même modéré, persistait pendant plusieurs milliers d'années, le Groenland pourrait se réduire considérablement, voire même disparaître ! Le niveau des mers augmenterait alors de plusieurs mètres.

Christophe GENTHON, Catherine RITZ et Christian VINCENT, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement



Contribution des divers facteurs identifiés à l'élévation du niveau des océans : elle aurait été de 10 à 20 centimètres au xx^e siècle.

Pétra, une capitale aux confins du désert

ROBERT WENNING

Longtemps tenus pour d'insignifiants imitateurs des Grecs, les Nabatéens sont à l'origine d'une civilisation arabe originale et prospère grâce au commerce de l'encens.

Les chevaux trottent nerveusement entre les parois rocheuses d'une gorge large de trois mètres et profonde de 70 mètres. Tout à coup surgit de l'ombre une façade monumentale taillée dans le roc par d'antiques artisans, éclairée par le soleil matinal. Indiana Jones suppose alors qu'elle abrite... L'Arche perdue.

Cette scène du film *Indiana Jones et la dernière croisade*, de Steven Spielberg, a rendu célèbre le site archéologique de Pétra, situé à 250 kilomètres au Sud d'Amman, la capitale de la Jordanie. L'ancienne métropole des Nabatéens attire aujourd'hui 1 500 touristes par jour, venus du monde entier admirer les gorges et les falaises qui jouxent la vallée sèche et désertique de l'Araba, où passe actuellement la frontière entre la Jordanie et Israël. Sans doute espèrent-ils, eux aussi, découvrir l'un des trésors qu'une légende arabe récente place dans les tombes et dans les maisons creusées dans la roche.

Les Edomites sont les plus anciens occupants connus de la région. Du VIII^e au V^e siècle avant notre ère, ils dominèrent un territoire délimité à l'Est par le désert et à l'Ouest par l'Araba. Les Nabatéens leur succédèrent sur le site de Pétra et lui donnèrent le nom sémitique de *Requem* (la bigarrée), en raison de l'aspect multicolore des grès dont il est formé : blancs ou roses, ils sont veinés de jaune, d'ocre et même de bleu. La richesse légendaire des trésors enfouis explique que le site ait été quasi interdit aux Européens durant une bonne partie du XIX^e siècle. Ces vieilles ruines n'auraient d'ailleurs eu aucun intérêt pour les indigènes s'ils n'avaient cru qu'elles protégeaient d'anciens trésors, par quelque magie secrète ! Le premier Européen à braver l'interdiction fut le Suisse Johann Ludwig Burckhardt (1784-1817). Alors en mission pour le compte de l'Empire britannique, il se déguisa en Arabe, prit le nom de Cheikh Ibrahim et réussit à visiter Pétra en 1812. Dans son journal, il consigna ses premières impressions : «Un tombeau excavé, dont la situation et la beauté ne peuvent que faire une impression extraordinaire sur le voyageur qui vient de parcourir pendant une demi-heure un chemin d'accès si sombre qu'il semble presque souterrain... Les autochtones l'appellent Khaznet Firaoun, c'est-à-dire le château du pharaon, et prétendent qu'il s'agit d'une ancienne résidence princière. Sans doute s'agissait-il plutôt du tombeau d'un prince ; la richesse de

la ville capable d'élever un monument aussi impressionnant à la mémoire de ses souverains a dû être considérable».

L'espion britannique avait raison : la façade grandiose que l'on découvre à l'extrémité du Siq, une étroite faille rocheuse de 1,2 kilomètre de longueur, décorait autrefois un tombeau à trois chambres funéraires creusées dans le grès par des tailleurs de pierre alexandrins. La Khaznet Firaoun pourrait dater de 40 environ avant notre ère. Les habitants y ont peut-être inhumé le roi Malichos I^{er}, mort en -30. Quoi qu'il en soit, la plus grande chambre, au milieu, contenait sans doute, dans l'Antiquité, un sarcophage royal. Le précieux mobilier funéraire ayant attiré les pillards, la plupart des tombeaux de Pétra sont vides aujourd'hui.

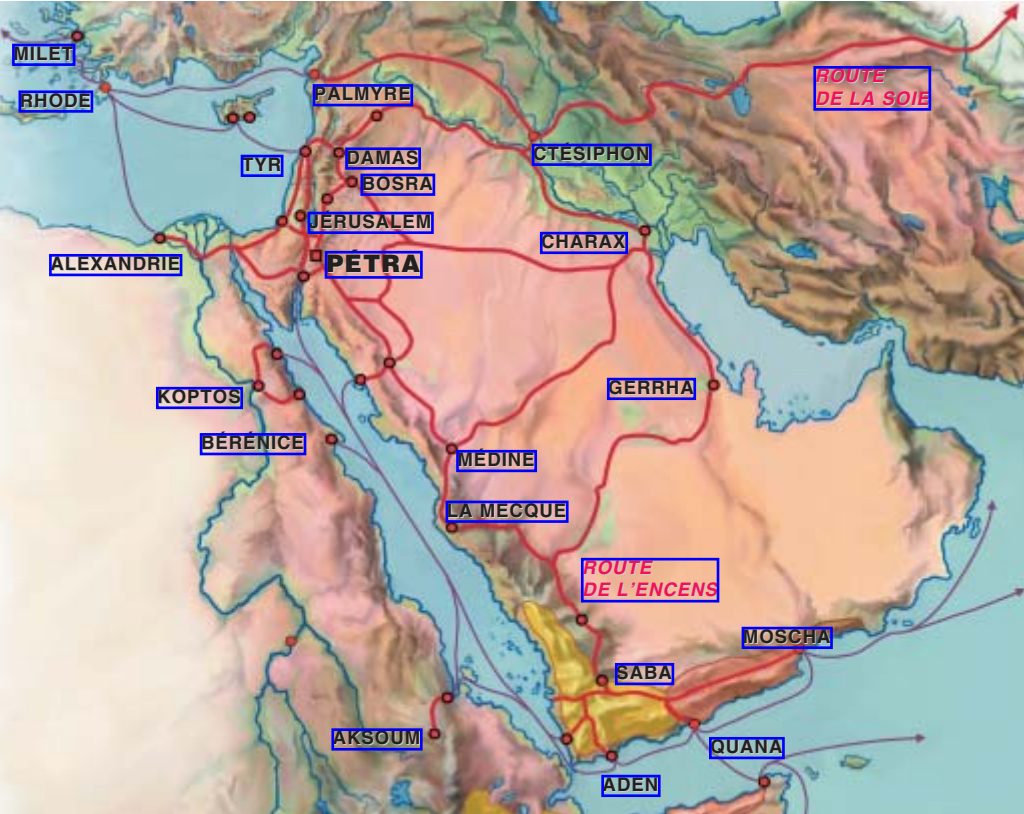
La Khaznet Firaoun est sans conteste l'une des plus belles façades de Pétra. Avant de se sédentariser et de créer une ville, les Nabatéens habitaient dans des tentes. Le site qu'ils avaient choisi n'offrait en lui-même pas de source en eau pérenne, mais il présentait l'avantage d'être difficile d'accès, donc facile à défendre. Dès qu'une menace se présentait, ils se réfugiaient sur l'un des massifs rocheux dont la Pétra grecque tire son nom (en grec, Pétra signifie roche). Les archéologues pensent avoir identifié le «rocher fondateur», celui où les premiers pasteurs nomades se réfugiaient en cas de danger : il s'agirait de Umm al-Biyara, montagne qui domine le site au Sud-Ouest.

Le site de Pétra s'étend sur plusieurs kilomètres carrés que les archéologues s'efforcent de fouiller depuis 1929, recherchant les traces laissées par les habitants de l'ancienne cité. Ils ont découvert qu'elle était équipée de citernes alimentées par des canalisations qui assuraient l'approvisionnement en eau durant les mois d'été. Afin de prévenir les dégâts causés régulièrement par les flots des pluies hivernales, imprévisibles et torrentielles, les habitants de Pétra avaient même dû construire, à l'entrée du Siq, un barrage et un tunnel de dérivation afin d'éviter que les crues du wadi Mousa ne s'engouffrent dans le Siq (un wadi est un cours d'eau).

Les Nabatéens ne nous ont laissé ni textes littéraires ni annales royales. Nous ne disposons donc, pour les connaître, que des témoignages, en grec ou en latin, de quelques auteurs

1. SUR LE SITE où Pétra a été construite, les grès ont un aspect multicolore (ci-contre). Une façade monumentale taillée dans le roc (à droite) surgit de l'ombre quand on quitte le Siq, une faille qui mène à Pétra.





2. LA ROUTE DE L'ENCENS et d'autres voies caravanières du Moyen-Orient se croisaient à Pétra. Cette situation de carrefour et le quasi-monopole des Nabatéens sur le commerce de l'encens firent la richesse de la cité.

antiques, du millier d'inscriptions nabatéennes gravées sur la pierre à Pétra et des vestiges archéologiques (monuments, monnaies, céramiques, statues, etc.). Jusqu'à une date récente, les résultats des travaux de recherche entrepris avaient accrédité l'idée que les Nabatéens s'étaient entièrement «hellénisés». Une image bien plus nuancée de ce peuple à l'histoire brillante se profile aujourd'hui.

À l'évidence, les Nabatéens étaient riches. Alexandre le Grand le savait bien puisqu'en -332 il assiégea la ville et le port de Gaza d'où les épices et l'encens provenant d'Inde et d'Arabie du Sud étaient embarqués vers d'autres destinations, notamment vers la Grèce, puis vers Rome. Ces précieuses marchandises arrivaient à Gaza par la «route de l'encens», qui passait par le territoire de Pétra. Habiles caravaniers, les Nabatéens contrôlaient en grande partie ce commerce très lucratif. Depuis des temps immémoriaux, l'encens était utilisé sur le pourtour de la Méditerranée comme parfum, mais aussi lors des cérémonies religieuses. Aussi précieux que l'or dans l'Antiquité, il dégage une odeur pénétrante quand on le brûle. L'encens est un mélange de résines recueillies sur diverses variétés d'arbustes qui poussent seulement dans certaines régions de l'Arabie du Sud ainsi que sur la côte de l'Afrique orientale (Somalie et Érythrée). Les producteurs d'encens régu-

laient les cultures afin de maintenir leur marchandise si convoitée à un prix élevé. Les chameaux qui transportaient l'encens parcouraient les 3 700 kilomètres de la route vers la Méditerranée en quelque 85 jours. Chaque animal portait environ 200 kilogrammes d'encens (environ 100 000 euros). On comprend que les taxes, les droits de passage et les recettes associés à ce commerce aient permis l'enrichissement rapide des Nabatéens et surtout qu'ils aient suscité plus d'une convoitise!

En -311, l'un des successeurs d'Alexandre le Grand, le Macédonien Antigone le Borgne, tenta une première fois de soumettre les Nabatéens. Ses troupes s'emparèrent d'un important butin à Pétra, mais les Nabatéens les poursuivirent et les attaquèrent de nuit dans leur propre camp, leur infligeant de lourdes pertes. L'historien grec Hiéronymos de Cardia, témoin des événements, fit à cette occasion une description des Nabatéens reprise deux siècles plus tard par Diodore de Sicile dans sa *Bibliothèque historique*. D'après lui, les Nabatéens comptaient alors 10 000 hommes et vivaient dans une région sans eau située entre la Syrie et l'Égypte. Ils vivaient essentiellement de rapines et élevaient moutons et dromadaires. Belliqueux et épris de liberté, ils n'avaient jusqu'alors jamais subi de joug étranger. Ils vivaient en plein air, ne construisant pas de maisons, ne cul-

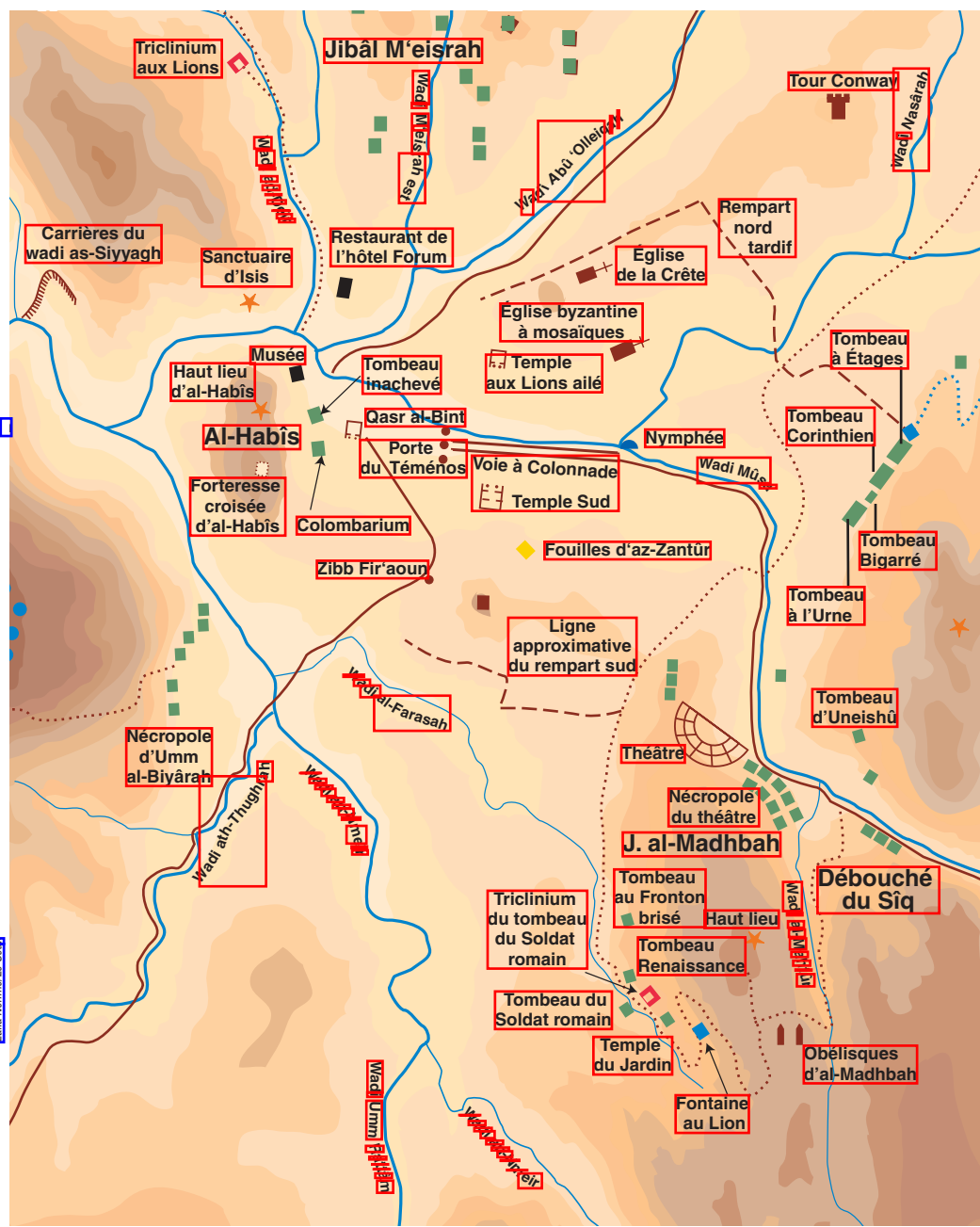
tivant pas la terre et ne buvant pas de vin. La description des auteurs grecs est celle de nomades du désert. Ils ajoutent seulement que de nombreux Nabatéens étaient déjà engagés, au III^e siècle avant notre ère, dans le commerce à longue distance de l'encens et des aromates.

Marché de l'encens aux confins du désert

Qui étaient les Nabatéens, et d'où venaient-ils? Les avis divergent. Des éléments araméens dans la langue et la culture nabatéennes rendent possible une origine dans la région du golfe Persique (Mésopotamie). La première tribu nabatéenne aurait migré vers le Nord-Ouest au plus tard au IV^e siècle avant notre ère.

On sait toutefois qu'avant les Nabatéens, le contrôle du commerce de l'encens était exercé par la tribu arabe de Qédar. Cette tribu est mentionnée dans l'Ancien Testament et son Cheikh, nommé Gechem, y est qualifié d'adversaire de Néhémie, un fonctionnaire d'origine juive que le roi perse Artaxerxès avait envoyé en -445 relever les remparts de Jérusalem détruits en -586. Néhémie restaura la province de Judée, ce que les voisins de Jérusalem, dont Gechem, virent d'un mauvais œil. La tribu de Qédar était soumise au roi des Perses, mais jouissait d'une grande autonomie et disposait de certains privilèges, notamment celui de battre monnaie à Gaza. Elle les perdit au début du IV^e siècle, lorsqu'elle participa à une révolte contre les Perses et qu'elle fut supplantée par les Nabatéens. Ceux-ci s'emparèrent du même coup du commerce de l'encens et en tirèrent des revenus à la mesure de leurs ambitions politiques, militaires et économiques. Grâce à leur nouvelle puissance, ils améliorèrent la sécurité sur la route des caravanes et instaurèrent des étapes fixes, au nombre desquelles figurait Pétra. Dirigés par un émir ayant pris le titre de roi, les Nabatéens prirent de plus en plus d'importance.

D'après Hiéronymos, de nombreux points d'eau n'étaient connus que des Nabatéens. Ils s'y réfugiaient en cas d'attaque, et les ennemis lancés à leur poursuite mouraient de soif avant de les avoir trouvés. Les Romains eux-mêmes furent victimes de cette stratégie peu après avoir fait des royaumes juif et nabatéen des États clients, vers -63. Comme les Grecs



Le premier atlas archéologique de Pétra

Comment étudier un site aussi complexe que Pétra sans carte ? Dès sa redécouverte par les Occidentaux en 1812, les archéologues ont essayé de représenter la cité nabatéenne. La tâche était immense, car le site comprend environ 3 200 monuments et quelque 200 points épigraphiques représentant au total un millier d'inscriptions ! Les archéologues allemands Brünnow et von Domszewski et, plus tard, l'Autrichien Dalman furent les pionniers de ce travail systématique. Ils publièrent les premiers catalogues en 1904 et en 1908, respectivement. Dans ces deux ouvrages, près de 1 600 sites – principalement des tombeaux et des sanctuaires – sont décrits et cartographiés schématiquement. Malheureusement, la poursuite de cet exigeant travail intéressa peu leurs successeurs qui préférèrent fouiller quelques monuments prestigieux de la ville. Durant le XX^e siècle, seulement 230 monuments furent ajoutés aux premiers inventaires !

C'est pourquoi, l'équipe Histoire et archéologie de la Syrie du Sud et de Pétra du CNRS tenait tant à terminer l'inventaire systématique des vestiges de la capitale des Nabatéens. Le projet est aujourd'hui sur le point d'aboutir. Il a bénéficié d'une série de 197 photographies aériennes réalisées en 1974 par l'Institut géographique national dans le cadre d'un premier projet de cartographie

archéologique du site de Pétra. Les images (au 1/10 000) sont de grande qualité et couvrent l'ensemble du bassin de Pétra. Un photoplan, c'est-à-dire une carte photographique obtenue en aboutant et en redressant ces photographies, a été établi en 1977, tandis qu'une première mission sur le terrain a permis le repérage des monuments. Il restait cependant à compléter ce plan et à exploiter les données en vue d'une cartographie de tous les vestiges.

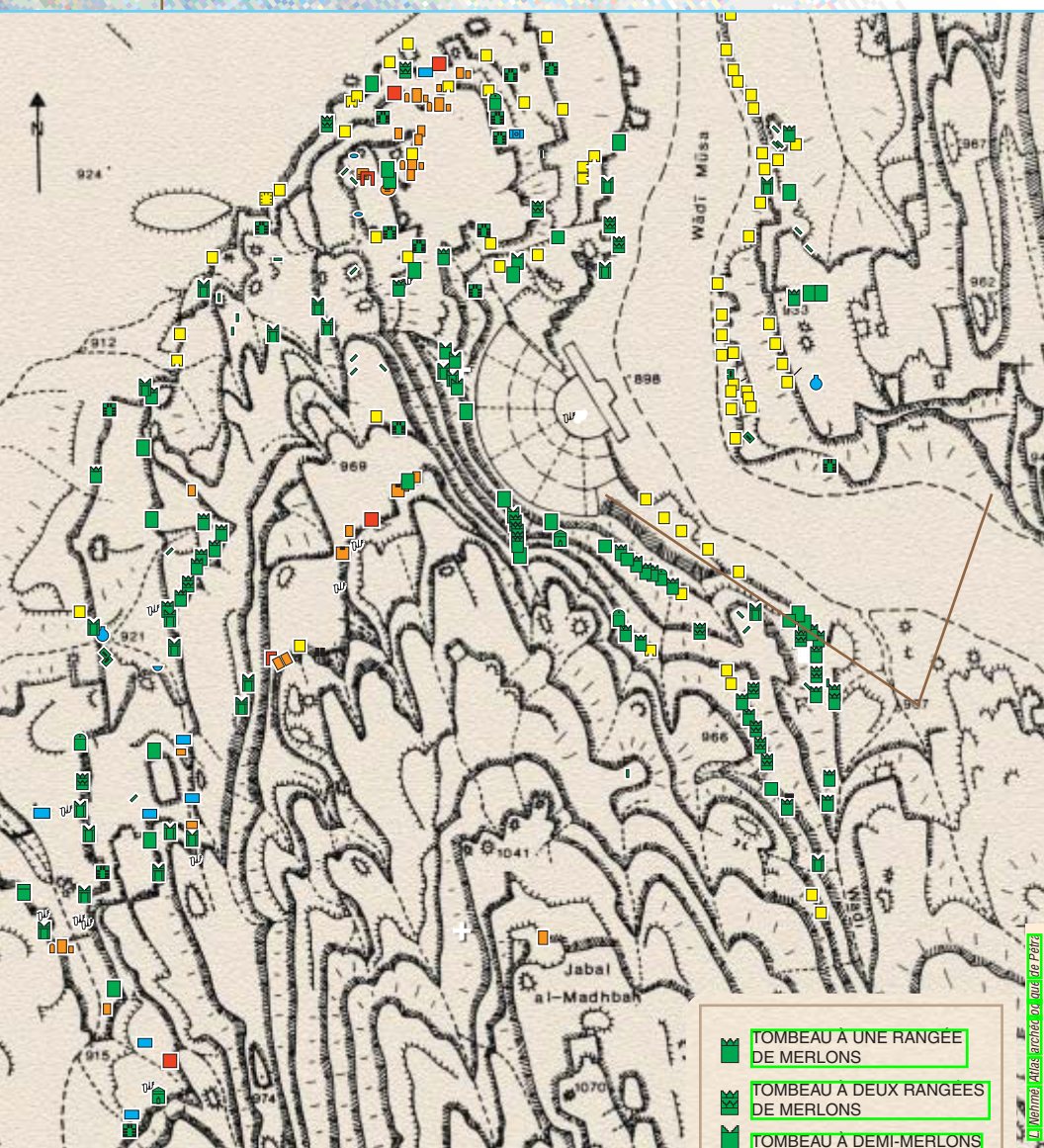
Après le dessin d'un premier fond de carte réalisé par un ingénieur de l'Institut géographique national, plusieurs missions ont eu lieu sur le terrain, entre 1988 et 1997 : les vestiges ont été systématiquement enregistrés. Chacun d'eux – du plus petit, un bétyle de trois centimètres sur six, au plus grand, le tombeau à étages, haut de 46 mètres et large de 49 – a été décrit, photographié et ses coordonnées géographiques ont été déterminées avec précision. Ces prospections ont permis d'ajouter environ 1 400 nouveaux monuments à ceux qui étaient déjà connus. Les informations ainsi recueillies ont ensuite été saisies dans une base de données qui combine toutes les informations disponibles concernant Pétra : monuments, inscriptions, références bibliographiques, etc. Enfin, tous les monuments et inscriptions de Pétra ont été cartographiés. L'ensemble doit être prochainement publié

sous la forme d'un atlas commenté.

Cet atlas devrait être un instrument de travail essentiel pour les archéologues qui s'intéressent aux Nabatéens. Il leur permettra de mieux comprendre l'histoire, le développement et l'organisation spatiale de la capitale nabatéenne... Grâce à la carte archéologique, ils pourront, par exemple, définir précisément l'extension de la ville, comparer les époques de construction des groupes de monuments, préciser la nature de l'occupation de chacun des secteurs topographiques du site, établir quels rapports les différents types de vestiges entretiennent entre eux... Il apparaît déjà que l'étonnante imbrication entre habitat, nécropoles et sanctuaires tient à l'alternance de phases de régression et de développement du tissu urbain. La carte montre aussi que certains traits culturels propres aux Nabatéens – le désir manifeste et ostentatoire d'être vu – ainsi que les contraintes qu'imposent un environnement difficile, ont également joué un grand rôle dans l'organisation de la ville.

Laïla NEHMÉ, Laboratoire d'études sémitiques anciennes, CNRS, Paris

Carte extraite de l'atlas archéologique de Pétra (secteur du théâtre, 500 mètres de largeur). Le relief du site est si tourmenté que les archéologues ont choisi de ne représenter que certains éléments : les wadis (cours d'eau), les terrasses, les talus, les sommets et les cols. Ces repères suffisent pour que chaque monument soit localisé et représenté à un mètre près. Les monuments funéraires apparaissent en vert, les constructions hydrauliques en bleu tandis que l'habitat est en jaune. Chaque monument est représenté par un symbole qui met en évidence ses principales caractéristiques (dans l'atlas, chaque monument est identifié par un numéro).



- TOMBEAU À UNE RANGÉE DE MERLONS
- TOMBEAU À DEUX RANGÉES DE MERLONS
- TOMBEAU À DEMI-MERLONS
- TOMBEAU PROTO-HÉBRA (AVEC PILASTRES)
- GRAND TOMBEAU
- CHAMBRE FUNÉRAIRE (NON DÉCORÉE EN FAÇADE)

la négligence ou la paresse avait pour conséquence une dégradation des pâturages, des plantations ou des terres arables de la tribu. Dans un royaume presque entièrement gagné sur le désert, la moindre ressource vivrière était vitale !

Les troupeaux et les terres que possédait un Nabatéen définissaient son statut social. Quel que soit son rang, un Nabatéen vivait bien tant que la tribu vivait bien. Dans la société nabatéenne, l'esclavage ne semble pas avoir joué un rôle aussi important que dans des sociétés arabes ultérieures ou chez les Romains du temps de Strabon. De grandes inégalités sociales devaient cependant exister entre les paysans asservis – essentiellement ceux des régions par où passaient les routes commerciales – et les notables de la tribu. Toutefois, les archéologues n'ont retrouvé aucun signe de conflit entre classes sociales. Des inscriptions témoignent des dons faits par les riches notables de la tribu pour améliorer la situation des paysans, par exemple en finançant des systèmes d'irrigation. Il s'agissait probablement d'une forme d'impôt.

À défaut de posséder des esclaves, les Nabatéens affichaient leur réussite par d'autres moyens. Dans la mesure où la richesse n'était pour eux rien d'autre qu'une preuve de la faveur divine, ils commencèrent, vers la fin du I^{er} siècle avant notre ère, à ériger les premiers temples et à représenter leurs divinités. En effet, jusque-là, ils les avaient adorées sous la forme de blocs de pierre taillée, de quelques centimètres à un peu plus de un mètre de hauteur, et nommés bétyles. À la même époque, plusieurs autres peuples du Proche-Orient affirmèrent leur puissance en érigeant de fastueux sanctuaires, par exemple dans le quartier du temple, à Jérusalem ou à Palmyre, en Syrie.

Ce n'est qu'au sommet de leur puissance que les Nabatéens construisirent les premières habitations en pierre, même s'ils leur préféraient encore souvent tentes ou grottes, qu'ils rendaient luxueuses. L'architecture et le décor des maisons nabatéennes rivalisaient avec ceux des villas de Rome ou de Pompéi. Décorées de stucs colorés ou de fresques en trompe-l'œil, elles impressionnent encore les visiteurs d'aujourd'hui. Les noms de plusieurs artistes locaux sont mentionnés dans des inscriptions. Cela contredit Strabon pour lequel toutes les œuvres d'art présentes à Pétra étaient

Trouvailles au Qasr al-Bint

Le Qasr al-Bint est le temple le mieux conservé de Pétra. Depuis 1999, une mission archéologique française étudie la partie occidentale de son enceinte sacrée (nommée téménos), au sein de laquelle s'inscrit l'édifice cultuel. Les archéologues ont découvert une salle monumentale – l'exèdre – construite au II^e siècle de notre ère dans le mur Ouest de cette enceinte. Cette structure en arc de cercle abritait plusieurs statues dont certaines étaient en marbre. Le buste de Tychè (déesse de la Fortune), reproduit ci-dessous, est en grès local. Cette exèdre à caractère honorifique était probablement consacrée à la famille impériale romaine. Une autre trouvaille intrigue les chercheurs : le grand autel bâti devant le temple était relié à un important réseau de canalisations qu'ils ont découvert sous le dallage de l'enceinte sacrée. Sa fonction reste à déterminer. Les archéologues ont aussi entrepris la fouille d'un grand bâtiment nabatéen, placé de l'autre côté de l'édifice du temple ; il pourrait avoir eu une fonction officielle. La suite des fouilles devrait apporter des précisions sur les états les plus anciens et notamment sur l'organisation de l'ensemble du sanctuaire à l'époque nabatéenne. Les archéologues aimeraient en particulier savoir quand les différents édifices du vaste ensemble architectural ont été bâtis, et quelles étaient leurs fonctions.

Christian AUGÉ, CNRS, Maison de l'archéologie et de l'ethnologie, Nanterre



d'origine étrangère : comme tous les Grecs, le géographe considérait les Nabatéens comme des barbares. De même, les archéologues des XIX^e et XX^e siècles ne virent dans l'art nabatéen, qu'un plagiat de l'art grec et romain. Progressivement cependant, les archéologues et les historiens de l'art réalisèrent que les artistes de l'antique Pétra avaient un style original. Certes, ils parlaient d'éléments grecs ou romains préexistants, mais ils créaient ce que l'on nomme aujourd'hui le « style nabatéen ».

Pétra ne fut pas le seul site nabatéen à connaître une phase de construction monumentale : des villages apparurent dans le désert, le long des routes commerciales situées dans la zone d'influence nabatéenne. De petites cités furent agrandies et devinrent des centres administratifs. Pendant cette phase d'urbanisation intense, les Nabatéens dominaient plusieurs régions situées au Nord de Pétra, et leur royaume atteignit alors son extension maximale : ils s'étendaient de l'Arabie du Nord-Ouest, un peu au Nord de Médine, au Midian (le Nord de la chaîne montagneuse qui longe la mer Rouge, dans la péninsule arabique),

au Sinaï (la péninsule qui joint l'Égypte à l'Asie), au Néguev (au Sud de l'État d'Israël actuel), aux pays d'Édom et de Moab pour atteindre le Hauran, dans le Sud de la Syrie (les villes situées entre le Golan et l'actuelle Amman en étaient exclues). Si le royaume était représenté sur une carte moderne, il couvrirait une partie de l'Arabie Saoudite, de l'Égypte, d'Israël, de la Jordanie et de la Syrie. À leur apogée, les Nabatéens étaient au centre du monde arabe. Leur écriture, à mi-chemin entre l'araméen dit d'empire, en usage à l'époque perse, et l'arabe classique, devint la langue administrative de plusieurs peuples du Proche-Orient. Pour l'historien, cela signifie qu'il n'est pas toujours certain qu'un texte en nabatéen puisse être attribué aux Nabatéens !

Un siècle plus tard, soit au début du II^e siècle de notre ère, les habitants de la cité troglodyte furent confrontés à une situation politique nouvelle : leur royaume perdit son indépendance et devint une province romaine, celle d'Arabie. Les signes avant-coureurs de ce changement s'annonçaient depuis longtemps déjà. Ainsi, entre 66 et 70,

suite à une révolte des juifs, la Judée, qui était devenue une province romaine en l'an 6, mais avait conservé une certaine autonomie, perdit tout ce qui lui restait d'indépendance. Rome se rapprochait... La menace qu'il sentait peser sur son royaume explique sans doute que Rabbel II, le dernier roi nabatéen (70-106), ait tant fait pour renforcer les aspects arabes dans la culture et dans la religion nabatéennes, tout en les opposant aux valeurs gréco-romaines. Il déclara que Duchara, le dieu de Pétra, devenait aussi le dieu protecteur du roi et de tous les Nabatéens. D'anciens sanctuaires à ciel ouvert des Nabatéens acquirent une importance aussi grande, voire supérieure, à celle des temples et participèrent au rayonnement du pays.

Le retour à la vénération de dieux représentés sous la forme de bétyles se refléta alors dans le nom des dieux. Partout dans le royaume, tout Nabatéen pouvait «rencontrer» Duchara et le vénérer dans divers sanctuaires, même si ceux-ci étaient également consacrés à des dieux locaux. Rabbel II tentait ainsi de lier profondément les Nabatéens à Pétra et de transformer son royaume tribal en un véritable État.

Les Nabatéens ont-ils, comme les juifs, fomenté une révolte contre Rome? Le royaume nabatéen a-t-il voulu quitter son statut d'État client? Nous l'ignorons. Toujours est-il qu'en 106, deux légions marchèrent par surprise sur le royaume nabatéen et l'annexèrent. La conquête fut rendue officielle cinq ans plus tard seulement.

sans doute pour ne pas faire d'ombre à la victoire de l'empereur Trajan (98-117) sur les Daces. L'administration militaire romaine se mit toutefois aussitôt au travail. Des routes balisées de bornes kilométriques furent construites dans tout le pays, notamment le long de la nouvelle voie trajane reliant Bosra, en Syrie, à Ayla, sur le golfe d'Aqaba. Nombre de villages devinrent des villes. Les historiens de l'Antiquité restent muets sur le sort de la maison royale nabatéenne. Privée de ses élites politiques et du contrôle du commerce de l'encens, la tribu perdit rapidement son importance et se mélangea sans doute à d'autres populations arabes.

Pétra sut néanmoins s'adapter et semble être devenue la capitale de la nouvelle province (un doute subsiste, car Bosra, où était basée la légion romaine de la province, a également pu jouer ce rôle). Sur les monnaies de la ville, le couple royal nabatéen fut remplacé par le portrait de la déesse grecque de la Fortune, Tyche.

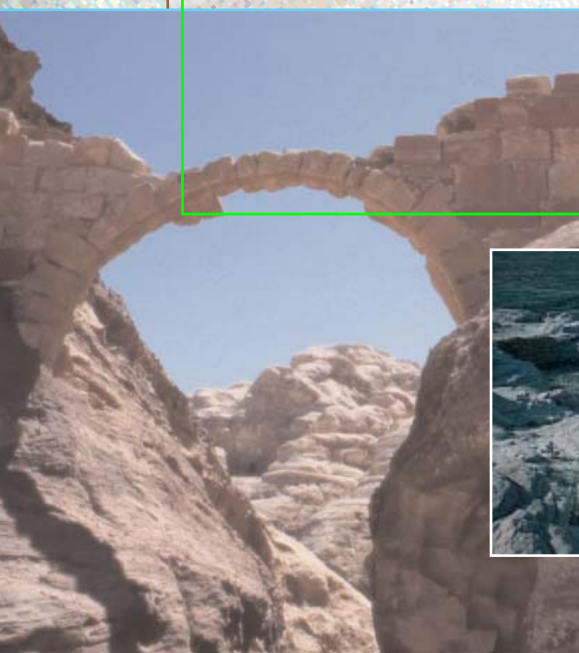
Pétra passe pour avoir été une ville romaine autonome, dotée d'un conseil municipal et d'une salle de conseil, que les archéologues pensent avoir découverte au centre de Pétra, dans le «grand temple». En 1997, ce complexe architectural monumental a livré un théâtre assez grand pour accueillir tous les membres d'un conseil de cette époque, soit 600 personnes. Qui plus est, à l'origine, ce complexe semble avoir été un temple ou un palais royal. Si cette interprétation est exacte, on aurait là un exemple exceptionnel de sanctuaire converti par les Romains en lieu de réunion pour l'administration municipale.

L'empereur Trajan tenta de renforcer le caractère romain de Pétra. L'ancienne voie processionnelle qui longeait le wadi Mousa fut transformée en voie à colonnade flanquée de trottoirs couverts et d'échoppes. Un escalier monumental menant à une terrasse supérieure, où se trouvait le marché, fut construit. Un arc portant une inscription datée de 114, par laquelle Pétra recevait le titre de «Métropole de l'Arabie», en marquait l'entrée. La porte du téménos (enceinte sacrée), construite au-dessus d'un monument plus ancien, fut érigée sous Trajan ou son successeur, Hadrien. Elle donnait accès, par trois baies qu'il était possible de fermer, à l'enceinte sacrée dans laquelle se dressait le temple prin-

La collecte des eaux de pluie

Comment une métropole a-t-elle pu naître et se développer dans un environnement aussi aride? Parce que les Nabatéens avaient une parfaite maîtrise des techniques hydrauliques. Plusieurs canalisations acheminaient le précieux liquide jusque dans le centre de la ville, depuis des sources pérennes jaillissant à plusieurs kilomètres de là, au pied des montagnes qui encadrent Pétra à l'Est et au Sud. L'une de ces canalisations captait la source de Moïse, située à l'entrée du village actuel de Wadi Mousa. Au moyen de canaux taillés dans le rocher et d'aqueducs, elle traversait le massif d'al-Khubtha et débouchait dans une citerne de 300 mètres cubes aménagée près du «tombeau à étages». Ce seul canal déversait environ 1,5 million de litres d'eau par an dans les citernes de la ville.

Deux autres canalisations, une de chaque côté du Siq, servaient par ailleurs à répartir les eaux stockées dans deux grandes citernes probablement alimentées, elles aussi, par la source de Moïse. On peut noter que celle de la rive droite est formée de tuyaux de poterie assemblés et posés sur un lit de mortier. Une autre canalisation amenait l'eau de la source Braq, au Sud-Est de la ville, jusqu'à un bassin situé non loin de la plate-forme bordée d'un bas-relief monumental en forme de lion au-dessus du wadi Farasah. Une seconde branche menait au secteur du Qasr al-Bint. Enfin, pour compléter leurs ressources en eau, les Nabatéens stockaient les eaux des pluies hivernales dans des citernes. L'eau ainsi collectée servait bien sûr aux besoins quotidiens des habitants de la cité, mais sa rareté même lui conférait une dimension religieuse : les divinités étaient remerciées partout où le précieux liquide vital suintait des fissures de la falaise.



Aqueduc (à gauche) faisant partie de la canalisation en provenance de la source de Moïse. Restes (à droite) de l'une des grandes citernes de Pétra.

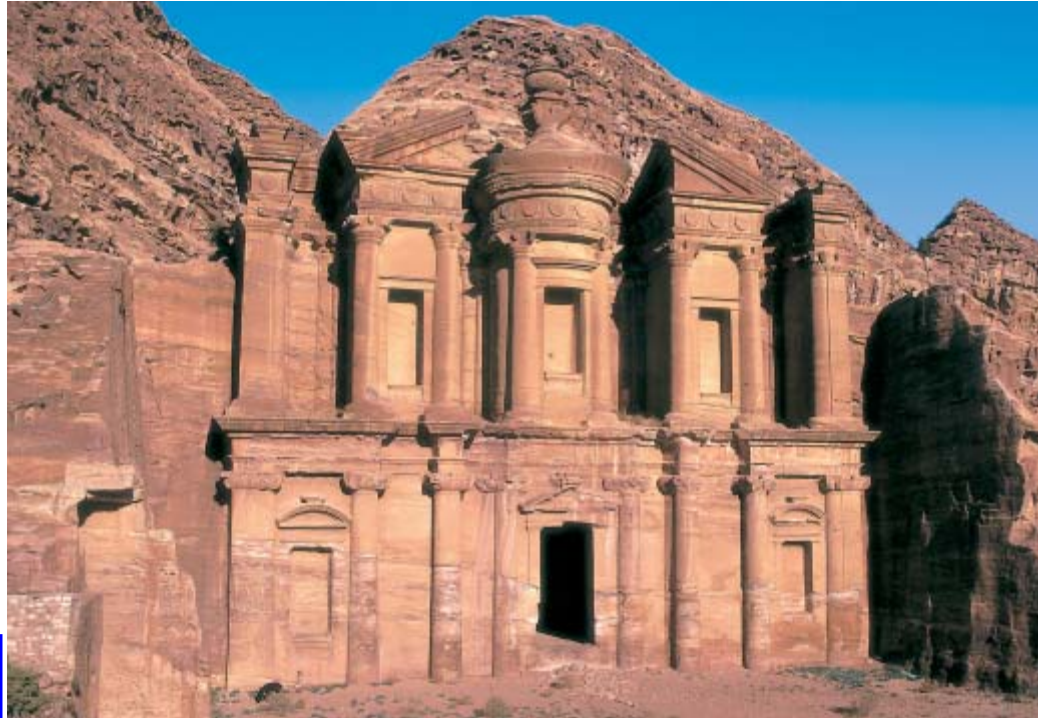
cipal de Pétra, le Qasr al-Bint (voir l'encadré de la page 39). Des bas-reliefs de divinités et de génies protecteurs en ornaient les pilastres.

Hormis ces monuments et un nymphée, les Romains ont laissé peu de traces à Pétra, ce qui est surprenant lorsqu'on considère l'importance de la ville comme centre administratif de la province. L'habitat lui-même resta traditionnel. Autre exemple de permanence des coutumes nabatéennes, le gouverneur romain de la province, Aninius Sextius Florentinus, se fit même inhumer en 127 dans un tombeau rupestre qui avait peut-être été occupé par une riche famille nabatéenne. Des dédicaces à des divinités romaines ainsi que des statues de dieux et d'empereurs romains témoignent de la domination des nouveaux maîtres. Sous leur autorité, Pétra demeura un centre économique important, mais une partie des bénéfices du commerce alimentait désormais soit d'autres villes, soit le fisc romain.

Au début du III^e siècle, lorsque les Sévères (lignée d'empereurs romains) se préoccupèrent de plusieurs villes des provinces orientales, Pétra fut peu gratifiée : elle n'obtint que la construction d'une fontaine et le statut fiscal avantageux de colonie romaine. La ville avait manifestement perdu son importance. Qui plus est, au déclin local s'ajoutèrent les effets de la crise économique générale qui touchait l'Empire romain. Lorsqu'un tremblement de terre ébranla la cité en 363, les moyens financiers furent insuffisants pour la reconstruire à l'identique.

Le déclin de Pétra

A la fin du III^e siècle, les réformes de Dioclétien eurent de graves conséquences pour Pétra, qui perdit son statut de capitale de province au profit de Bosra. Rien ne changea à partir de 330 avec l'effondrement de Rome et le passage de l'Arabie à la partie byzantine de l'Empire, dont la capitale était Constantinople. C'est en 358 seulement que Pétra retrouva un statut politique officiel avec la création de la province de *Palaestina Salutaris* (*Palaestina Tertia* à partir de 440), comprenant le Sud de la province d'Arabie et certaines parties du Néguev, dont elle devint la capitale. Élevé au rang de religion d'État dans l'Empire romain d'Orient par Constantin I^{er} (280-337), le christianisme fit son apparition à Pétra. Son statut de capitale, son appar-



4. EL DEIR, «le monastère», est situé sur un plateau. D'abord sanctuaire nabatéen, il fut ensuite utilisé par l'Église, ce qui explique son nom.

tenance à la «Terre Sainte» et surtout la présence de la tombe d'Aaron, le frère de Moïse, sur le jebel Haroun, justifiaient la conversion de la ville. On y envoya des évêques pour tenter d'en convertir les habitants, apparemment sans succès, puisque les dignitaires rapportèrent l'obstination avec laquelle ils restaient fidèles à leurs anciennes croyances. C'est vers le milieu du V^e siècle seulement que le christianisme commença à s'imposer. En 446, le tombeau d'un ancien roi nabatéen fut transformé en cathédrale par l'évêque Jason. Du milieu du V^e siècle datent également une basilique richement décorée de mosaïques et une église plus ordinaire, découvertes dans les années 1990 dans le centre urbain de Pétra, sur la rive Nord du wadi Mousa.

Dans la basilique furent mis au jour, en 1993, les restes calcinés d'un lot d'archives privées écrites en grec sur 152 rouleaux de papyrus. Ces documents, en cours d'étude, donnent des informations sur la situation économique de la cité et de ses environs au VI^e siècle. Contrairement à ce que l'on pensait, l'arrivée du christianisme s'est accompagnée d'un essor écono-

mique qui se serait poursuivi pendant tout le VI^e siècle. Cela n'empêche d'ailleurs pas Pétra d'être devenue, à l'époque, le lieu privilégié de déportation des criminels et des hérétiques. À la fin du VI^e siècle, la situation changea une fois de plus, comme en témoigne le fait que la nef Sud de la basilique servit provisoirement d'entrepôt. C'est au cours d'un incendie que les archives entreposées dans une chapelle latérale brûlèrent.

Même si elles n'ont pas laissé de traces tangibles de leur passage, on peut supposer que des populations bédouines se sont approprié les ruines antiques de Pétra, ont veillé sur elles pendant des siècles et en ont interdit l'accès aux étrangers. Leurs descendants ont quitté la ville antique il y a moins de 20 ans pour s'installer dans un village construit de toutes pièces à leur intention au sommet d'un col dominant le site. Devenus directeurs d'hôtels ou de cafés, artisans ou vendeurs de souvenirs, ils sont propriétaires des chevaux qui servent aujourd'hui de montures aux touristes. C'est l'héritage de l'une des premières grandes puissances arabes qui les fait vivre.

Robert WENNING est archéologue et mène ses recherches à l'Université catholique d'Eichstätt.

J. STARCKY, *Pétra et la Nabatène*, éditions H. Cazelle et A. Feuillet, *Dictionnaire de la Bible*, supplément 7, col. 886-1017, 1996.

L. NEHME et F. VILLENEUVE, *Pétra, Métro-*

pole de l'Arabie antique, Le Seuil, 1999.

Chr. AUGÉ et J.-M. DENTZER, *Pétra, La cité des caravanes*, Découvertes Gallimard, 1999.

Pétra. Dernières nouvelles de la cité rose, in *Le monde de la Bible*, n° 127, mai-juin 2000.

J. HEALEY, *The Religion of the Nabataeans*, éditions Brill, Leiden, 2001.

Le vol des insectes

MICHAEL DICKINSON

Le vol stationnaire des insectes résulte d'une combinaison d'effets aérodynamiques élucidés par un modèle utilisant les lois de la similitude.

En 1934, dans l'introduction de son ouvrage *Le vol des Insectes*, l'entomologiste Antoine Magnan écrit : « Tout d'abord poussé par ce qui se fait en aviation, j'ai appliqué aux insectes les lois de la résistance de l'air, et je suis arrivé avec mon assistant André Sainte-Lagüe à cette conclusion que leur vol est impossible. » Cette conclusion hâtive était sans doute fondée sur le fait que la portance maximale théorique des ailes d'un bourdon est plus faible que son poids.

La portance est la force qui s'exerce sur un corps perpendiculairement à la direction de son mouvement ou de l'écoulement où il est plongé. Cette portance est généralement calculée pour une aile d'avion : la forme incurvée de l'aile impose que la vitesse de l'écoulement de l'air sur sa partie supérieure soit plus grande que le long de la partie inférieure. Selon le principe découvert par Daniel Bernoulli au XVIII^e siècle, l'augmentation de la vitesse du fluide s'accompagne d'une diminution de la pression : la pression étant plus forte sous l'aile qu'au-dessus, la poussée s'exerce vers le haut, la portance (voir la figure 6).

Depuis 1934, les ingénieurs et les mathématiciens ont fait des progrès et ont acquis suffisamment de connaissances pour mettre au point les ailes d'avions nécessaires au transport de centaines de passagers, telles celles de l'Airbus A380. La conception de ces avions repose sur le principe de stationnarité selon lequel l'écoulement de l'air autour des ailes et les forces qui en résultent sont stables dans le temps.

Tel n'est pas le cas des insectes dont le vol est longtemps resté une énigme, car ces animaux battent et tournent leurs ailes 20 à 600 fois par seconde. Les forces aérodynamiques et les écoulements d'air changent sans cesse et compliquent les analyses, mathématiques et expérimentales.

Pour comprendre la physique du vol stationnaire d'une mouche, nous avons mis au point un dispositif expérimental (voir la figure 3). Dans une cuve de deux tonnes d'huile bat doucement une paire d'ailes de 60 centimètres d'envergure. Mues par six moteurs commandés par un ordinateur, les ailes brassent le fluide et y créent un mouvement que révèlent des millions de bulles d'air injectées dans la cuve. L'ensemble est éclairé par des rayons de lumière laser et filmé par des caméras vidéo, tandis que des capteurs enregistrent en permanence les forces qui s'exercent sur les ailes.

Grâce à l'insecte mécanique, qui imite les mouvements des ailes à une vitesse 1 000 fois inférieure et à une échelle 100 fois plus grande, nous avons compris comment la mouche utilise les tourbillons, le décrochage retardé, la circulation de l'air autour des ailes et la capture de sillage. Détaillons ces phénomènes qui donnent aux insectes une telle aisance dans leur vol.

Un bruissement d'ailes

Les ailes d'insectes en mouvement apparaissent le plus souvent comme une image brouillée : le vol des insectes ne ressemble donc en rien à celui des avions. Les ailes de l'insecte ne sont pas animées d'une simple oscillation verticale : l'extrémité de chaque aile trace une courbe ovale fortement inclinée. De plus, les ailes changent d'orientation à chaque battement : la face supérieure d'une aile est orientée vers le haut lorsque l'aile est abaissée, et vers le bas lors de sa remontée.

Les premières tentatives d'analyse du vol des insectes appliquaient à ces mouvements complexes les lois de l'aérodynamique stationnaire, lois habituellement utilisées en aéronautique. Ces approches étaient toutefois moins naïves que celle qui avait conduit aux

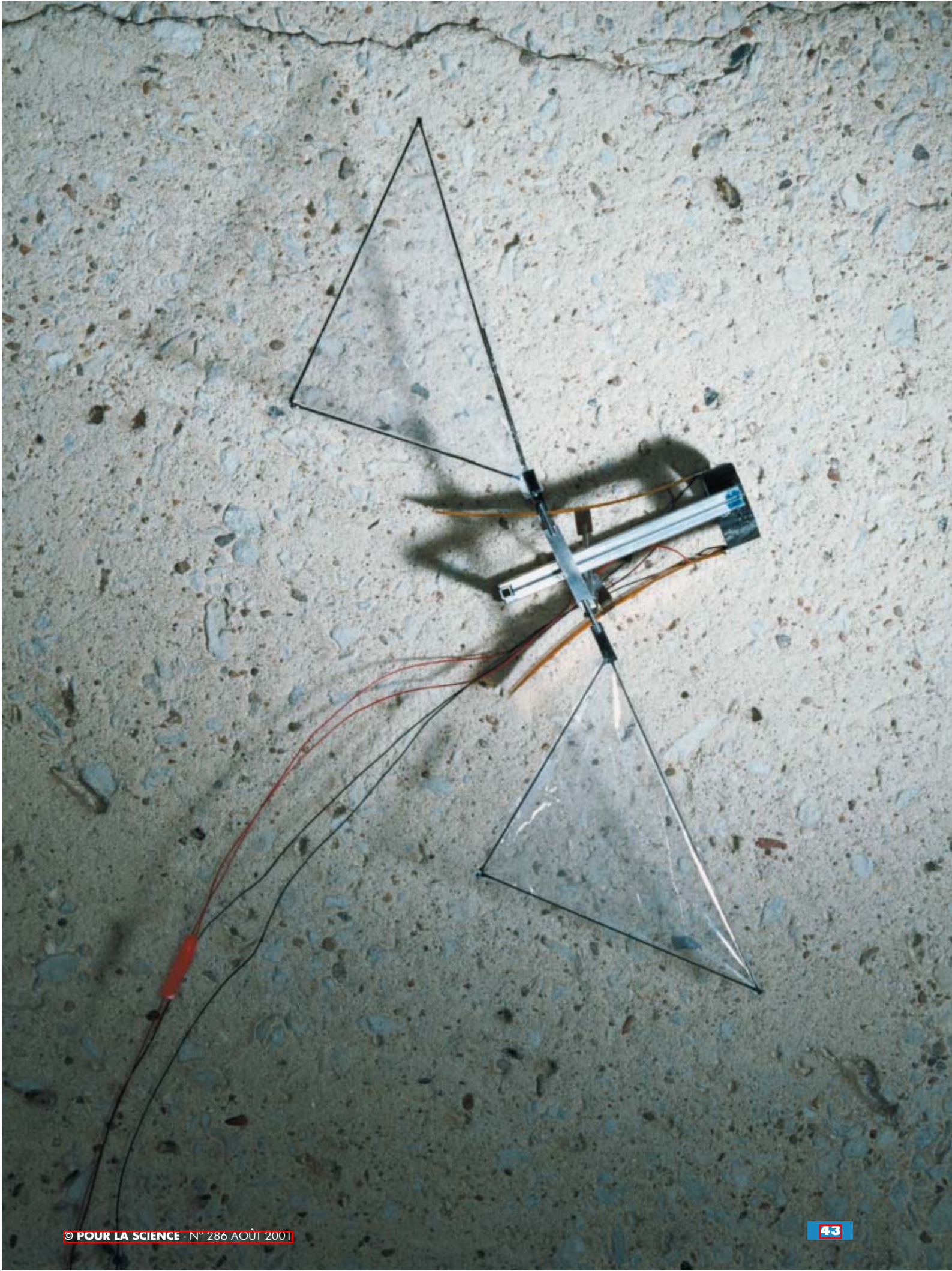
premiers calculs du vol du bourdon, car elles tenaient compte de la variation de la vitesse des ailes au cours du temps.

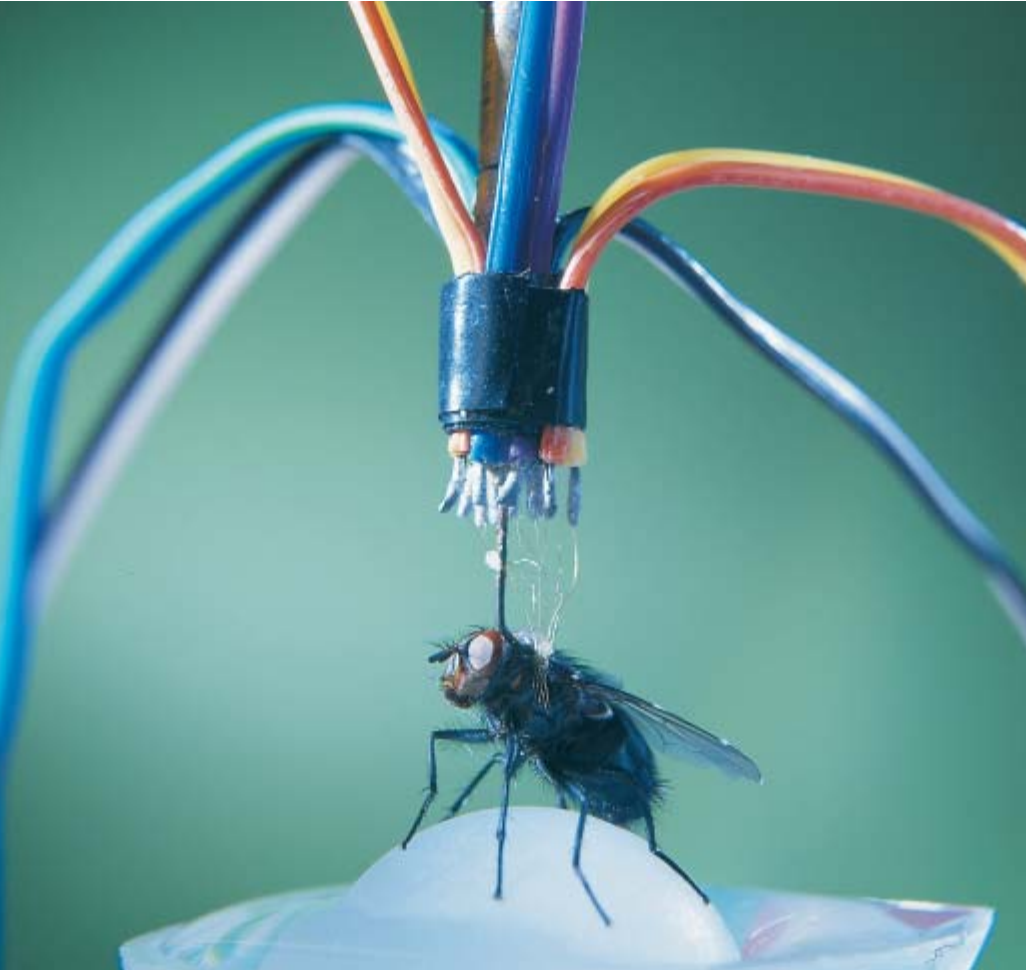
Imaginons que nous figions l'aile de l'insecte dans chacune des positions successives qu'elle prend pendant un battement, que nous reproduisions en soufflerie l'écoulement correspondant à chacune de ses positions et que nous mesurions la portance associée. Si la théorie stationnaire était correcte, la force moyenne calculée par addition des forces associées à toutes les positions serait dirigée vers le haut et égale au poids de l'insecte.

À la fin des années 1970, les aérodynamiciens doutaient de la pertinence de cette analyse et, au début des années 1980, à partir des données disponibles, le physicien américain Charles Ellington a conclu que l'approche stationnaire ne pouvait expliquer les forces mises en œuvre. Les mécanismes d'écoulement non stationnaires qui gouvernent les battements d'ailes restaient à découvrir.

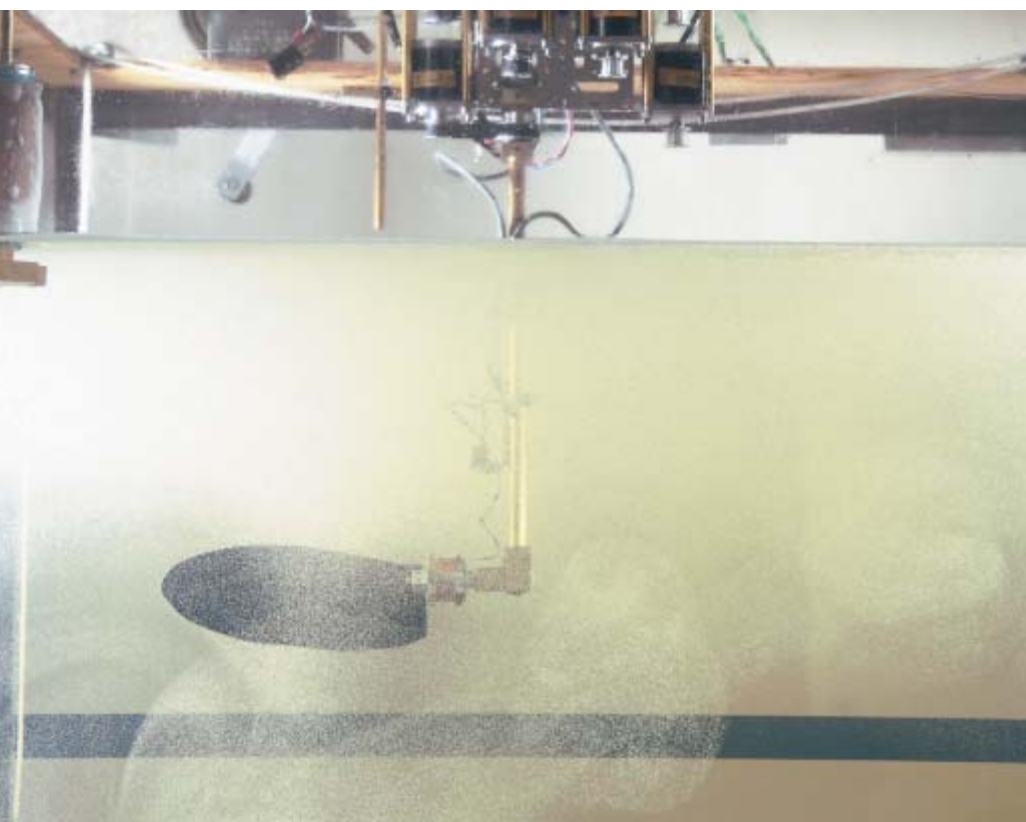


1. DES ROBOTS capables de voler imiteront la nature : ils devront plus aux insectes et aux effets aérodynamiques que ceux-ci exploitent, qu'aux techniques aéronautiques utilisées dans la construction des avions.





2. UNE MOUCHE BLEUE est reliée à un dispositif électronique qui mesure l'activité électrique des muscles du vol de la mouche pendant les mouvements des ailes.



3. UN ROBOT-MOUCHE bat lentement des ailes dans de l'huile. Ce dispositif simule l'aérodynamique des ailes d'une drosophile qui battent rapidement dans l'air. Des rayons laser illuminent des bulles d'air injectées et révèlent ainsi les écoulements complexes, tandis que des capteurs placés sur les ailes enregistrent les forces engendrées.

La répartition des vitesses et des pressions au sein d'un fluide est régie par les équations de Navier-Stokes, qui ont été formulées au début des années 1800. Dans un fluide de faible densité comme l'air, le mouvement complexe de l'aile rend la résolution de ces équations très difficile, même avec les ordinateurs les plus performants.

L'informatique et la théorie étant impuissantes, peut-on mesurer directement sur l'insecte les forces aérodynamiques dues aux battements ? Plusieurs équipes se sont attelées à la tâche, mais la petite taille et la vitesse élevée des ailes compliquaient les mesures. Par ailleurs, les mesures de forces effectuées sur les insectes vivants doivent être regardées avec prudence, car le comportement d'animaux captifs diffère de celui d'animaux en liberté.

Les beautés de la similitude

Pour contourner ces difficultés, les ingénieurs utilisent les propriétés de similitude grâce auxquelles on relie l'écoulement autour d'un objet réel à celui autour d'une maquette, plus facile à manier et à étudier en soufflerie. C'est le monde à l'envers : alors que les ingénieurs aéronautiques construisent des modèles réduits, ceux qui étudient le vol des insectes ont besoin de modèles agrandis.

Les principes physiques qui gouvernent les objets (ou les animaux) réels et les maquettes sont identiques quand, dans les deux cas, le rapport de la force de pression due à l'inertie du fluide est égal à la force de cisaillement due à la viscosité du fluide. Ce rapport est nommé nombre de Reynolds. On dit alors que la maquette et l'objet (ou l'animal) réel respectent la similitude de Reynolds. La viscosité, équivalente à un frottement, apparaît quand des régions contiguës d'un fluide se déplacent à des vitesses différentes. Le nombre de Reynolds augmente proportionnellement à la longueur, à la vitesse de l'objet et à la densité du fluide. Il diminue avec la viscosité du fluide. Un avion, qui a une grande taille et se déplace à une vitesse élevée, a un nombre de Reynolds de l'ordre de un à 100 millions. Un insecte, petit et lent, a un nombre de Reynolds entre 100 et 1 000, voire même inférieur à 100 pour les plus petits insectes. Notons que pour respecter la similitude de Reynolds, on ajuste les dimensions de l'objet, la vitesse de l'écoulement ou encore la nature du

fluide, afin de modifier la masse volumique et la viscosité. Simuler un mouvement dans l'air par un mouvement dans un liquide paraît surprenant. C'est cependant réaliste, dès lors que le nombre de Reynolds est le même.

Le décrochage retardé

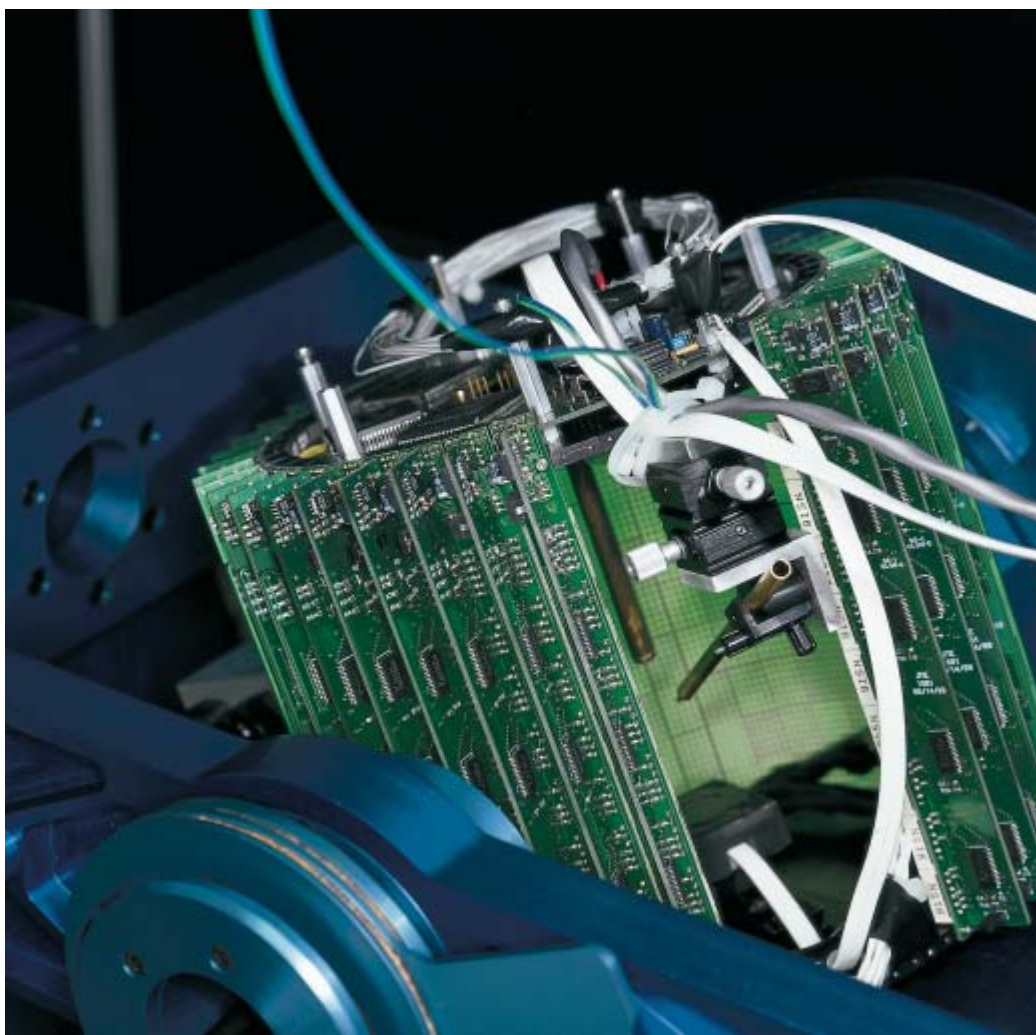
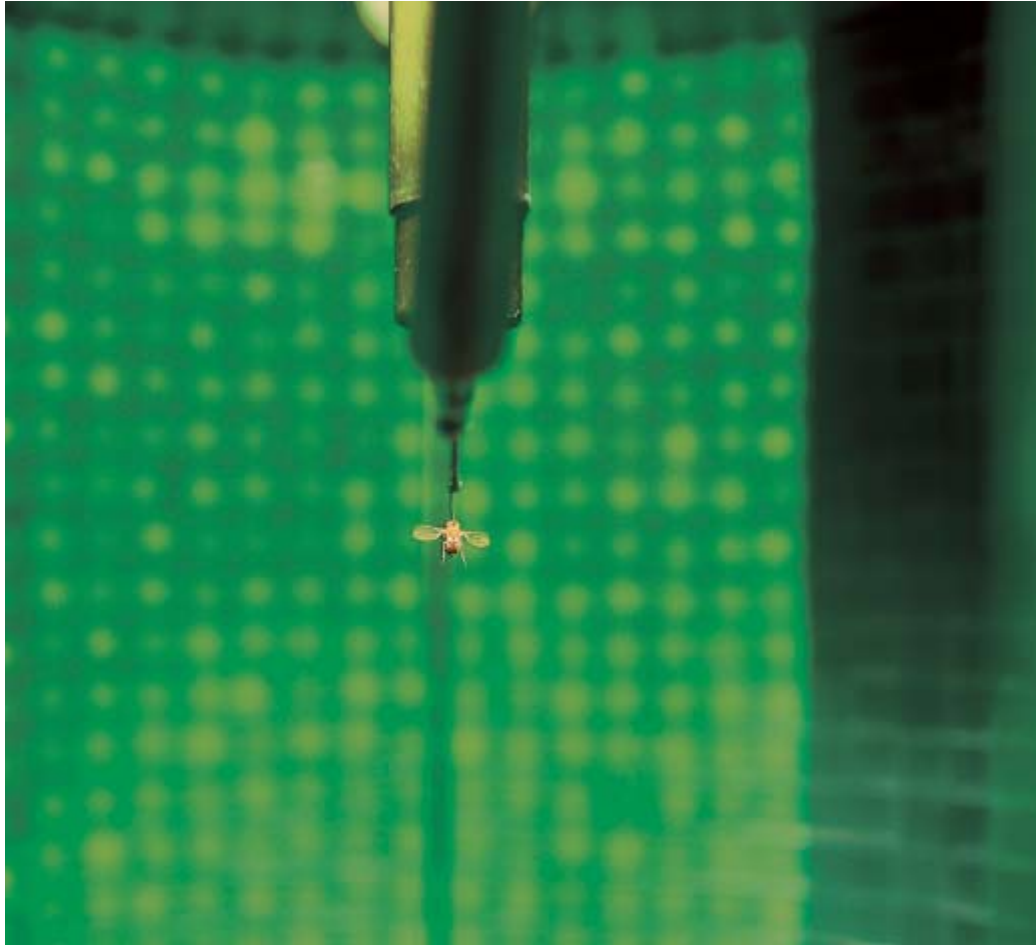
En 1992, avec Karl Götz, de l'Institut Max Planck, à Tübingen, nous avons construit une maquette d'aile composée d'une « pagaie », de cinq centimètres de largeur sur 20 centimètres de longueur, reliée à des moteurs et plongée dans une grande cuve de sirop de sucre. Cette augmentation de la taille et de la viscosité combinée avec une réduction de la vitesse de battement donnaient au montage le même nombre de Reynolds que celui d'une aile de mouche.

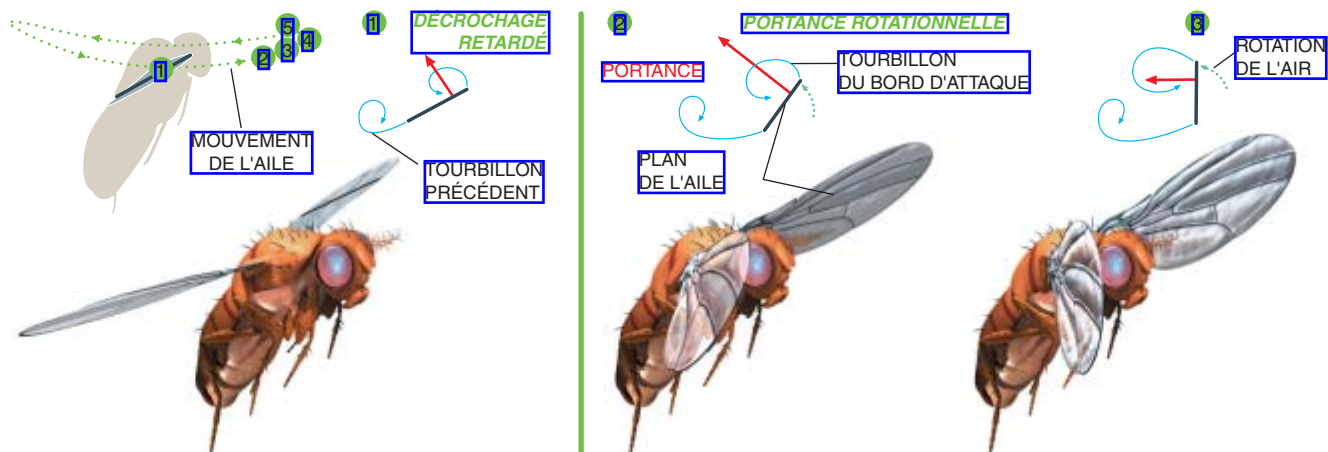
L'aile était équipée d'un capteur qui mesurait la portance et la traînée créées lors du déplacement dans le fluide visqueux. À l'extrémité de l'aile nous avons monté des écrans pour supprimer l'écoulement le long et autour de l'aile : ce stratagème ramène l'écoulement de trois à deux dimensions, et facilite ainsi l'analyse (au risque toutefois de passer à côté d'effets importants).

Nos expériences ont suggéré une solution à l'énigme du vol stationnaire des insectes : le décrochage retardé. Dans un avion, le décrochage survient lorsque l'angle d'attaque (l'angle que fait l'aile avec la direction de propagation) sous lequel l'aile pénètre dans l'air est trop important : le flux supérieur ne suit plus le contour de l'aile, décolle et supprime la portance.

Comment le décrochage, si désastreux pour un avion, peut-il avantager un insecte ? La réponse réside dans la vitesse de battement des ailes. Le flux d'air, cause de la portance, disparaît seulement quelques instants après l'augmentation de l'angle d'attaque. Plus encore, la première phase du décrochage accroît légèrement la portance, en raison d'un bref écoulement tourbillonnaire, nommé tourbillon du bord d'attaque. Ce dernier est un écoulement cylindrique du fluide en rotation qui se forme au-dessus et à l'arrière du bord d'attaque de l'aile.

4. UNE MOUCHE CAPTIVE EST OBSERVEE par les expérimentateurs dans une enceinte (en haut) où des centaines de diodes vertes créent l'illusion (pour la mouche) de mouvements d'objets selon son mouvement. En bas, une photographie de l'ensemble du simulateur de vol.





5. LA DROSOPHILE met à profit trois mécanismes aérodynamiques pour se maintenir immobile dans l'air (vol stationnaire). Pendant la majeure partie du battement d'aile (1), un tourbillon d'air qui se forme au voisinage du bord d'attaque augmente la portance de l'aile.

Ce mécanisme est le décrochage retardé, ainsi nommé, car le tourbillon n'a pas le temps de se décoller, à l'inverse de ce qui se passe pour un avion qui «décroche». À la fin du coup d'aile (2, 3 et 4), celle-ci se retourne et crée une portance rotationnelle ana-

L'écoulement d'air dans ce tourbillon est très rapide, donc la pression y est très faible, ce qui augmente notablement la portance. Cet effet a été découvert par des ingénieurs britanniques au début des années 1930, mais il est trop fugace pour être utilisé en aéronautique : le tourbillon se détache rapidement de l'aile et disparaît dans le sillage de l'avion. Cependant, les battements d'aile d'un insecte sont si brefs que l'aile se retourne et inverse la direction en créant un nouveau tourbillon dans la direction opposée, immédiatement après que le précédent a disparu.

Au milieu des années 1990, l'équipe de Charles Ellington a étendu ces résultats à trois dimensions. Ces ingénieurs ont étudié le grand sphingidé *Manduca sexta*, un papillon nocturne qui vit dans les plantations de tabac des Antilles, ainsi qu'un papillon robot.

L'insecte était suspendu à un fil dans un tunnel aérodynamique, où l'on observe le vol par les perturbations d'un écoulement de fumée. Les filets de fumée ont montré qu'un tourbillon se formait aux bords d'attaque des ailes quand celles-ci descendaient pendant le vol. Un autre écoulement d'air caractéristique, de la base à l'extrémité de l'aile, intensifie peut-être l'effet en réduisant la force du tourbillon, mais en augmentant sa stabilité, afin qu'il reste attaché à l'aile pendant toute la durée du coup d'aile. Un tel écoulement pourrait être particulièrement important pour les grands insectes comme les libellules, dont l'ampleur du coup d'aile est importante.

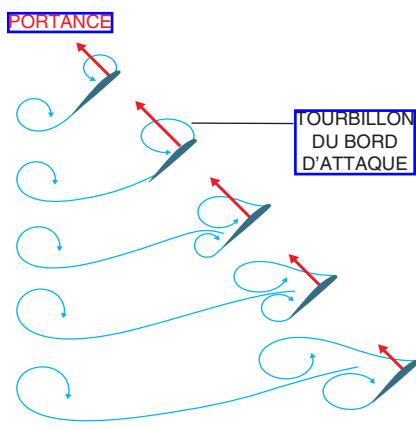
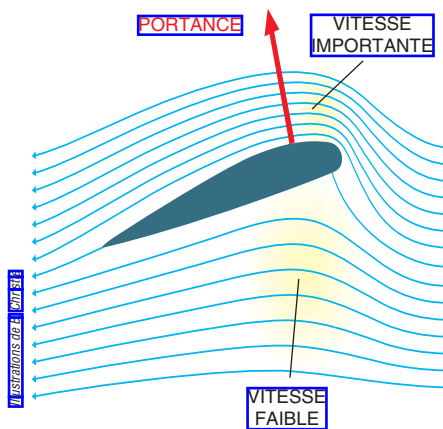
La découverte du décrochage retardé n'explique qu'une partie du vol des insectes : par exemple, il n'explique pas comment de nombreux

insectes produisent une portance égale à presque deux fois leur poids.

D'autres mécanismes du vol des insectes restaient donc à découvrir. En 1998, nous avons construit une maquette de drosophile dont les ailes avaient 25 centimètres de longueur. Dans l'huile, le robot bat des ailes toutes les cinq secondes : dans de telles conditions, ce rythme est équivalent aux battements d'ailes d'une drosophile de deux millimètres et demi de longueur, à une fréquence de 200 battements par seconde dans l'air. Nous avons mesuré deux propriétés : les forces aérodynamiques qui s'exercent sur les ailes et l'écoulement du fluide autour d'elles.

Rotation et autres effets

Au début et à la fin de chaque mouvement, les ailes créent des forces intenses que le décrochage retardé n'explique pas. Ces pics de forces apparaissent au moment où les ailes ralentissent et se retournent rapidement. La rotation d'objets dans l'air crée des écoulements similaires à ceux qui engendrent la portance d'une aile conventionnelle. Par exemple, une balle de tennis à laquelle on donne un effet coupé «aspire» l'air au-dessus d'elle à une vitesse supérieure et donc s'élève (voir la figure 7). Nous avons montré que la rotation d'une aile produit une portance par ce même mécanisme, en décalant le moment du cycle où l'aile se retourne. Lorsque l'aile se retourne à la fin d'un battement, les bords d'attaque se déplacent vers l'arrière et créent une force dirigée vers le haut, de la même manière qu'une balle de tennis qui tourne sur elle-même (effet



6. L'ÉCOULEMENT DE L'AIR AUTOUR D'UNE AILE D'AVION (à gauche) crée une portance (une force dirigée vers le haut) : la vitesse de l'air sur le dessus de l'aile est plus importante que la vitesse de l'écoulement sous l'aile. La zone de faible pression ainsi constituée attire l'aile vers le haut. Quand l'angle d'attaque est trop important (à droite), un tourbillon se forme près du bord d'attaque et crée d'abord une portance accrue, avant de s'éloigner rapidement de l'aile : l'avion décroche, car il n'y a plus de portance (la longueur des flèches rouges est proportionnelle à l'intensité de cette portance).



logue à celle d'une balle de tennis en rotation. Au début de la levée de l'aile, celle-ci retransverse le sillage créé par l'aile quand elle était abaissée. L'aile est orientée de façon que le surplus d'écoulement d'air produit crée davantage de portance : ce phénomène est dénommé la capture de sillage (5)

Magnus). Quand l'aile se retourne plus tard, au début du battement suivant, le bord d'attaque se déplace vers l'avant par rapport à la direction de déplacement : la force qui en résulte est dirigée vers le bas.

Toutefois, un autre pic de forces dirigées vers le haut a été décelé au début de chaque abaissement et de chaque levée d'aile. Plusieurs expériences ont montré que ce pic était dû au phénomène nommé capture de sillage, c'est-à-dire la collision de l'aile avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement.

Chaque coup d'aile laisse derrière lui un tourbillon composé des remous qu'il a produits lors de son déplacement et de son retournement pendant le cycle précédent. Lorsque l'aile inverse sa direction, elle retransverse cette turbulence et récupère ainsi une partie de

l'énergie « contenue » dans le sillage. Nous avons testé cette capture de sillage en arrêtant les ailes après un mouvement de l'aile vers l'avant, puis vers l'arrière. Les ailes immobiles continuaient de créer une force, car le fluide environnant était toujours en mouvement.

La capture de sillage a probablement lieu au début de chaque mouvement, de la même façon que la circulation rotationnelle. Cependant, la mouche modifie sans doute l'intensité et la direction de la force selon l'instant du retournement de l'aile. Quand l'aile se retourne tôt, elle a un angle d'attaque favorable à l'instant où elle entre en collision avec le sillage, et crée ainsi une force intense dirigée vers le haut. À l'inverse, lorsque l'aile se retourne plus tard, la force est dirigée vers le bas.

La capture de sillage et la circulation rotationnelle expliquent à parts égales l'aérodynamisme de la commande de vol, c'est-à-dire comment la mouche se dirige. Pendant certaines manœuvres, l'aile à l'extérieur du virage se retourne plus tôt et produit plus de portance, tandis que l'aile à l'intérieur se retourne plus tard et crée moins de portance : au total, la mouche s'incline et tourne. La mouche dispose de nombreux capteurs, tels les yeux, les ailes postérieures atrophiées, nommées haltères, qui jouent le rôle de gyroscopes et les récepteurs mécaniques des ailes, afin de régler précisément le moment du retournement et l'amplitude du battement...

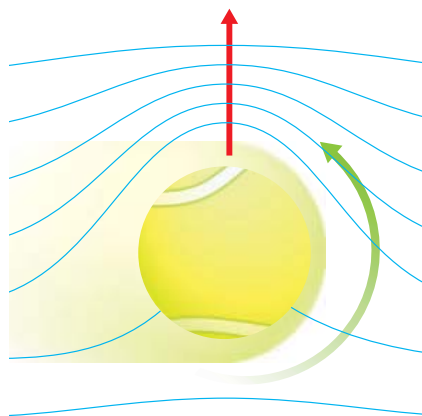
La plupart des études ont porté sur le vol stationnaire, car c'est le cas le plus difficile à expliquer du fait que l'insecte ne tire aucun avantage des

courants d'air. Leurs résultats forment un tout de plus en plus cohérent, mais ne résolvent pas tous les problèmes. Comment pouvons-nous appliquer les résultats obtenus sur la drosophile aux autres insectes ? La tâche est difficile : les morphologies, les tailles et les comportements des insectes sont très divers. Pour illustrer la diversité, citons les minuscules thrips, les grands sphingidés, les chrysopes (des petits insectes verts aux yeux dorés), qui ont deux paires d'ailes légèrement désynchronisées pendant le vol, les coléoptères dont les deux élytres, qui forment la carapace au sol, sont dressés et immobiles pendant le vol...

Grâce aux six moteurs du robot, nous recréerons le mouvement des ailes de plusieurs types d'insectes. Pour compléter ces résultats, nous construisons aujourd'hui un autre robot mouche qui évoluera dans une cuve suffisamment grande pour simuler, par exemple, comment les mouches prennent des virages particulièrement serrés en ajustant le décalage de leurs battements d'ailes.

Comprendre le vol des insectes résoudra une ancienne énigme scientifique, mais aura peut-être aussi des applications pratiques. Par exemple, des ingénieurs tentent de mettre au point des robots volants miniatures (voir la figure 1) pour la recherche et le sauvetage, la surveillance de l'environnement, la détection de mines et l'exploration des planètes. Bien que l'être humain construise des avions de la taille des oiseaux, personne n'a jamais construit d'avion de la taille d'une mouche. La viscosité de l'air a plus d'importance à ces échelles et prime sur le type d'écoulement qui maintient les avions en l'air.

Les insectes battent des ailes, non pas parce qu'ils n'ont jamais « inventé » les roues, les réacteurs et les gouvernails, mais parce que leurs dimensions imposent d'autres mécanismes aérodynamiques. N'oublions pas que l'évolution est, selon Francis Crick, plus intelligente que nous (et que son assistant, Orgel).



7. L'ÉCOULEMENT DE L'AIR autour d'une balle de tennis en rotation crée une portance. Sous la balle, la vitesse de l'air en rotation s'oppose à celle due à la translation de la balle : la pression de l'air est supérieure sur le dessus. Les insectes utilisent ce phénomène en tournant les ailes à la fin de chaque battement.

Michael DICKINSON est professeur de biologie à l'Université de Berkeley.

R. DUDLEY, *The biomechanics of insect flight : form, function, evolution*, Princeton University Press, 2000.

Le site Internet de l'auteur : <http://socrates.berkeley.edu/~fly-manmd/>

Le mystère des épées de Damas

JOHN VERHOEVEN

Au Moyen Âge, les artisans du Moyen-Orient forgeaient des lames d'acier aux qualités inégalées. Le secret de cet acier de Damas a été perdu au XIX^e siècle, mais il semble avoir été retrouvé grâce à diverses expériences récentes de métallurgie.

De l'âge du bronze à la fin du XVIII^e siècle, l'épée fut l'une des principales armes des guerriers. Les armées dont les soldats avaient les meilleures épées jouissaient d'un avantage tactique sur leurs ennemis. Les armes équipées de lames de Damas – que les Européens découvrirent lors des Croisades – furent longtemps considérées comme les meilleures du monde.

Ces lames, dont le nom vient vraisemblablement de l'atelier médiéval de Damas (aujourd'hui capitale de la Syrie), se distinguent de leurs homologues européennes par deux caractéristiques principales. D'abord, elles présentent des motifs ondulés qui en décorent la surface (voir les figures 1 et 2), et, surtout, leur tranchant peut être très acéré. Selon une légende, un sabre en acier damassé aurait été capable de couper en deux un mouchoir de soie flottant dans le vent... Un exploit qu'aucune arme européenne n'aurait égalé.

Très réputées, les lames en acier de Damas étaient répandues au Moyen

Âge et servaient également à la fabrication de poignards, de haches et de fers de lances. Pourtant, malgré cette abondante utilisation, les Occidentaux ne purent découvrir les secrets de fabrication de cet acier. Les métallurgistes et les forgerons européens les plus habiles furent incapables de reproduire les armes islamiques, même après en avoir ramené des modèles et après les avoir observées en détail. Puis, il y a 200 ans, le procédé de fabrication des lames de Damas a été perdu, dans leur pays d'origine lui-même : les experts s'accordent généralement sur le fait qu'aucune épée de Damas de bonne qualité n'a plus été forgée en Orient après le début du XIX^e siècle. Heureusement, nous avons sans doute percé le secret de ces épées.

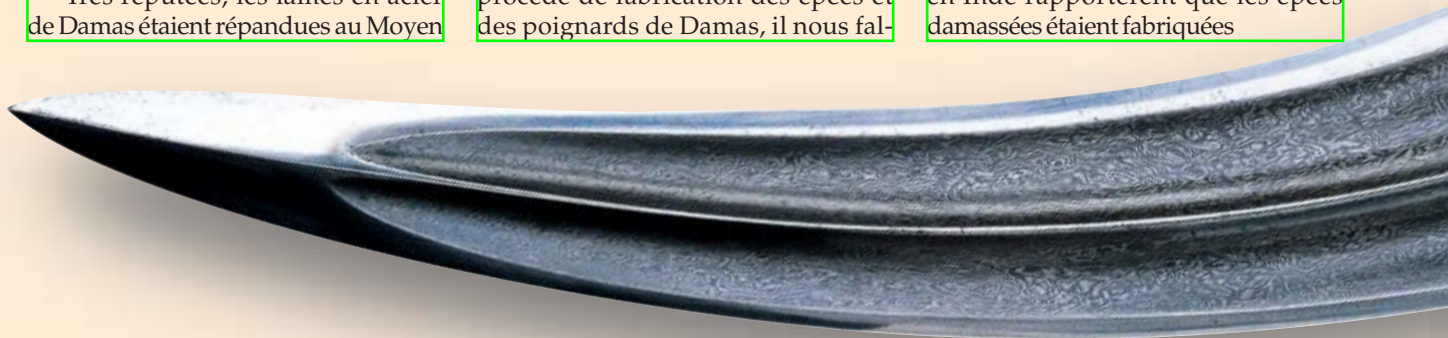
Nous ne sommes pas les premiers à annoncer une solution au mystère des aciers damassés, mais nous sommes les premiers à avoir réussi à fabriquer des répliques fidèles de ces armes légendaires. Pour valider un procédé de fabrication des épées et des poignards de Damas, il nous fal-

lait façonner des répliques à partir de matériaux semblables à ceux qui furent utilisés par les anciens forgerons. De surcroît, une fois achevées, les armes produites devaient porter le motif damassé caractéristique et avoir la même structure chimique et microscopique.

Les caractéristiques de l'acier de Damas

Les lames de Damas anciennes ont été fabriquées à partir de petits lingots d'un mélange de fer et de carbone – un acier – importé d'Inde. Ce matériau est connu sous le nom de wootz depuis le début du XIX^e siècle. Les lingots de wootz avaient une forme de palets, d'environ dix centimètres de diamètre et cinq centimètres d'épaisseur. Le wootz contient environ 1,5 pour cent de carbone, ainsi que de faibles quantités d'impuretés, tels le silicium, le manganèse, le phosphore et le soufre.

Les premiers observateurs anglais en Inde rapportèrent que les épées damassées étaient fabriquées



en façonnant directement les lingots de wootz pour leur donner la forme de la lame désirée, au cours d'opérations répétées de chauffage et de martelage. Comment le simple fait de forger de petits lingots d'acier peut-il faire apparaître les étonnantes caractéristiques des lames de Damas ?

Notons d'abord que les motifs de surface peuvent être reproduits de différentes façons. Certains artistes-forgerons actuels sont capables, par exemple, au cours du forgeage, de souder des couches alternées d'acier à haute et à basse concentration en carbone, formant ainsi un mélange qui ressemble à l'acier damassé. Cette technique est connue en Occident depuis l'Antiquité romaine, et on trouve des procédés similaires en Indonésie et au Japon. Toutefois, la structure interne de ces lames est totalement différente de celle des lames forgées dans le wootz. Pour éviter toute confusion entre ces deux modes de fabrication, je désignerai les lames composites soudées par forgeage sous le nom de «damas soudé» et réserverai le terme «damas en wootz» aux armes qui nous intéressent ici.

En 1819, l'Anglais Michael Faraday émit l'hypothèse que les propriétés remarquables de l'acier damassé pouvaient être obtenues par l'ajout de petites quantités de silice et d'alumine. L'hypothèse était erronée, mais stimula un inspecteur de l'Office des monnaies de Paris, Jean Robert Bréant, qui démontra que l'exceptionnelle dureté de l'acier damassé provenait de sa haute teneur en carbone. En 1824, Bréant et, un peu plus tard, Pavel Anosoff, en Russie, annoncèrent qu'ils avaient réussi à découvrir le secret des maîtres-forgerons arabes ; tous deux

1. LES MOTIFS DAMASSÉS présents sur la lame d'une épée du XVII^e siècle sont constitués de bandes claires et sombres entremêlées. L'inscription nous apprend que cette excellente lame a été fabriquée en 1691 ou en 1692 par Assad Allah, le plus renommé des forgerons persans de cette époque.

affirmèrent qu'ils avaient reproduit les lames identiques aux armes originales. Au cours du XX^e siècle, d'autres solutions ont été proposées, mais aucun artisan moderne n'a jamais réussi, en utilisant ces méthodes, à produire des lames satisfaisantes, qui présentaient à la fois l'aspect extérieur moiré et la structure interne des lames anciennes.

La comparaison des caractéristiques chimiques et microscopiques des lames de wootz modernes et de leurs homologues anciennes a longtemps été impossible, parce que les armes damassées, dignes de figurer dans les musées, sont des objets d'art de grande valeur et sont rarement sacrifiées à la science pour que leur structure interne soit étudiée. En 1924, pourtant, un collectionneur fit don de quatre épées à un métallurgiste : la première étude chimique et microstructurale eut enfin lieu. Les morceaux restants furent donnés au Musée de Berne, en Suisse, qui m'en confia quelques-uns pour que je les étudie.

Lorsque j'examinai ces précieux échantillons, je découvris qu'ils contenaient des bandes d'un matériau constitué de particules de carbure de fer (Fe_3C), nommé cémentite. Ces particules mesurent entre six et neuf micromètres (millionièmes de mètre) de diamètre. Elles sont bien arrondies et étroitement agglomérées formant des incrustations

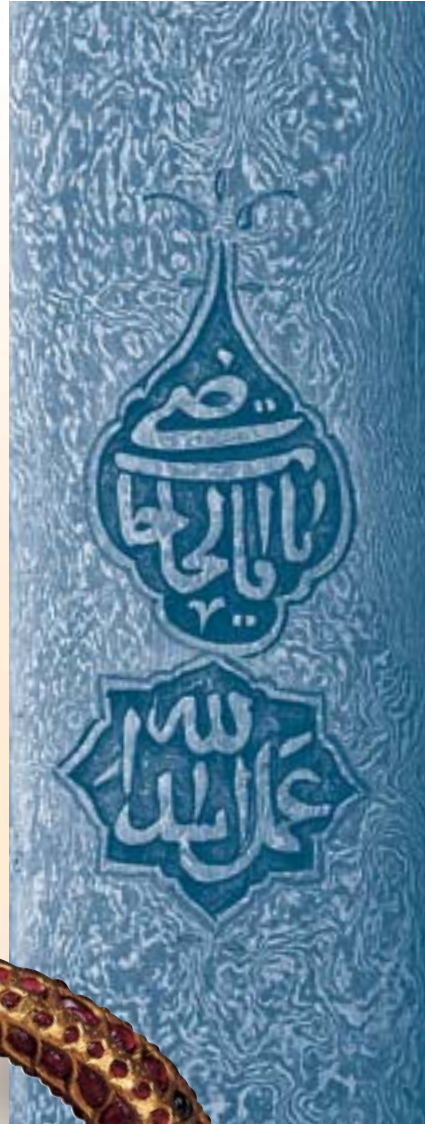
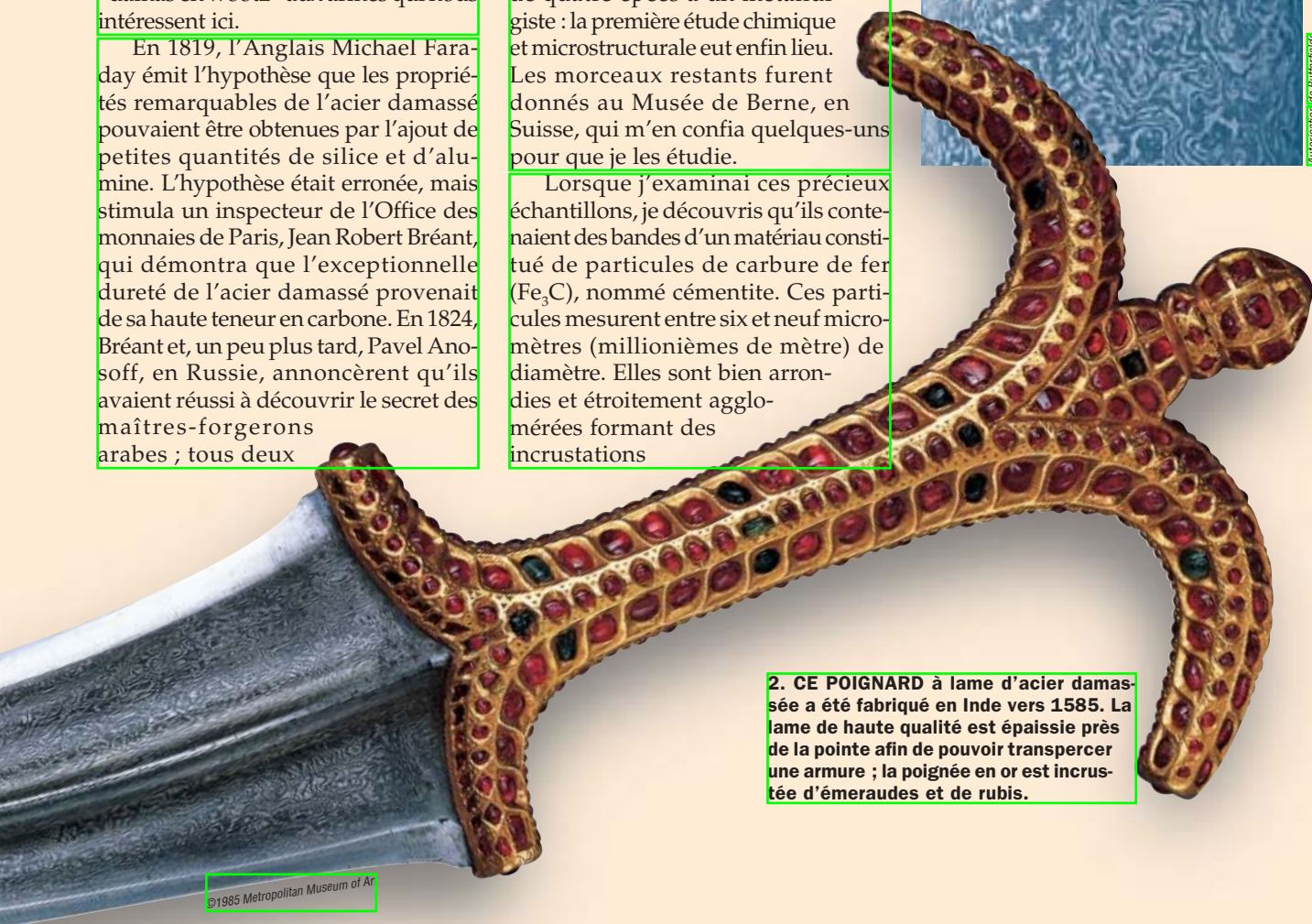
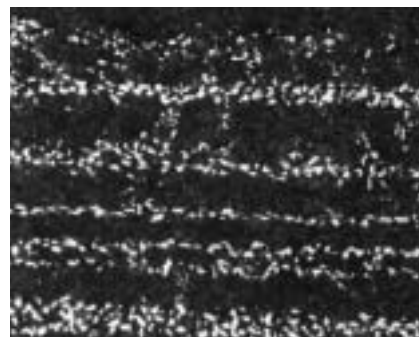
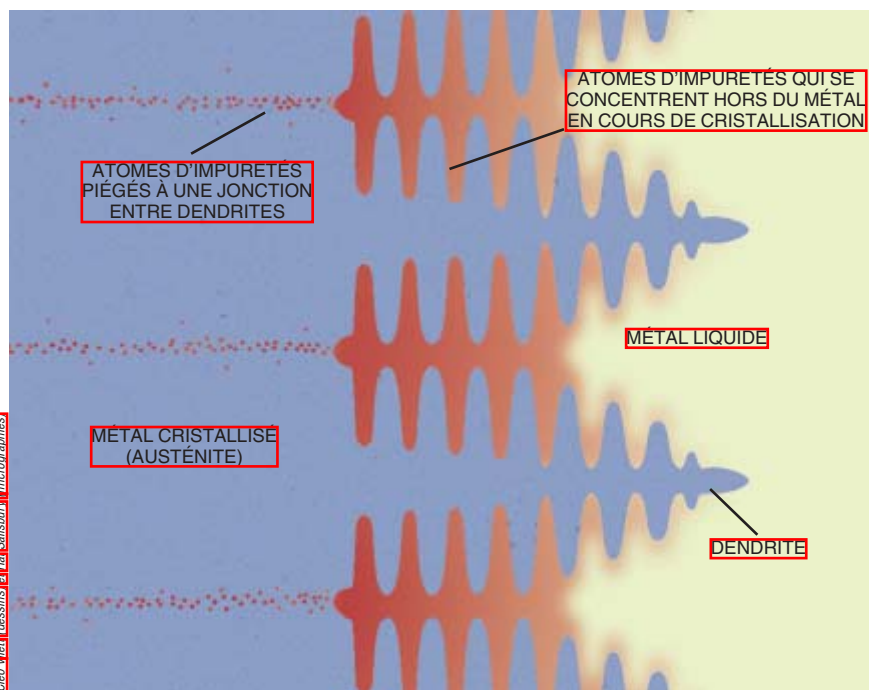


Illustration de B. B. B. B.



2. CE POIGNARD à lame d'acier damassée a été fabriqué en Inde vers 1585. La lame de haute qualité est épaissie près de la pointe afin de pouvoir transpercer une armure ; la poignée en or est incrustée d'émeraudes et de rubis.

©1985 Metropolitan Museum of Art



4. DANS UN LINGOT DE WOOTZ en cours de solidification, un front de métal froid progresse dans l'acier fondu. En cours de cristallisation, le front solide présente des ramifications nommées dendrites. Les atomes d'impuretés (en rouge), tel le vanadium, se séparent de l'acier solide et s'accumulent dans les régions situées entre les dendrites, où ils se trouvent piégés. Dans le lingot d'acier, les zones interdendritiques qui ont cristallisé les dernières contiennent de fortes concentrations en impuretés. Au cours des cycles ultérieurs de chauffage et de refroidissement, ces atomes d'impuretés favorisent la

croissance de particules de carbure de fer très dur (cémentite), qui forment les bandes claires de la lame damassée. La micrographie du haut montre les bandes claires et sombres d'une coupe pratiquée dans la lame d'une épée de Damas originale. Celle du bas montre une coupe d'une reconstitution réalisée par l'auteur. La similitude des deux structures semble indiquer que la technique moderne est une reproduction fidèle des procédés originaux.

à l'acier cinq ou six cycles de chauffage, suivis de lents refroidissements jusqu'à la température ambiante, ces particules se rassemblent en amas ou en bandes bien distinctes. Les particules de carbure se forment et, au cours du forgeage, les motifs de surface caractéristiques des lames de Damas apparaissent. Grâce à des tests effectués sur des morceaux de lames anciennes et modernes, nous avons montré que les bandes caractéristiques de cémentite résultent d'un phénomène qui se produit lors de la fabrication du lingot de départ : lorsque le métal liquéfié se refroidit et cristallise, certaines impuretés se rassemblent dans des régions microscopiques, un phénomène nommé microségrégation.

Lorsque le lingot chaud refroidit, un front solide d'acier cristallisé progresse dans le liquide. Le front de cristallisation est une surface très irrégulière formée de prolongements, nommés dendrites (voir la figure 4), lui donnant l'allure d'une forêt de sapins. Pour un alliage contenant 1,5 pour cent de carbone, l'acier qui cristallise derrière le front est une variété particulière, l'austénite, dont le réseau cristallin est cubique à faces

centrées (la maille élémentaire du cristal est constituée d'un cube où les atomes se répartissent aux sommets et au centre des faces de ce cube). Au cours de la cristallisation, le métal liquide est piégé dans les régions situées entre les dendrites (interdendritiques). Or, la structure de l'austénite est susceptible d'incorporer un nombre limité d'atomes étrangers (de carbone ou impuretés), inférieur au nombre de ces atomes que l'on peut dissoudre dans le métal liquide. Ainsi, à mesure que les dendrites d'austénite croissent, des atomes de carbone et d'impuretés se regroupent dans le liquide interstitiel. En raison de cette microségrégation, la concentration en impuretés dans les zones qui cristallisent en dernier est notablement supérieure à celle qui règne dans le reste du métal.

Une fois l'acier solidifié, les surfaces de jonction entre les dendrites forment des motifs tourmentés contenant un grand nombre d'atomes d'impuretés piégés dans la masse du métal. À ce stade, les motifs damassés n'apparaissent pas encore. Toutefois, lorsque le lingot subit, ultérieurement, les cycles de chauffage et de refroidissement nécessaires

au forgeage, ces atomes d'impuretés favorisent la croissance des chapelets de particules de cémentite dure à l'origine des bandes claires de l'acier damassé. On peut montrer que le maillage d'impuretés présent dans le lingot d'origine correspond bien aux bandes d'acier alternativement claires et sombres du wootz. Les dendrites sont distantes de un demi-millimètre environ, mais lorsque le lingot est travaillé, son diamètre diminue, de même que la distance entre les branches des dendrites : l'espacement final entre les dendrites correspond bien à la distance observée entre les bandes de l'acier damassé.

La recette pour obtenir les bandes

Pour obtenir un mélange d'austénite et de particules de cémentite à partir d'un lingot d'acier, on doit maîtriser la température au cours des opérations de forgeage. Lorsque la température du lingot est inférieure à un seuil critique, des particules de carbure de fer commencent à se former. Généralement, on note à la température au-dessus de laquelle tout l'acier d'un lingot cristallise sous forme d'austénite. Dans les aciers conte-

nant plus de 0,77 pour cent de carbone, c'est la formation de particules de cémentite qui rompt cette homogénéité et l'on note la température critique A_{cm} . Au-dessous de cette température, qui est de l'ordre de 1 000 °C pour un acier à 1,5 pour cent de carbone, des particules de cémentite apparaissent uniformément réparties dans la masse de l'acier austénitique.

Pourquoi le forgeage d'un petit lingot de wootz dont les impuretés se sont rassemblées provoque-t-il l'alignement des particules de cémentite? Pour le découvrir, nous avons examiné des coupes de lingots à mesure que nous les faisons passer de la forme de palet à celle de lame. Pour façonner un lingot, nous le chauffons jusqu'à une température assez élevée pour qu'il devienne malléable tout en restant sous la température critique A_{cm} afin de permettre l'apparition de particules de cémentite. Au cours du façonnage, le lingot refroidit, passant d'une température de l'ordre de 50 °C au-dessous de la température critique A_{cm} , à 250 °C au-dessous de cette même température (voir la figure 3). Pendant ce refroidissement, la concentration en particules de cémentite dans le métal augmente. Ensuite, nous faisons subir au lingot une succession de chauffages et de martelages entre ces deux mêmes valeurs de la température. L'expérience nous a montré qu'il nous fallait environ 50 cycles pour obtenir une lame proche des originales, c'est-à-dire d'environ 45 millimètres de largeur et 5 millimètres d'épaisseur.

Nous pensons que les bandes de cémentite se forment de la façon suivante. Au cours des 20 premiers cycles, les particules dures de carbure se forment au hasard et se répartissent de façon relativement homogène dans la masse du lingot. Puis, au cours des cycles ultérieurs, elles ont tendance à s'aligner de mieux en mieux dans le réseau des régions interdendritiques : chaque fois que l'acier est chauffé, certaines de ces particules de carbure se dissolvent ; mais la présence d'impuretés ralentit la vitesse de dissolution, de sorte que là où ces impuretés sont les plus concentrées, les particules de carbure de fer survivent en plus grand nombre. Comme les impuretés sont surtout concentrées dans les régions interdendritiques, c'est aussi là que, de cycle en cycle, les particules de carbure se concentrent. Cependant, comme chaque cycle de chauffage et de refroidissement n'augmente pas

beaucoup le nombre de particules de carbure, plusieurs cycles sont nécessaires pour l'obtention de bandes distinctes.

Les bons éléments

Nous pensions depuis longtemps que les impuretés jouent un rôle clé dans la formation des bandes, mais nous ignorions quelles sont les plus importantes. Nous avons découvert que le silicium, le soufre et le phosphore, dont la présence dans les anciens aciers wootz était connue, ne semblent pas jouer un rôle essentiel. Toutefois, en éliminant des éléments, nous ne répondions pas à la question.

Nous avons obtenu la réponse, par hasard, lorsque nous avons utilisé, pour fabriquer nos lingots, un métal venu de Sorel, au Québec. Tiré d'un important gisement d'ilménite, situé près du lac Tio, sur le Saint-Laurent, ce métal est un alliage de fer et de carbone d'une grande pureté, contenant 3,9 à 4,7 pour cent de carbone (il s'agit d'une fonte). Le minerai d'origine contient des traces de vanadium, de sorte que le métal de Sorel en renferme 0,003 à 0,014 pour cent. Dans un premier temps, nous avons négligé cette impureté, car nous ne pouvions croire qu'une concentration aussi faible avait une influence quelconque. Après

La fabrication d'une lame damassée

1. On rassemble les éléments qui seront déposés dans le four : du fer très pur, du fer de Sorel, du charbon, de petits morceaux de verre et des feuilles vertes. Fer, charbon, et acier de Sorel (contenant du vanadium) imposent les proportions de fer, de carbone et d'impuretés présentes dans le lingot.

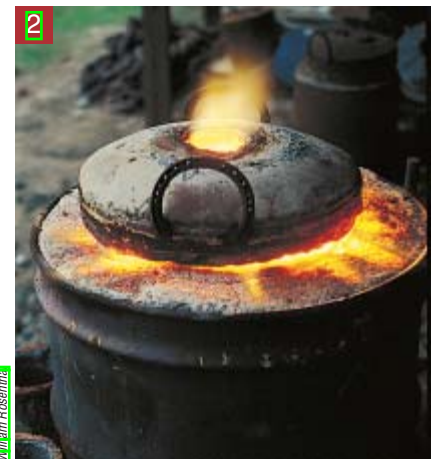
2. On chauffe le creuset. Pendant cette phase, le verre fond, formant une couche qui protège le lingot de l'oxydation. Les feuilles dégagent de l'hydrogène, qui favorise la combinaison du carbone et du fer. La concentration en carbone du fer s'élève à 1,5 pour cent, une bonne proportion pour former les particules de carbure de fer dur dont l'agglutination en bandes confère aux lames damassées leurs motifs de surface ondulés caractéristiques. Les feuilles et le verre empêchent les lingots de se fissurer au cours du martelage.

3. Lorsque le creuset s'est refroidi, on retire le lingot. Celui-ci ressemble aux lingots de wootz utilisés par les anciens forgerons.

4. On forge le lingot, c'est-à-dire qu'on le frappe à l'aide d'un marteau pour le déformer légèrement tant qu'il est chaud. Lorsque le lingot est trop froid pour se déformer sans fissures, on le réchauffe et on le forge à nouveau. On a photographié quatre étapes successives du forgeage du lingot, chacune étant le résultat de plusieurs cycles de chauffage et de martelage. Près de 50 cycles sont nécessaires pour l'obtention d'une lame à partir du lingot d'origine.

5. On découpe la lame pour lui donner sa forme finale et on forge les détails.

6. On pratique des entailles à la surface de la lame et on perce des trous pour créer une échelle de Mahomet et les motifs en rosaces. On forge la lame à nouveau pour l'aplanir et on polit la surface pour donner à la lame son aspect presque définitif.



La lame terminée présente une «échelle de Mahomet» et des «rosaces».

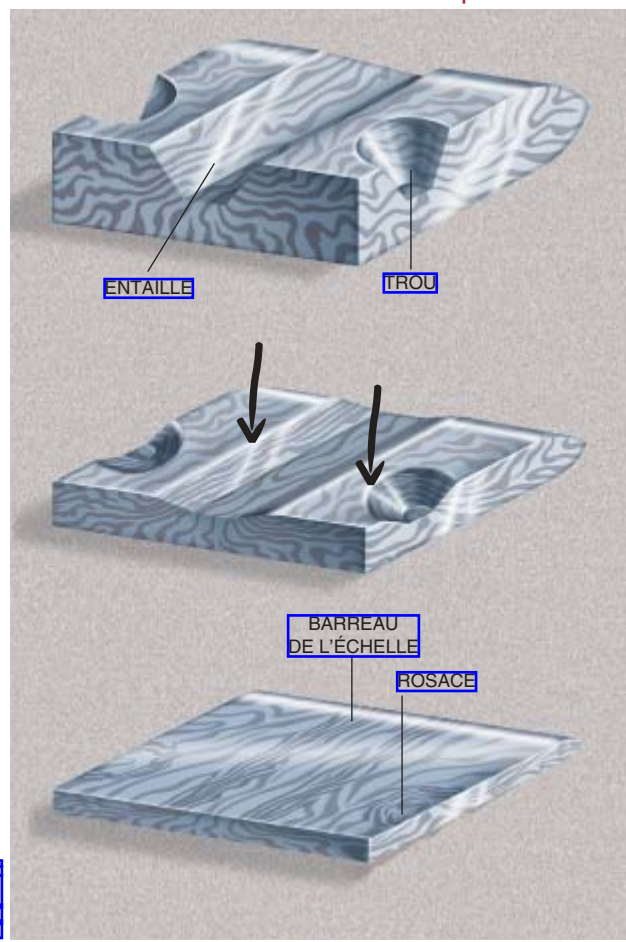
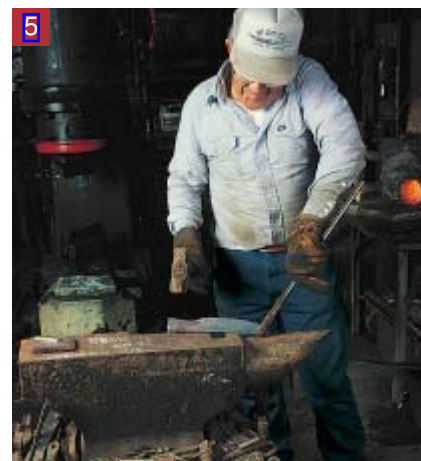
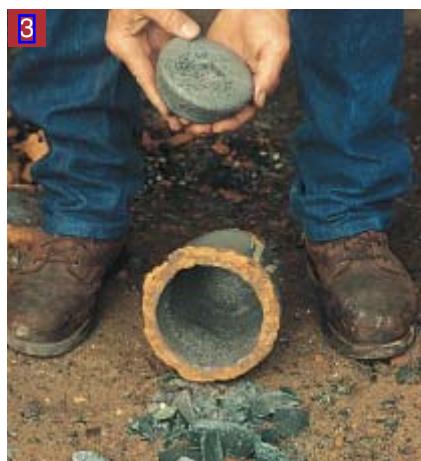
avoir cherché la réponse à notre question pendant deux ans, nous avons fini par comprendre que ces traces de vanadium étaient, en fait, essentielles.

Diverses expériences ont montré que des quantités aussi infimes de vanadium dans des alliages de fer et de carbone très purs suffisent à déclencher la formation des bandes de cémentite caractéristiques des aciers de Damas. Le molybdène participe également à l'effet désiré et, dans une moindre mesure, le chrome, le niobium et le manganèse. En revanche, d'autres éléments, tels le cuivre et le nickel, ne favorisent pas la formation de bandes de carbure. Une analyse microscopique

réalisée au moyen d'une sonde électronique a confirmé que les éléments efficaces sont précisément ceux qui subissent une microségrégation dans les régions interdendritiques lors de la formation du lingot, et il n'est pas nécessaire que leur concentration soit supérieure à 0,02 pour cent.

Nous en avons conclu que la formation de bandes de cémentite est due à la microségrégation de certaines impuretés qui favorisent à leur tour la microségrégation des particules de carbure de fer. Pour le vérifier, nous avons fait des expériences où nous empêchions la microségrégation des atomes d'impuretés lors de la for-

mation du lingot initial et nous avons observé si les bandes de carbure se formaient ou non au cours des opérations de forgeage suivantes. Comme métal de départ, nous avons sélectionné de petits morceaux de lames anciennes et modernes qui présentaient tous de belles bandes et nous les avons portés à des températures supérieures de 50 °C environ à la température critique A_{cm} . À cette température, toutes les particules de carbure de fer se dissolvent dans l'austénite. Ensuite, nous trempions les morceaux de métal chaud dans l'eau afin d'obtenir un refroidissement brutal de l'acier, un procédé bien connu



L'ECHELLE DE MAHOMET et les motifs en rosace peuvent être obtenus en façonnant des rainures et des trous dans la lame lorsqu'elle est proche de l'épaisseur désirée. Au cours des opérations suivantes de forgeage, le martelage du métal tasse le métal et comble les dépressions pratiquées à la surface du métal. Ainsi, les bandes présentes sur les faces verticales des trous et des rainures sont resserrées et forment les motifs que l'on observe sur les lames anciennes.

sous le nom de trempe, au cours duquel l'acier cristallise sous une forme dépourvue de carbone nommée martensite. Comme nous le prévoyions, en l'absence de carbure, les motifs damassés qui en sont constitués avaient disparu.

Expériences cruciales

Pour les faire réapparaître, nous avons fait subir aux morceaux testés des cycles successifs de chauffage qui portaient le métal à 50 °C au-dessous de la température critique A_{cm} ; ensuite, nous les laissions refroidir lentement à l'air libre. Chaque cycle devait ainsi laisser le temps aux particules de carbure de croître et de subir une microségrégation. Après le premier cycle, les particules de carbure réapparaissaient, mais étaient réparties au hasard dans la masse du métal. Après un ou deux cycles supplémentaires, elles commençaient à s'aligner suivant des bandes diffuses et, après six à huit cycles, les bandes apparaissaient nettement. Ainsi, dans la masse du métal de nos échantillons, il existait bien des zones qui favorisent la présence des particules de carbure.

Dans l'une de nos expériences, nous avons porté la température de chauffage bien au-delà de la température critique A_{cm} (à 1 200 °C, juste au-dessous du point de fusion de l'acier) et nous l'avons maintenue pendant 18 heures. Les cycles thermiques ultérieurs ont vu réapparaître les particules de cémentite, mais elles ne se sont pas rassemblées en bandes bien distinctes. Or, les calculs montrent qu'au cours d'un traitement à si haute température, la diffusion des atomes l'emporte sur la microségrégation et efface les zones de concentration élevée en impuretés.

Dans une autre expérience, notre alliage ne contenait aucune impureté. Dans ce cas, même après de nombreux cycles de chauffage et de refroidissement, les particules de carbure de fer formées dans les lingots ne se ras-

semblaient jamais en bandes de cémentite, ni même en amas un tant soit peu distincts. Dès que nous ajoutions les impuretés à ces mêmes lingots, les moires de cémentite réapparaissaient.

Aujourd'hui, nous sommes en mesure d'expliquer comment les forgerons d'autrefois parvenaient à faire apparaître des échelles de Mahomet. Nos travaux ont confirmé l'une des théories avancées par le passé, selon laquelle les « barreaux » de l'échelle étaient produits en creusant des rainures sur la lame. Nous avons fabriqué une lame dont l'épaisseur était proche du résultat final désiré ; puis nous avons pratiqué une série d'entailles qui ont été, au cours des derniers cycles de forgeage, martelées pour être comblées. Ce procédé qui tasse le métal, réduit la surface de l'entaille et resserre d'autant l'espacement entre les bandes qui s'y trouvaient (*voir l'encadré de la page 52*). Le motif rond, entre les barreaux de l'échelle, est connu sous le nom de rosace, et se retrouve sur certains des cimenterres les plus anciens. On l'obtient de manière analogue, en creusant des trous peu profonds dans le métal au même moment que les rainures.

Pourquoi le secret de fabrication des aciers damassés a-t-il été perdu il y a 200 ans ? Les quatre lames anciennes que nous avons analysées contenaient toutes du vanadium, présent à l'origine dans les lingots de wootz à partir desquels elles ont été forgées, et qui semble expliquer la présence des bandes de cémentite. Toutefois, on imagine facilement que si, en raison de l'évolution des échanges commerciaux, les lingots fournis ne contenaient plus les impuretés requises, les forgerons du Moyen-Orient ne pouvaient plus faire apparaître les merveilleux motifs de leurs lames, sans comprendre pourquoi. Si cet état de fait a persisté, après une ou deux générations, le secret de la légendaire épée de Damas a dû se perdre. Aujourd'hui, le voile recouvrant ce mystère semble avoir été levé.

John VERHOEVEN est professeur émérite de science des matériaux et d'ingénierie de l'Université de l'Iowa.

J.D. VERHOEVEN, A.H. PENDRAY et W.E. DAUKSCH, *Archaeotechnology : The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades*, in JOM : A Publication of

the Minerals, Metals and Materials Society, vol. 50, n° 9, pp. 58-64, septembre 1998.

Cyril S. SMITH, *History of Metallography : The Development of Ideas on the Structure of Metals before 1890*, MIT Press, 1988.

Leo S. FIGIEL, *On Damascus Steel*, Atlantis Arts Press, 1991.

L'âge des plus anciennes étoiles

BRIAN CHABOYER

Les plus anciennes étoiles de la galaxie semblaient plus âgées que l'Univers. Ce paradoxe est enfin levé grâce aux données fournies par le satellite Hipparcos et aux progrès de la physique stellaire.

Il y a quelques années, les débats sur le «paradoxe de l'âge de l'Univers» agitaient la communauté des astrophysiciens. Les mesures de la vitesse d'expansion de l'Univers semblaient indiquer qu'il ne s'était écoulé que 14 milliards d'années depuis le Big Bang, alors que certaines étoiles étaient bien plus âgées. À l'époque, la plupart des astronomes croyaient davantage aux méthodes de datations des étoiles qu'aux théories cosmologiques. Les cosmologistes étaient donc sommés de trouver la solution au problème.

Comme dans d'autres domaines, une question qui ne trouvait pas de réponse compatible avec les théories en usage nous a mis sur la piste d'une découverte fondamentale. Les débats sur l'âge de la Terre ont aidé Charles Darwin à formuler sa théorie de l'évolution par sélection naturelle ; les désaccords sur l'âge du Soleil n'ont pu être résolus qu'avec la découverte de la physique nucléaire, et les physiciens comme Albert Einstein n'abandonnèrent l'idée d'un Univers statique et éternel, pourtant remise en cause par la relativité générale, que lorsqu'Edwin Hubble observa que les galaxies s'éloignent de nous.

De la même façon, on peut dire que la crise ouverte par le paradoxe de l'âge de l'Univers fut le premier acte de la prise de conscience que l'Univers est dominé non pas par la matière ordinaire, mais par un type d'énergie dite sombre dont les cosmologistes ignorent presque tout, si ce n'est qu'elle semble accélérer l'expansion de l'Univers. Cette accélération cosmique a pour conséquence de reculer la date

calculée de l'origine de l'Univers et promet de lever le paradoxe.

La vitesse d'expansion de l'Univers faisait l'objet d'un débat souvent virulent depuis un demi-siècle (les estimations effectuées par différentes équipes variaient du simple au double!). En revanche, l'estimation de l'âge des plus anciennes étoiles de la Galaxie, réalisée notamment par Pierre Demarque de l'Université Yale, était, elle, très fiable. Depuis le milieu des années 1960, les modèles théoriques prédisaient que les étoiles les plus vieilles étaient âgées de 15 milliards d'années, et cette estimation était acceptée par l'ensemble des spécialistes de physique stellaire. Cette certitude a été ébranlée il y a cinq ans, quand les données fournies par le satellite de cartographie céleste en trois dimensions, *Hipparcos*, associées aux nouveaux modèles de l'évolution des étoiles, ont forcé les astronomes à revoir à la baisse l'âge des étoiles les plus anciennes : elles n'ont «que» 13 milliards d'années!

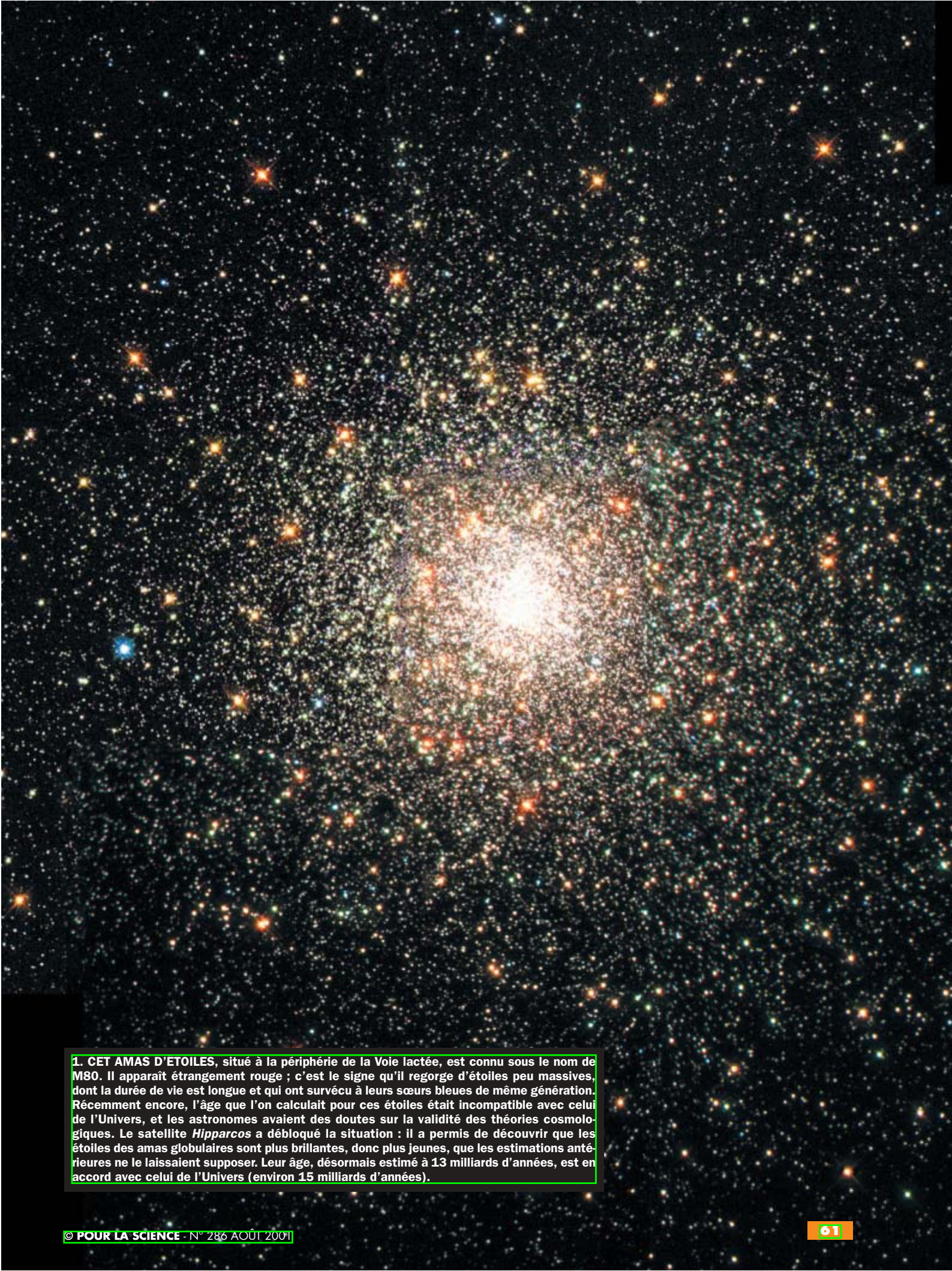
Consommation stellaire

Comment peut-on estimer l'âge d'une étoile? Imaginez que le compteur kilométrique de votre voiture ne fonctionne plus. Comment connaître la distance qu'elle a parcourue? Le problème est facile à résoudre si vous connaissez la capacité du réservoir et la consommation au kilomètre de votre véhicule : il suffit de diviser la quantité de carburant utilisée par la consommation. La méthode employée dans le cas des étoiles est analogue. La taille du réservoir est remplacée par la masse de l'étoile, et la

consommation au kilomètre par le rendement des réactions nucléaires.

Les étoiles sont des boules de plasma chaud en équilibre. Elles tendent à s'effondrer sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre poids, mais l'énergie thermique interne et la pression exercée par la lumière qu'elles rayonnent les en empêchent. Comme les étoiles déversent de l'énergie dans l'espace, elles devraient perdre leur feu intérieur et se contracter rapidement en vieillissant (dans ce cas, le Soleil, par exemple, n'aurait vécu que quelques millions d'années en tout). Heureusement, des réactions thermonucléaires qui ont lieu dans leur cœur fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir cet équilibre pendant très longtemps, parfois quelques milliards d'années.

Pendant l'essentiel de leur vie, les étoiles sont alimentées par la fusion thermonucléaire de l'hydrogène en hélium. Cette réaction ne peut avoir lieu qu'aux très hautes températures qui règnent dans le cœur des étoiles (de quelques millions à quelques centaines de millions de degrés). Dans ces conditions, la vitesse moyenne d'agitation des noyaux atomiques est suffisante pour leur permettre de se rencontrer malgré la répulsion électrostatique qu'ils exercent les uns sur les autres. Le bilan de la réaction est le suivant : quatre noyaux d'hydrogène (constitués chacun d'un unique proton) donnent un noyau d'hélium (comportant deux protons et deux neutrons). Quatre protons pèsent 0,7 pour cent de plus qu'un noyau d'hélium ; au cours de la fusion, la fraction de masse manquante a été convertie en énergie selon l'équation d'Einstein $E = mc^2$. Le



1. CET AMAS D'ETOILES, situé à la périphérie de la Voie lactée, est connu sous le nom de M80. Il apparaît étrangement rouge ; c'est le signe qu'il regorge d'étoiles peu massives, dont la durée de vie est longue et qui ont survécu à leurs sœurs bleues de même génération. Récemment encore, l'âge que l'on calculait pour ces étoiles était incompatible avec celui de l'Univers, et les astronomes avaient des doutes sur la validité des théories cosmologiques. Le satellite *Hipparcos* a débloqué la situation : il a permis de découvrir que les étoiles des amas globulaires sont plus brillantes, donc plus jeunes, que les estimations antérieures ne le laissaient supposer. Leur âge, désormais estimé à 13 milliards d'années, est en accord avec celui de l'Univers (environ 15 milliards d'années).

Soleil, par exemple, émet 4×10^{26} watts de rayonnement électromagnétique (essentiellement sous forme de lumière visible), ce qui équivaut à quatre millions de tonnes de matière transformées en énergie chaque seconde. Ainsi, chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transmutes en 596 millions de tonnes d'hélium.

A ce rythme, le Soleil brûle environ un pour cent de sa masse en un milliard d'années. Étant donné que seuls dix pour cent de la masse du Soleil seront utilisables comme combustible (c'est la proportion qui atteint, au centre de l'étoile, la température et la densité nécessaires), le Soleil tirera son énergie de la fusion de l'hydrogène pendant dix milliards d'années. Au cours de cette période, que l'on nomme séquence principale de l'étoile, sa luminosité et sa température resteront à peu près constantes.

La datation d'une étoile – ou plutôt d'une population d'étoiles – repose sur le fait que la durée de la séquence principale varie d'une étoile à l'autre. Les étoiles plus massives que le Soleil brûlent leur hydrogène beaucoup plus vite, si vite que, même avec une quantité initiale de combustible largement supérieure, elles épuisent leurs réserves plus rapidement. Cette tendance peut être déduite des lois physiques qui gouvernent la structure d'une étoile : la loi de l'équilibre hydrostatique (qui traduit l'équilibre entre la force de gravitation et la pression du gaz), la loi des gaz parfaits (qui relie la pression, la température et la densité) et la loi du transport radiatif de la chaleur (qui détermine le gradient de température nécessaire pour que l'étoile libère de l'énergie vers l'extérieur au même rythme qu'elle en produit dans son cœur). On en déduit que la luminosité d'une étoile est proportionnelle à sa masse à la puissance quatre. Par ailleurs, la quantité d'hydrogène disponible est, quant à elle, directement proportionnelle à la masse. Par conséquent, la durée de vie d'une étoile sur la séquence principale est approximativement proportionnelle à l'inverse du cube de sa masse. Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil est 10 000 fois plus brillante, mais vit 1 000 fois moins longtemps, soit dix millions d'années environ. Les étoiles massives brûlent la chandelle par les deux bouts : elles brillent beaucoup, mais au prix d'un terrible gaspillage et d'une vie très courte.

Une étoile qui quitte la séquence principale est facile à reconnaître. Son

cœur se contracte et s'échauffe de sorte qu'il continue à produire des réactions nucléaires (par exemple en fusionnant les noyaux d'hélium). Les couches supérieures de l'étoile sont repoussées vers l'extérieur et l'astre gonfle comme un ballon de baudruche. Chaque unité de surface de l'étoile reçoit moins d'énergie en provenance du cœur et le disque stellaire rougeoie, au lieu d'être chauffé à blanc. L'étoile est devenue une géante rouge, un stade caractérisé par une plus grande luminosité, mais aussi par une température de surface inférieure. Cette évolution est facile à observer lorsqu'on classe les étoiles en fonction de leur couleur (qui dépend directement de la température de surface) et de leur éclat (qui dépend de l'énergie lumineuse émise totale). Un tel diagramme, dit de Hertzsprung-Russell, rassemble pratiquement toutes les données disponibles pour les astronomes. Les étoiles de la séquence principale se répartissent sur un segment de droite oblique qui va des étoiles petites, froides (donc rouges) et peu brillantes aux étoiles massives, chaudes (donc bleues) et très lumineuses. Quand l'étoile devient une géante rouge, elle quitte la séquence principale et se retrouve dans un domaine du diagramme correspondant aux basses températures mais à de grandes valeurs de l'éclat lumineux (voir la figure 5).

La datation des plus anciennes étoiles

Bien que les astronomes puissent calculer la durée de vie totale d'une étoile, il est difficile de savoir combien de temps elle a déjà vécu. Une étoile de la séquence principale est un modèle de stabilité et on ne sait pas lui attribuer un âge précis jusqu'à ce qu'elle commence à évoluer et trahisse ainsi son grand âge. Pour cette raison, les astronomes étudient généralement des populations entières d'étoiles dont ils peuvent supposer qu'elles sont nées à peu près au même moment. Dans un tel groupe, certaines étoiles – les plus massives – sont en train de quitter la séquence principale au moment où nous les observons, même si les autres ne portent encore aucun stigmate du passage du temps. On peut dater les étoiles qui quittent la séquence principale et attribuer leur âge au groupe tout entier.

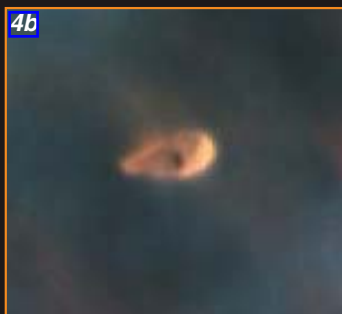
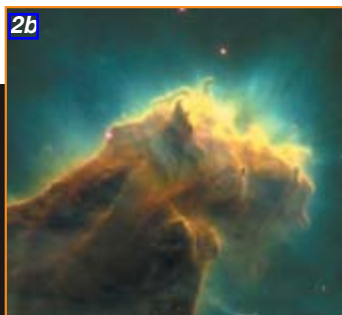
Les plus anciennes étoiles semblent être localisées au sein de groupements stellaires nommés amas globulaires. Ce sont des concentrations stellaires com-

pactes et denses, renfermant de 100 000 à quelques millions d'étoiles au sein d'une sphère d'une centaine d'années-lumière de diamètre. Alors que 75 pour cent des étoiles de notre Galaxie (y compris le Soleil) se répartissent dans un grand disque aplati (la Voie lactée), les amas globulaires se trouvent dans un halo sphérique qui englobe tout le disque. D'autres grandes galaxies contiennent également des amas globulaires répartis de la même façon.

La localisation des amas nous renseigne assez bien sur leur âge. En effet, dans les années 1930, l'astronome d'origine allemande Walter Baade a montré que les étoiles de notre Galaxie se classent en deux catégories. La «population I» contient des étoiles brillantes et bleues qui, étant massives, ont une durée de vie courte et doivent être jeunes. On ne les trouve que dans le disque galactique. L'autre catégorie, la «population II», regroupe les étoiles du halo, qui sont en général moins brillantes et plus rouges. Aujourd'hui, nous connaissons l'origine de ces deux populations distinctes : le disque contient de nombreux nuages de gaz à partir desquels de nouvelles étoiles peuvent se former, ce qui explique qu'il renferme quantité de jeunes étoiles flamboyantes. À l'opposé, le halo de notre Galaxie manque de gaz, et peu d'étoiles nouvelles s'y forment.

En fait, les amas sont peut-être un reliquat des briques fondamentales qui ont contribué à la formation de notre Galaxie. Leurs étoiles contiennent peu d'éléments plus lourds que l'hélium. Ces éléments, que les astronomes nomment métaux (à la grande consternation des chimistes), constituent environ deux pour cent de la masse du Soleil, mais seulement 0,01 à 0,5 pour cent de la masse d'une étoile d'amas globulaire. Ils ne peuvent être créés que par les réactions thermonucléaires qui ont lieu dans le cœur des étoiles. La rareté de ces éléments dans les étoiles des amas globulaires indique qu'elles se sont formées peu après le Big Bang, à partir de matériaux qui n'avaient pas encore été «pollués» par les produits des générations successives d'étoiles.

Il semble que les étoiles d'un amas globulaire donné aient toutes le même âge. On constate cette homogénéité lorsque l'on place les étoiles d'un amas dans un diagramme de Hertzsprung-Russell. Dans la séquence principale, les étoiles de masse relativement faible et à longue durée de vie sont légion,



2. LA NEBULEUSE NGC 3603 contient des étoiles à différents stades de leur évolution. Au centre, un amas de jeunes étoiles massives et bleues s'est formé il y a quelques millions d'années seulement (1). Elles émettent un intense rayonnement ultraviolet et un flux de particules qui éclairent leur matrice de gaz et de poussière et la repoussent. Des zones de plus forte densité (2) résistent mieux à cette érosion et forment des «piliers» de gaz qui pointent vers l'amas. Un zoom sur le sommet de structures semblables dans la nébuleuse de l'Aigle (2b) montre de petits ergots encore plus denses. Cette fragmentation du nuage en éléments de plus en plus concentrés est le prélude à la formation de globules de Bok (3), puis à leur effondrement en une masse sphérique protostellaire. Sur la

même image, on observe une protoétoile (4) qui ne survivra probablement pas au souffle intense de ses grandes sœurs. D'autres protoétoiles ont été photographiées dans la nébuleuse d'Orion (4b et 4c) : autour de l'étoile en train de briller de ses premiers feux, on observe un disque de poussière qui formera vraisemblablement un système de planètes. Arrivée à la fin de sa vie, une étoile massive devenue géante est prise de violents «hoquets» qui éjectent le gaz de ses couches supérieures (5 et 6). Elle explosera violemment en supernova et restituera dans l'espace la matière qu'elle aura transmuté tout au long de sa vie. L'image en médaillon (5b) montre les restes d'un tel cataclysme observé en 1987 dans le Grand nuage de Magellan.

mais les étoiles les plus massives ont toutes disparu : elles ont évolué en géantes rouges, puis sont mortes. Seules subsistent, sous forme de géantes rouges, celles qui sont en train de quitter la séquence principale à la date où nous observons. Ainsi, les étoiles de l'amas se répartissent sur une ligne en forme de coude : la séquence principale se termine de façon abrupte, là où la branche des géantes rouges la rejoint (voir la figure 5). Cette coupure de la séquence principale confirme que les étoiles de l'amas se sont toutes formées à la même période.

Dès lors, la détermination de l'âge des amas globulaires devrait être un exercice relativement simple. Les astronomes établissent un diagramme de Hertzsprung-Russell pour un large échantillon d'étoiles de l'amas. Le diagramme révèle les étoiles qui viennent d'épuiser leur réserve d'hydrogène. On déduit de la luminosité et de la température de surface de ces étoiles une masse et, par conséquent, un âge. Dans la pratique, trois facteurs compliquent la tâche. La composition chimique exacte des étoiles modifie leur structure et leur évolution. Par ailleurs, la méthode dépend beaucoup de la fiabilité des modèles théoriques qui décrivent le

fonctionnement des étoiles. Pour finir, il est difficile de connaître la luminosité réelle d'une étoile (sa luminosité intrinsèque), car nous n'avons accès qu'à son éclat apparent vu de la Terre.

De l'influence des «métaux» sur l'âge des étoiles

Bien que les métaux ne constituent qu'une toute petite fraction de la masse d'une étoile, ils agissent sur sa structure. Ces éléments contribuent à la masse de l'étoile, mais ne subissent pas de fusion. Ils réduisent l'efficacité de la chaudière nucléaire, de sorte que le cœur de l'étoile doit être plus chaud pour maintenir l'équilibre. De plus, les métaux absorbent la lumière et entravent l'évacuation de l'énergie stellaire dans l'espace. Sous l'effet de cette absorption, l'étoile enflé ; le même flux d'énergie est réparti sur une surface plus grande, et la température de surface décroît. En conséquence, une étoile pauvre en métaux est plus brillante qu'une étoile de même masse riche en métaux, et sa température de surface est supérieure. Quand les astronomes surestiment le contenu en métaux d'une étoile, ils surestiment sa masse et, par conséquent, sous-estiment son âge.

Pour établir la composition d'une étoile, les astronomes analysent son spectre. Le spectre visible d'une étoile, obtenu en décomposant la lumière que nous en recevons, est continu mais strié de raies sombres qui correspondent aux longueurs d'onde caractéristiques absorbées par les différents éléments chimiques présents dans les couches externes de l'astre. Depuis une vingtaine d'années, grâce à la construction des grands télescopes et à l'introduction de détecteurs électroniques très sensibles, les astronomes obtiennent des spectres dont la résolution réduit notablement les erreurs de mesure (elles sont divisées par trois). À l'aide du télescope Keck de l'Observatoire d'Hawaii, Judith Cohen, de l'Institut californien de technologie, Raffaele Gratton, de l'Observatoire astronomique de Padoue, et leurs collègues ont récemment déterminé l'abondance des métaux dans les amas globulaires NGC 6528 et NGC 6553 avec une précision inégalée.

Ces compositions chimiques étant connues, reste la deuxième difficulté : les modèles théoriques ne sont que des approximations de la situation réelle au sein des étoiles. L'étude approfondie du Soleil a récemment révélé les limites de ces modèles. Jørgen Christensen-Dalsgaard, de l'Université d'Århus au Danemark, David Guenther, de l'Université Saint Mary, en Nouvelle-Écosse, et leurs collègues ont, par exemple, précisé notre connaissance de l'intérieur du Soleil en étudiant comment les ondes sismiques – analogues à celles qui parcourent la Terre – se propagent à l'intérieur du Soleil. L'étude de la propagation de ces ondes nous renseigne sur les variations de pression et de densité dans le Soleil et indiquent la présence de courants de convection ou de zones turbulentes dans le plasma solaire. Leur modèle fait apparaître que l'hélium doit



3. L'AMAS GLOBULAIRE G1 est un groupement gigantesque d'étoiles (a) situé dans le halo de la galaxie d'Andromède (une galaxie géante semblable à la nôtre). L'amas des quintuplets (b), situé près du centre de notre Galaxie, est d'un genre très différent. Il s'agit d'un amas ouvert, un groupement très récent d'étoiles peu nombreuses. Il n'est pas stable, et les astres qui le composent dérivent dans l'espace et s'éloignent les uns des autres. Cependant, dans les deux cas, les étoiles regroupées en amas sont nées au même moment. On remarque que les étoiles ont des couleurs différentes correspondant à des températures de surface qui peuvent varier de quelques dizaines de milliers de degrés (en bleu) à environ 4 000 degrés (en rouge).



s'enfoncer lentement vers le cœur de notre étoile et y déloger l'hydrogène, phénomène qui réduit la quantité de carburant disponible et diminue l'espérance de vie du Soleil. Par ailleurs, nous avons précisé d'autres mécanismes, par exemple les échanges de chaleur par convection et les réactions du gaz solaire aux changements de température et de pression. Tous ces perfectionnements observationnels et théoriques ont eu pour effet de réduire de 14 pour cent les âges estimés des amas globulaires. Doit-on s'attendre à de nouvelles surprises ? Il est difficile de le dire. Les modèles stellaires ont été améliorés en les comparant au Soleil – la seule étoile que nous puissions étudier en détail – et ils le décrivent maintenant de façon très satisfaisante.

L'âge des incertitudes

La détermination de la luminosité absolue des étoiles reste la principale difficulté, car l'éclat apparent d'une étoile dépend à la fois de sa luminosité intrinsèque et de la distance qui nous en sépare et que nous savons mal évaluer. La voûte céleste semble sans profondeur et pour accéder à la troisième dimension, les astronomes doivent faire appel à diverses techniques, chacune adaptée à une échelle de distances différente.

Pour les objets assez proches, on recourt à la méthode dite de la parallaxe. La parallaxe désigne la modification apparente de position d'un objet lorsque notre point d'observation change. Vous pouvez constater ce phénomène en regardant votre index, bras tendu devant vous, avec un œil, puis avec l'autre : votre doigt semble se déplacer devant les objets situés à l'arrière-plan. Si vous rapprochez votre doigt de votre nez, vous remarquez que le changement apparent de position, la parallaxe, augmente. En vertu des règles trigonométriques, la parallaxe d'un objet – l'angle sous lequel on voit son déplacement apparent – est inversement proportionnelle à sa distance.

Pour mesurer la distance des étoiles, les astronomes cherchent à détecter leur parallaxe, c'est-à-dire leur déplacement apparent à mesure que la Terre tourne autour du Soleil en une année : les étoiles proches semblent se déplacer par rapport aux étoiles lointaines. Étant donné que le diamètre de l'orbite terrestre mesure 150 millions de kilomètres environ, une étoile qui se décale sur le ciel d'une seconde d'arc en six mois doit



4. LA NAISSANCE DES ÉTOILES est un phénomène violent. Le nuage interstellaire géant Orion A (a) est tout entier éclairé par les jeunes étoiles qui sont nées en son sein. Elles éjectent des jets de matière (b) et provoquent des ondes de choc qui déstabilisent le gaz environnant, dont certaines zones vont s'effondrer sous leur propre poids et donner naissance à de nouvelles étoiles. De ce fait, les naissances d'étoiles se propagent dans le milieu interstellaire à la manière d'une réaction en chaîne. Ainsi, les étoiles ont tendance à naître en groupes, ce qui explique que les astres qui constituent les amas ont tous le même âge.

être située à 3,26 années-lumière, ou, par définition, à un parsec. Dans la pratique, les télescopes au sol ne peuvent pas discerner de parallaxe inférieure à un centième de seconde d'arc, ce qui correspond à une étoile située à 100 parsecs. En fait, si l'on exige une précision meilleure que dix pour cent, les télescopes au sol sont incapables de déterminer la distance des étoiles au-delà de dix parsecs.

Malheureusement, à l'échelle galactique, une distance de dix parsecs est infime. De plus, les erreurs augmentent avec la distance. Les télescopes fonctionnant à leur limite de résolution surestiment les petites parallaxes et, par conséquent, sous-évaluent les distances. Afin de donner une base plus solide au calcul des distances cosmiques, l'Agence spatiale européenne a lancé, en 1989, le satellite *Hipparcos*. Sa mission consistait à établir une carte tridimensionnelle précise des étoiles situées à quelques centaines de parsecs. Doté d'une résolution d'un millième de seconde d'arc, il avait accès à des étoiles dix fois plus lointaines que les observateurs au sol. Bien sûr, cela reste la banlieue du Soleil et c'est insuffisant pour mesurer précisément la distance qui nous sépare des étoiles dans le plus proche amas globulaire (situé à 2 000 parsecs environ). Toutefois, *Hipparcos* nous a permis de déterminer précisément la distance d'étoiles voisines,

pauvres en métaux, assez semblables à celles présentes dans les amas globulaires. De ce fait, indirectement, les astronomes ont déterminé avec une assez bonne précision, la distance des amas globulaires en supposant que leurs étoiles ont la même luminosité intrinsèque que les étoiles proches de même composition chimique et de même couleur (c'est-à-dire de même température de surface).

Plus jeunes qu'on ne le pensait

On en déduisit que les amas globulaires sont plus éloignés qu'on ne le pensait d'au moins dix pour cent. Par conséquent, ils sont plus lumineux que prévu, et donc plus jeunes. Toutefois, ces nouvelles estimations ne font pas l'unanimité ; les modèles stellaires ne sont peut-être pas totalement fiables et notre estimation indirecte de la distance des amas globulaires est peut-être erronée.

Les astronomes ont cherché à confirmer ces estimations à l'aide de mesures indépendantes. Une des méthodes employées consiste à examiner le mouvement d'un grand nombre d'étoiles dans un amas globulaire. Le mouvement de chaque étoile a deux composantes : la vitesse radiale (le long de la ligne de visée)

La datation radioactive des étoiles

Pour estimer l'âge d'objets anciens de la période historique et préhistorique, on utilise souvent la datation radioactive. On se sert de l'isotope radioactif du carbone, le carbone 14, qui a une demi-vie de 5 570 ans. Cela signifie qu'au bout de ce laps de temps, la moitié des atomes de carbone 14 initialement présents dans un échantillon se seront désintégrés. Connaissant le rapport initial des abondances en carbone 12 (le carbone ordinaire, stable) et en carbone 14 dans un échantillon, on peut, en mesurant ce rapport aujourd'hui, en déduire son âge. À l'échelle de l'âge de l'Univers, on ne peut utiliser que des éléments ayant une demi-vie de plusieurs milliards d'années.

Les éléments chimiques présents dans les étoiles ont essentiellement trois origines. L'hydrogène et l'hélium, les plus abondants, sont «primordiaux» : ils se sont formés au cours des trois premières minutes de l'Univers. La plupart des éléments plus lourds, de l'hélium au fer, sont formés par fusion thermonucléaire dans le cœur des étoiles. Lorsque les étoiles les plus massives explosent en supernovae, elles restituent au milieu interstellaire ces éléments chimiques plus lourds que l'hélium qui entreront dans la composition de nouvelles étoiles. L'énergie disponible au cours de cette explosion permet de synthétiser une troisième famille d'éléments formée par exposition des noyaux de fer à un flux intense de neutrons. Les atomes de fer (et ceux de masse atomique proche) absorbent une partie des neutrons incidents, et le nombre de nucléons contenus dans leur noyau augmente. Ceci produit la suite des éléments chimiques jusqu'aux éléments les plus lourds, dont le thorium 232 et l'uranium 235 et 238, tous trois radioactifs.

Les premières tentatives de datation radioactive des étoiles reposaient sur la mesure du rapport des abondances en thorium 232 (radioactif) et en europium 151 (stable), deux éléments produits par capture de neutrons. Toutefois, la demi-vie du thorium 232 est d'environ 14 milliards d'années – plus longue que la vie des étoiles que l'on veut dater – et la précision de la méthode est mauvaise. Par ailleurs, Marcel Arnould et ses collègues

de l'Université libre de Bruxelles ont souligné que cette méthode repose sur une hypothèse fragile : on postule que le rapport initial des abondances en thorium et en europium est toujours le même d'une étoile à l'autre. Or, le nombre de nucléons contenus dans le thorium (232) est très supérieur à celui des nucléons contenus dans l'europium (151). Un flux de neutrons suffisant pour produire du thorium produira de l'europium en abondance, tandis qu'un flux de neutrons plus faible pourrait produire de l'europium en quantité notable, sans être assez intense pour produire du thorium. Ainsi, le rapport initial des abondances en thorium et en europium dépend de l'intensité du bombardement de neutrons qu'a subi la matière de l'étoile. Vraisemblablement, il diffère d'une étoile à l'autre.

On s'affranchit de ces difficultés en abandonnant l'europium pour l'uranium 238, dont la demi-vie est égale à 4,47 milliards d'années (deux à trois fois moins que l'âge des plus vieilles étoiles), et dont le nombre de nucléons est presque le même que celui du thorium. Malheureusement, on détecte difficilement l'uranium dans les étoiles, car sa raie spectrale la plus intense est perdue parmi les raies du fer, un élément abondant chez les étoiles de composition chimique semblable à celle du Soleil. Dans les étoiles les plus anciennes, les éléments chimiques tels que le fer sont rares, mais la raie de l'uranium est très faible. Pourtant, nous avons récemment réussi à détecter l'uranium dans l'étoile CS 31082-001, une géante de l'hémisphère Sud. Cette étoile contient environ 1 000 fois moins d'éléments courants (jusqu'au fer) que le Soleil, mais elle est riche en éléments très lourds formés par capture de neutrons, parmi lesquels le thorium et l'uranium. Par ailleurs, le spectre de CS 31082-001 que nous avons obtenu bénéficiait de l'excellente résolution conférée par le très grand télescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO).

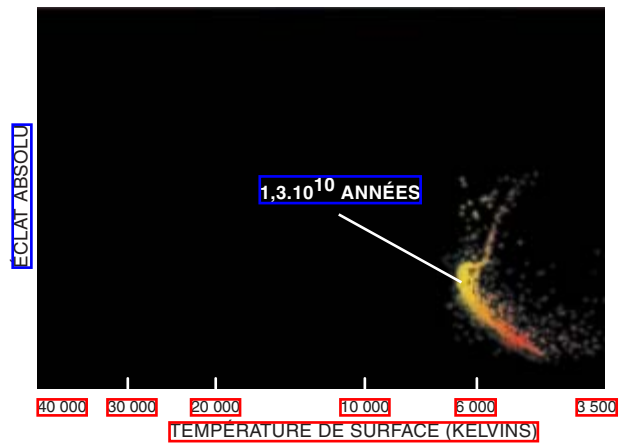
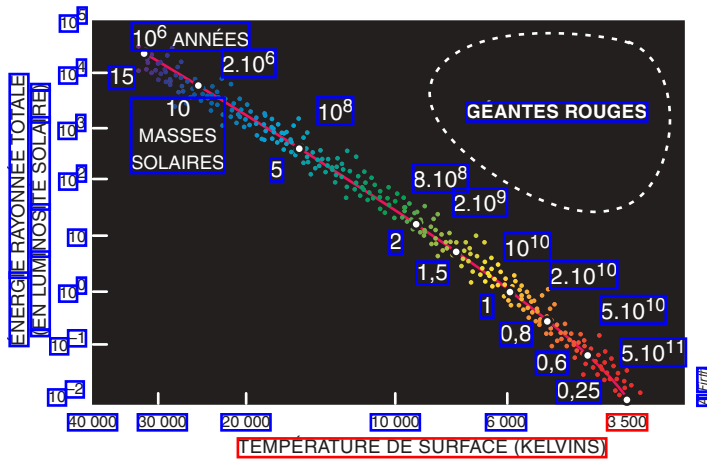
Nous avons constaté que les éléments très lourds, formés par capture de neutrons et proches de l'uranium (l'osmium et l'iridium, par exemple), sont présents avec des abondances qui représentent environ 12 pour cent des abondances solaires. Seules exceptions, le thorium et l'uranium sont encore plus rares puisqu'ils se désintègrent au cours du temps. En supposant que le thorium et l'uranium étaient initialement présents avec une abondance égale à 0,12 fois celle qui est la leur dans le Soleil, nous avons estimé qu'il se serait écoulé 12,5 milliards d'années (plus ou moins trois milliards) depuis la naissance de CS 31082-001. Par ailleurs, l'estimation de l'âge de cette étoile d'après les abondances en thorium et en europium est inacceptable (elle est proche de zéro!). Ceci confirme que le rapport initial thorium-europium n'est pas transposable d'une étoile à l'autre.

Nous connaissons encore mal le rapport actuel uranium-thorium dans CS 31082-001 et, surtout, le rapport initial au moment de la production de ces deux éléments. Il nous faudra encore améliorer ces deux valeurs pour réduire l'imprécision encore élevée sur la datation.

Roger CAYREL, Observatoire de Paris-Meudon



European Southern Observatory



5. LE DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, le plus important des diagrammes utilisés en astronomie, montre que la production d'énergie et la température des étoiles les placent toutes sur une portion de droite qui constitue la «séquence principale», où elles restent cantonnées tant que l'hydrogène est le combustible de base de leurs réactions thermonucléaires (à gauche). La température de surface d'une étoile est estimée grâce à la couleur correspondant à l'émission maximale d'énergie (du rouge pour les étoiles les plus froides au bleu pour les plus chaudes, en passant par le jaune des étoiles moyennes comme le Soleil). Quand l'étoile est proche de sa fin, elle quitte la séquence principale et bifurque vers la zone des géantes rouges (des

étoiles de basse température de surface, mais d'éclat important). Plus une étoile est massive, plus sa température de surface est importante et plus son séjour dans la séquence principale est court. Les astronomes ont reporté les éclats et les couleurs des étoiles brillantes de l'amas NGC 6652 (à droite), sur un diagramme Hertzsprung-Russell. Ces étoiles ont toutes le même âge : 13 milliards d'années. Celles dont la durée de vie est inférieure à cet âge ont toutes disparu et sont donc absentes du diagramme. Les autres sont encore sur la séquence principale. Les étoiles qui épuisent leur hydrogène en 13 milliards d'années exactement sont actuellement en train de migrer vers la région des géantes rouges, trahissant ainsi l'âge de l'amas.

et la vitesse angulaire (sur la voûte céleste). Les astronomes mesurent chaque composante par des moyens différents. La vitesse radiale est obtenue par effet Doppler (lorsqu'une étoile s'éloigne de nous, la lumière qu'elle nous envoie est décalée vers les grandes longueurs d'onde d'une quantité proportionnelle à sa vitesse). La vitesse angulaire est estimée d'après une série de photographies prises sur plusieurs années. Pour une étoile, ces deux vitesses sont indépendantes. Pour un amas globulaire, où des milliers d'étoiles se déplacent au hasard, la vitesse radiale moyenne devrait être égale à la vitesse angulaire moyenne. Or, la mesure des vitesses radiales par effet Doppler est indépendante de la distance des étoiles, alors que le déplacement angulaire est d'autant plus faible que la distance est grande. De cette façon, les astronomes ont estimé l'éloignement des amas globulaires.

On déduit de cette méthode qu'*Hipparcos* a surestimé les distances qui nous séparent des amas globulaires, même s'ils semblent effectivement être plus lointains qu'on ne le pensait auparavant. Aujourd'hui, on estime que les amas les plus vieux ont environ 13 milliards d'années (à 1,5 milliard d'années près). Cette datation révisée est en accord avec la nouvelle estimation de l'âge de l'Univers fondée sur les dernières mesures de sa vitesse d'expansion

(environ 15 milliards d'années). Pour la première fois depuis la naissance de la cosmologie moderne, il y a un demi-siècle, les cosmologistes et les spécialistes de la physique stellaire sont parvenus à se mettre d'accord.

La datation des étoiles dans les amas globulaires n'est pas le seul moyen d'estimer l'âge de notre Galaxie, et d'autres méthodes donnent des résultats très similaires. Il y a quelques mois, Roger Cayrel et ses collègues de l'Observatoire de Paris ont appliqué aux étoiles une technique utilisée de longue date par les archéologues et par les géologues : la datation par des isotopes radioactifs. Ils ont d'abord effectué les premières mesures précises de la quantité d'uranium contenue dans une autre étoile que le Soleil : CS 31082-001, une vieille étoile de population II. Connaissant la vitesse à laquelle l'uranium disparaît et à l'aide d'hypothèses sur la quantité d'uranium qui était présente dans l'étoile lors de sa formation, R. Cayrel et ses collègues ont estimé

qu'il s'était depuis écoulé 12,5 milliards d'années, à trois milliards d'années près (voir l'encadré ci-contre).

À terme, les isotopes radioactifs pourraient supplanter les amas globulaires comme outils de datation des étoiles. Auparavant, les astronomes s'attachèrent à confirmer les estimations fondées sur l'étude des amas globulaires. De nouveaux télescopes au sol, tel le très grand télescope VLT de l'Observatoire européen austral, promettent de réduire encore l'incertitude sur la composition chimique des étoiles contenues dans les amas. De nouveaux observatoires spatiaux, comme le satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne ou le satellite de la mission spatiale d'interférométrie SIM de la NASA, devraient, avec une résolution 250 fois supérieure à celle d'*Hipparcos*, déterminer directement la distance des amas les plus proches, supprimant les intermédiaires. Ils apporteront enfin une réponse définitive à une question qui tracasse les astronomes depuis plusieurs décennies.

Brian CHABOYER est professeur au département de physique et d'astronomie de l'Université Dartmouth, et participe à la mission d'interférométrie spatiale SIM de la NASA.

James KALER et W. FREEMAN, *Stars*, 1998.

Brian CHABOYER, *Globular Cluster Distance Determinations*, in *Post-Hipparcos Cosmic Candles*, sous la direction d'André

Heck et Filippina Caputa, Kluwer, 1999.

Mickael PERRYMAN, *Hipparcos : The Stars in Three Dimensions*, in *Sky and Telescope*, vol. 97, n° 6, juin 1999.

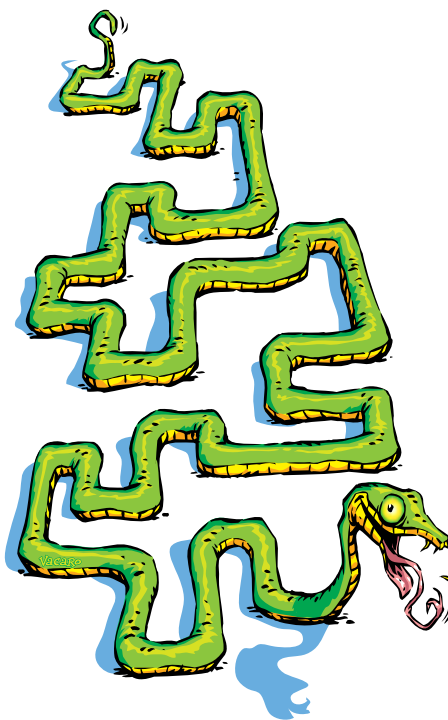
Yveline LEBRETON, *Stellar Structure and Evolution : Deductions from Hipparcos*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, pp. 35-77, 2000.

Les chemins aléatoires

WENDELIN WERNER

Physiciens et mathématiciens progressent conjointement dans l'étude des courbes planes qui cheminent de façon hasardeuse.

Une conjecture de Benoît Mandelbrot a été élucidée.



C'est le lendemain de Noël. Le petit Grégoire, assis au milieu de sa chambre, contemple le cadeau dont il rêvait depuis des mois : un train électrique. La boîte qui contient les rails est énorme, elle lui arrive sous le menton. Grégoire imagine sa chambre envahie par la voie d'un chemin de fer tortueux. Reproduire les grandes lignes droites du TGV Paris-Lyon ne l'intéresse pas, il préfère les petites voies sinueuses de montagne qui, lacet après lacet, s'enfoncent à travers les reliefs. Pour obtenir ces lacets, il laissera le hasard guider le tracé de la voie ; celui-ci ne respectera pas de plan élaboré à l'avance, mais se

constituera par exemple au gré des courbes et des lignes droites piochées au hasard dans la boîte. Comme la boîte de rails ne contient ni aiguillage, ni pont, la voie de chemin de fer sera une longue courbe sinueuse qui ne se coupe pas. Grégoire se demande combien de tracés différents sont possibles avec un nombre donné de rails. Sa chambre n'est peut-être même pas suffisamment grande pour contenir un tracé constitué de tous les rails. Il passe son regard d'un mur à l'autre pour en estimer la taille. Combien de rails va-t-il pouvoir placer ?

Sous des apparences ludiques, les questions posées par Grégoire ont intri-

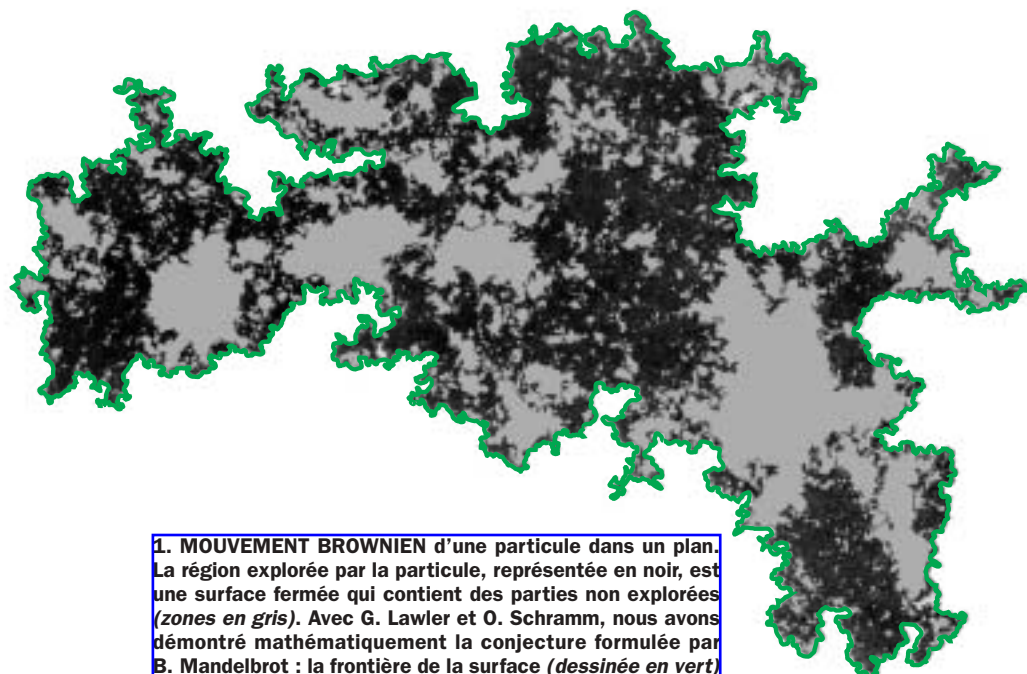
gué mathématiciens et physiciens depuis quelque soixante ans et cachent certains problèmes encore ouverts aujourd'hui.

On nomme des chemins qui ne repassent pas plusieurs fois par les mêmes points, des chemins auto-évitants. La nature nous en donne de nombreux exemples : rivières, contour de continents... Dans cet article, nous allons découvrir que certaines courbes aléatoires très irrégulières, comme la courbe verte de la figure 1, apparaissent naturellement comme des longs chemins auto-évitants construits à la manière de Grégoire. Tout d'abord, revenons un instant dans la chambre de celui-ci et tentons de répondre à sa première interrogation.

Le nombre de tracés

Combien Grégoire peut-il construire de voies de chemin de fer différentes ? Autrement dit, combien existe-t-il de chemins auto-évitants, tous constitués de n pas, dont les géométries sont différentes ? Considérons, parce que cela nous simplifie la tâche, que les uniques rails disponibles sont des segments identiques. Cette construction engendre des virages à angle droit, mais imaginons que le train de Grégoire est capable de s'en accommoder. Chaque nouveau rail peut prendre au plus trois orientations : les quatre directions Nord, Sud, Ouest et Est, moins celle d'où vient le tracé.

S'il est possible d'énumérer tous les tracés différents de faible longueur, il n'existe pas de formule explicite qui donne le nombre de tracés en fonction



1. MOUVEMENT BROWNIEN d'une particule dans un plan. La région explorée par la particule, représentée en noir, est une surface fermée qui contient des parties non explorées (zones en gris). Avec G. Lawler et O. Schramm, nous avons démontré mathématiquement la conjecture formulée par B. Mandelbrot : la frontière de la surface (dessinée en vert) est un chemin auto-évitant de dimension fractale $4/3$.

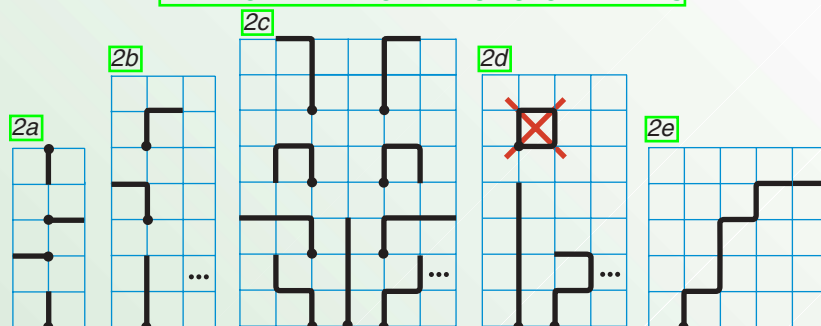
de n . Nous pouvons cependant démontrer (voir l'encadré ci-contre) que ce nombre contient un terme qui se comporte à l'infini comme μ à la puissance n . μ est compris entre 2 et 3, mais seules des simulations numériques nous renseignent sur sa valeur exacte : μ est approximativement égal à 2,638.

Comment ce résultat est-il modifié si Grégoire échange les rails à angle droit pour d'autres qui se rejoignent en faisant entre eux un angle de 120 degrés? En pavant tout le plan avec de tels segments, nous obtenons un réseau hexagonal en «nid d'abeille». Chaque nouveau segment est maintenant placé non pas selon trois possibilités, mais deux. Un raisonnement similaire à celui du réseau carré démontre l'existence d'une constante μ' différente de μ . La valeur de μ dépend du type de rails utilisés.

Au début des années 1980, Bernard Nienhuis, un physicien néerlandais, prédit que le nombre de tracés auto-évitants se comporte, outre le terme μ^n que nous avons établi, comme une puissance de n . Précisément, il approxima ce nombre par $\mu^n n^{11/32}$ et donna la valeur exacte de μ' du réseau en nid d'abeille. Nous avons montré que μ est fonction du type de rails utilisés, mais, à l'opposé, il est prédit que l'exposant 11/32 reste le même quel que soit le réseau sur lequel évolue le chemin auto-évitant. Ce genre de résultat est important : pour modéliser un phénomène, on est parfois conduit à discrétiser l'espace pour réduire le nombre de variables à traiter. Or, la discrétisation d'un gaz ou d'un liquide est arbitraire : faut-il faire évoluer les atomes sur les nœuds d'un réseau carré ou bien hexagonal? Un résultat indépendant du type de réseau est particulièrement intéressant, car cela laisse penser qu'il reste vrai pour le phénomène réel.

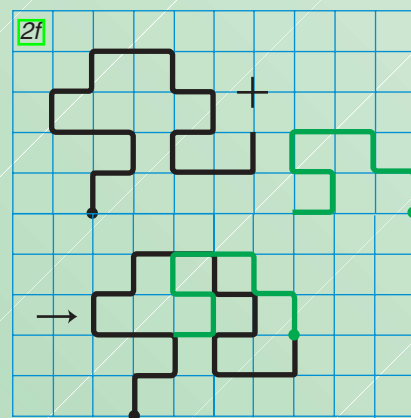
On peut interpréter l'exposant 11/32 en termes de non-intersection de chemins auto-évitants. Plaçons deux chemins auto-évitants de même longueur n , choisis au hasard parmi les a_n possibilités, au même point d'origine et évaluons la probabilité pour que les deux chemins ne se coupent pas. Ainsi que nous le voyons ci-contre, les deux chemins sont disjoints si et seulement si leur réunion forme un chemin auto-évitant de longueur $2n$. Parmi les $(a_n)^2$ chemins (pas nécessairement auto-évitants) que l'on peut construire avec les deux tracés, seuls a_{2n} ne possèdent pas d'intersection ;

2. LE NOMBRE DE CHEMINS AUTO-ÉVITANTS



Comptons les différents tracés d'un chemin auto-évitant constitué de n segments. Puisqu'il ne peut revenir sur lui-même, le tracé ne peut emprunter, à chaque nouveau segment, que trois directions parmi les quatre autorisées par le réseau carré. Pour un seul segment (figure 2a), il y a quatre possibilités ; pour deux, 12 (figure 2b) ; pour trois, 36 (figure 2c). À chaque nouveau segment, le nombre de tracés est multiplié par trois. Toutefois, à partir de quatre segments, certains tracés sont interdits par la condition d'auto-évitement (figure 2d), de sorte que le nombre de tracés devient inférieur à $4 \times 3^{(n-1)}$. Ainsi, pour quatre segments, le nombre de possibilités n'est pas 108, mais 100. Il faut faire appel aux ordinateurs pour recenser les tracés formés d'un grand nombre de segments.

Une borne inférieure du nombre de tracés est obtenue en dessinant des chemins qui ne partent que dans deux directions, par exemple le Nord et l'Est (figure 2e). Cette construction engendre des tracés qui ne se coupent pas. Comme il y a deux possibilités pour chaque nouveau segment, dans ce cas, le nombre de tracés est 2^n . Au total, le nombre de chemins auto-évitants à n segments est compris entre 2^n et $4 \times 3^{(n-1)}$.

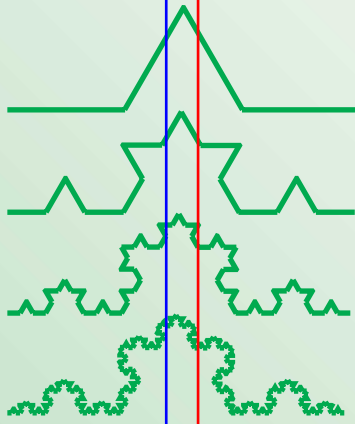


À défaut de le déterminer exactement, nous allons évaluer le nombre de tracés quand le chemin auto-évitant devient infiniment long. Un probabiliste anglais, John Hammersley, fit, le premier, le raisonnement suivant. Mettons bout à bout deux chemins auto-évitants constitués respectivement de n et m segments (figure 2f). Il se peut que la réunion des deux tracés ne soit pas auto-évitante. Appelons a_n le nombre de tracés auto-évitants à n segments. Pour dénombrer les tracés construits avec $(n+m)$ segments, il nous faut retirer, parmi les $a_n a_m$ tracés possibles, ceux qui sont auto-évitants. Nous en déduisons que a_{n+m} est inférieur ou égal à $a_n a_m$.

Égalisons n à m dans l'inégalité $a_{n+m} \leq a_n a_m$ et élevons à la puissance $1/2n$. Nous voyons que $(a_{2n})^{1/2n} \leq (a_n)^{1/n}$, ce qui signifie que la valeur de la suite $(a_n)^{1/n}$ au rang n est supérieure ou égale à celle au rang $2n$. La suite décroît quand n progresse le long des puissances de deux et est minorée par deux. Le long des puissances de deux, elle converge donc vers un nombre μ supérieur à 2, dont on ne connaît pas la valeur exacte. Puisque a_n est inférieur à $4 \times 3^{(n-1)}$, μ est inférieur à 3. Plus généralement, on montre que la suite $(a_n)^{1/n}$ elle-même converge vers μ . En conséquence, quand le nombre de segments tend vers l'infini, le nombre de tracés auto-évitants se comporte comme μ^n . On nomme μ constante de connectivité du réseau, car elle est fonction de la nature du réseau sur lequel évolue le tracé : plus un nœud possède de voisins, plus μ est important. Par exemple, il est plus grand pour un réseau carré que pour un réseau en nid d'abeille. Il n'existe pas de formule explicite de μ pour le réseau carré ; on la calcule numériquement. On a aujourd'hui une estimation à une dizaine de décimales : μ est égal à 2,6381585...

3. LA DIMENSION FRACTALE

Une courbe fractale est une courbe qui conserve le même aspect quelle que soit l'échelle à laquelle on la regarde. L'exemple type en est une côte rocheuse. La côte bretonne vue à l'échelle de la région ou à celle de la pointe du Raz présente toujours les mêmes irrégularités. Comment mesurer la longueur des côtes si en s'en approchant de plus en plus, de nouveaux détails apparaissent : selon la taille de la règle qu'on utilise pour mesurer la longueur, les résultats diffèrent ! Pour éviter cet écueil, on définit une dimension fractale qui représente comment la longueur de la courbe varie avec la taille de la règle : en réduisant la taille de la règle d'un facteur X , la longueur de la courbe s'accroît d'un facteur X à la puissance d , d étant la dimension fractale. La dimension fractale est une mesure de la «rugosité» de la courbe : plus la courbe est sinueuse, plus grande est sa dimension fractale. Une courbe lisse a une dimension fractale égale à un.



En revanche, examinons la courbe fractale de Von Koch, construite par itération à partir d'une étoile à six branches (dont une seule est représentée sur la figure) : chaque arête est divisée en trois et le segment du milieu est remplacé par deux des arêtes d'un triangle équilatéral. Nous avons représenté ici les trois premières itérations. Avec une règle de la taille de la première arête, la longueur de la partie de courbe représentée est égale à quatre, tandis qu'avec une règle trois fois plus courte, la longueur est égale à 16. Comme trois à la puissance 1,26 est égal à quatre, la dimension fractale de la courbe de Von Koch est égale à 1,26.

La longueur d'un chemin auto-évitant mesurée avec une règle de la taille d'un segment est, par définition, égale au nombre de segments n . Mesurée avec une règle de la taille typique du tracé, la longueur est égale à un. La taille typique valant $n^{3/4}$, la dimension fractale du chemin auto-évitant est égale à 4/3.

Quand sa longueur est très grande, un chemin auto-évitant forme des méandres de toutes tailles et conserve le même aspect d'une échelle à une autre. Il ressemble à une courbe fractale dont une des caractéristiques est la dimension fractale qui exprime comment la longueur de la courbe varie en fonction de la taille de la règle dont on se sert pour la mesurer (voir la figure 3). La dimension fractale est l'inverse de la puissance intervenant dans la taille typique d'un tracé. La taille typique est la taille qu'on observe majoritairement en tirant un long chemin auto-évitant au hasard ; en principe, elle pourrait être, mais on pense que ce n'est pas le cas, notablement plus petite que la taille moyenne à cause de la contribution de chemins très longs, mais exceptionnels. Elle est du même ordre de grandeur que la taille moyenne. On en conclut que la dimension fractale est 4/3.

Mathématiquement, on ne sait démontrer ni cette dimension ni l'exposant de non-intersection décrit plus haut. Toutefois, avec Greg Lawler et Oded Schramm, nous avons construit mathématiquement une courbe aléatoire plane qui doit être en principe la limite des chemins auto-évitants tirés au hasard quand le nombre n de pas tend vers l'infini. Cette courbe se distingue des chemins auto-évitants notamment par le fait qu'elle n'évolue pas sur un réseau. On montre que la dimension fractale de cette courbe est effectivement 4/3 et que l'exposant de non-intersection est 11/32.

Nous pouvons donc répondre à la question de Grégoire sur la taille moyenne d'un chemin auto-évitant. Avec 100 rails de dix centimètres chacun, Grégoire construit une voie de chemin de fer de taille environ égale à dix fois $100^{3/4}$ centimètres, soit de l'ordre de trois mètres.

Considérons maintenant une manière plus naturelle pour Grégoire de construire son tracé. Il choisit à chaque pas une des directions possibles au hasard, en éliminant celles où le tracé se referme sur lui-même. Dans cette construction, tous les chemins auto-évitants possibles ne sont pas équiprobables. Par exemple, la probabilité de tracer un chemin tout droit est de $(1/3)^n$, tandis que celle d'obtenir tel ou tel chemin tortueux est plus grande, car, là où le tracé se referme sur lui-même, moins de trois placements différents des rails sont possibles. Puisque cette stratégie avantage les chemins tortueux, on

autrement dit, la probabilité de non-intersection est égale à $a_{2n}/(a_n)^2$. En utilisant l'expression de a_n prédite par B. Nienhuis, nous établissons que la probabilité est de l'ordre de grandeur de $n^{-11/32}$ et en concluons que l'exposant 11/32 décrit la vitesse à laquelle décroît la probabilité de non-intersection entre deux très longs chemins auto-évitants aléatoires.

La taille des chemins auto-évitants

Pençons nous maintenant sur la seconde interrogation de Grégoire : quelle est la taille moyenne d'un chemin aléatoire auto-évitant ? Par taille moyenne, nous entendons la distance moyenne entre les deux extrémités du tracé. Nous calculons la moyenne d'une grandeur en multipliant chacune des valeurs possibles de cette grandeur par la probabilité d'obtenir cette valeur. Nous allons voir que, selon la stratégie employée par Grégoire pour construire les tracés, la probabilité d'avoir tel ou

tel tracé diffère et, par conséquent, la taille moyenne également.

La première stratégie, naturelle du point de vue des applications physiques et chimiques, mais en pratique difficile à réaliser pour Grégoire, revient à choisir un chemin auto-évitant au hasard parmi tous les a_n chemins auto-évitants différents. Tous les tracés sont équiprobables. La taille moyenne d'un tracé est alors la somme des distances bout à bout de tous les chemins auto-évitants de même longueur divisée par le nombre total de chemins.

Un trajet auto-évitant à n pas ne va pas à une distance plus grande que n du point de départ. Par ailleurs, il visite n points différents. La manière la plus compacte de placer ces n points consiste à remplir un disque de rayon d'environ $\sqrt{n}/\pi$. La taille moyenne est donc comprise entre $\sqrt{n}/\pi$ et n . Après la suggestion faite par Paul Flory pour les polymères (voir la figure 4), en 1982, par une méthode de mécanique statistique, B. Nienhuis prédit qu'elle est de l'ordre de n à la puissance 3/4.

4. LES CHEMINS ALÉATOIRES DANS LES TRANSITIONS DE PHASE

Les pionniers des chemins auto-évitants ont été des physico-chimistes qui travaillaient sur les polymères. Les polymères sont des chaînes moléculaires constituées par la répétition d'un grand nombre de molécules identiques, nommées monomères. Quand le polymère est plongé dans un liquide au fort pouvoir de dissolution, il se déplie et est libre de ses mouvements. Soumis à l'agitation thermique, il adopte alors au cours du temps toutes les configurations possibles du chemin auto-évitant (contrairement aux voies de chemin de fer, le polymère n'est pas restreint à se déplacer sur un réseau, de sorte que le nombre de configurations permises est infini). En moyenne dans le temps, la distance bout à bout du polymère est calculée comme la moyenne des distances bout à bout de toutes les configurations possibles prises par le polymère. Dans les années 1940, P. Flory a estimé l'énergie d'un polymère dans chacune des configurations et conjecturé que la distance bout à bout moyenne d'un polymère comportant n monomères est n à la puissance $3/4$. Nous savons depuis les années 1970 que le raisonnement développé par P. Flory était physiquement faux, mais a abouti au bon résultat.

L'intérêt des chemins auto-évitants en physique ne se limite pas à la modélisation des polymères. Les chemins auto-évitants ont pris une importance capitale au cours des deux dernières décennies dans la théorie des transitions de phase. Une transition de phase est le passage d'un corps d'un état physique à un autre. Prenons, par exemple, la transition magnétique du fer qui, lorsque sa température est inférieure à 771°C , s'aimante spontanément. Au-dessus de cette température, dite de



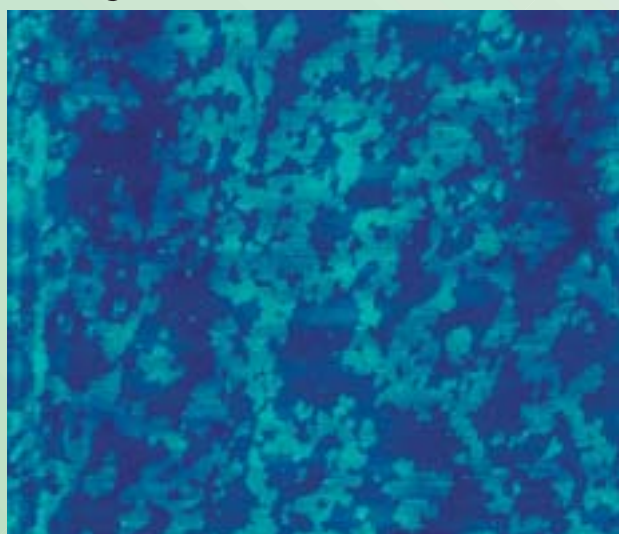
«Curie» en hommage à Pierre Curie qui étudia les propriétés thermodynamiques des aimants, l'agitation ther-



SIMULATION D'UN MATERIAU FERROMAGNETIQUE à la température de Curie. Les carrés rouges représentent les spins qui pointent vers le haut et les blancs, ceux vers le bas. Le trait noir, qui dessine le contour d'un amas de spins de même sens, est un chemin aléatoire, auto-évitant à l'échelle du réseau, de dimension fractale $5/3$.

mique détruit l'aimantation. On retrouve l'apparition d'une aimantation spontanée dans de nombreux matériaux : on nomme ces matériaux des «ferromagnétiques». Dans un aimant, il existe des petits aimants élémentaires, de valeurs égales, mais de directions différentes. Au-dessus de la température de Curie, l'agitation thermique gagne devant l'interaction entre les aimants, qui les pousse à s'aligner ; à l'intérieur de l'échantillon, il y en a autant qui pointent vers la gauche, vers la droite, vers le haut et vers le bas, de sorte que l'aimantation totale est nulle par effet de moyenne. Au-dessous de la température de Curie, l'agitation thermique ne détruit pas complètement l'alignement souhaité par les aimants, et l'aimantation totale n'est pas nulle. À très basse température, toutes les directions sont alignées, et l'aimantation totale est maximale. À la température de Curie, il n'existe pas de taille type pour les zones où l'aimantation est uniforme. Au contraire, toutes les échelles entrent en jeu, de la taille atomique des aimantations élémentaires jusqu'à la dimension du barreau.

Ces résultats ressortent de l'étude de la fonction de corrélation entre spins, qui est une mesure de l'effet d'un spin sur un autre. Au-dessus de la température de Curie, les spins n'ont pas d'effet l'un sur l'autre : la fonction de corrélation entre spins est nulle. À très basse température, un spin qu'on amènerait à se retourner entraînerait tous les autres avec lui dans sa rotation : la corrélation est maximale. Plus les amas de même spin sont grands, plus les corrélations entre spins sont importantes. À deux dimensions, la frontière d'un amas de spins de même sens est un chemin aléatoire. Ce chemin est auto-évitant à l'échelle du réseau, mais peut perdre cette caractéristique quand le nombre de spins tend vers l'infini. On a montré que la fonction de corrélation entre spins est fonction des chemins aléatoires qui relient les spins. À la température de Curie, les amas sont de toutes les tailles et il faut sommer sur tous les chemins aléatoires possibles pour évaluer les corrélations. Dans le cas de la transition ferromagnétique, il est prédit que la dimension fractale de l'interface entre deux domaines magnétiques est $5/3$.



TRANSITION DE PHASE dans une couche de phospholipides. Les phospholipides sont des molécules constituées d'une tête amphiphile et d'une ou de plusieurs queues hydrophobes. Des phospholipides DMPC sont ici déposés à la surface de l'eau et forment, dans certaines conditions de température et de densité, une couche où sont présentes deux phases fluides : l'une, bleue foncée, où les queues sont verticales et l'autre, bleue claire, où les queues sont libres de leur mouvement. Sur la photographie, on voit l'invariance d'échelle : des zones de toutes tailles coexistent.

Un chemin aléatoire, auto-évitant à l'échelle du réseau, de dimension fractale $5/3$.

5. LE MOUVEMENT BROWNIEN

Si un marcheur avance de façon hasardeuse en choisissant la direction prise à chaque nouveau pas aléatoirement parmi les quatre points cardinaux, après n pas, 4^n chemins seront offerts à lui. Peut-être le marcheur est-il allé toujours tout droit dans la direction Nord, mais la probabilité que cela se produise décroît vite avec n (elle est égale à $1/4^n$). Le théorème dit de la « limite centrale » évalue la position du marcheur lorsque n est grand : après n pas, le marcheur se trouve à une distance de l'ordre de grandeur de $\sqrt{n}$ du point de départ. Le théorème prévoit qu'après 10 000 pas, la probabilité pour que le marcheur se trouve à une distance plus grande que 150 est plus petite que cinq pour cent. Les sondeurs utilisent un principe similaire pour déterminer les marges d'erreurs dans les sondages. Lorsque n tend vers l'infini, la trajectoire aléatoire ressemble de plus en plus à une trajectoire continue aléatoire nommée mouvement brownien plan.

Le mouvement brownien a été mis en évidence par le botaniste écossais Robert Brown en 1827 lors d'une étude au microscope du processus de fertilisation d'une nouvelle espèce de fleur. Il décrit le mouvement incessant d'un grain de matière, par exemple un grain de pollen, en suspension dans un liquide. On découvrit au début du XX^e siècle, notamment grâce aux tra-

vaux d'Albert Einstein, que ce mouvement était la résultante des fluctuations des chocs des molécules du liquide sur le grain de matière. Dans un liquide, les molécules sont en perpétuelle agitation et viennent percuter le grain de matière. On pourrait penser que, vu la différence de taille entre les molécules et le grain de matière, la résultante des chocs serait nulle, mais il n'en n'est rien. En notant la position du grain en fonction du temps, on voit qu'il décrit une trajectoire aléatoire pouvant changer de direction à chaque instant.

Le mouvement brownien est à l'origine du mécanisme de diffusion dans un liquide. Un morceau de sucre dans un verre d'eau se dissout, puis se répartit à densité égale dans tout le volume du verre. Les multiples chocs des molécules d'eau sur les molécules de sucre dispersent celles-ci dans le volume d'eau.

Le mouvement brownien est également utilisé en mathématiques financières pour modéliser l'évolution chaotique des cours de la bourse.

Dans le mouvement brownien, les quatre directions Nord, Sud, Est et Ouest ne jouent plus de rôle particulier : le mouvement brownien est isotrope et admet des propriétés d'invariance par transformation conformes utiles pour déterminer les propriétés des marches aléatoires.



MOUVEMENT D'UNE PARTICULE MICROSCOPIQUE EN SUSPENSION DANS L'EAU dessiné d'après les observations faites par le physicien Jean Perrin en 1912 : les points anguleux de la ligne brisée représentent les positions de la particule toutes les 30 secondes ; J. Perrin a noté que de tels graphiques « ne donnent qu'un faible aperçu de l'extraordinaire discontinuité de la trajectoire réelle ». En effet, en repérant plus fréquemment la position de la particule, on verrait une trajectoire brownienne analogue à celle représentée dans la figure 1.

s'attend à ce que la dimension fractale obtenue à la limite des longs chemins soit plus grande.

Il existe un système physique auquel ce chemin aléatoire est relié. Il s'agit de la percolation qui désigne la possibilité pour un fluide de circuler à travers un réseau de pores connectés à l'intérieur d'une roche. Dans certaines conditions et à deux dimensions, la frontière de la surface couverte par le fluide est un chemin auto-évitant. Bertrand Duplantier et Hubert Saleur ont conjecturé que la dimension fractale de cette frontière est $7/4$. Grâce aux recherches du mathématicien Russe Stanislav Smirnov (qui vient de recevoir le prix Clay de la recherche pour ses travaux) et à nos travaux avec G. Lawler et O. Schramm, ce résultat a été récemment démontré mathématiquement dans le cas du réseau en nid d'abeille.

La stratégie des boucles effacées

À la fin des années 1970, G. Lawler a inventé une troisième stratégie pour construire un chemin auto-évitant. Il s'agit de la stratégie des boucles effacées qui consiste à piocher les rails un par un, à les mettre bout à bout et, quand le circuit se recoupe, à retirer la boucle formée par les rails. On obtient ainsi un tracé nommé marche aléatoire à boucles effacées. Avec cette stratégie, Grégoire ne bâtit pas un chemin auto-évitant au hasard de manière uniforme, certains tracés étant plus probables que d'autres. Les physiciens théoriciens ont étudié les marches aléatoires à boucles effacées, car elles s'avèrent aussi reliées à des systèmes de physique statistique, et S. N. Majumdar a prédit que la distance typique entre le point de départ et le point d'arrivée avec n rails est de l'ordre de grandeur de $n^{4/5}$ lorsque n croît vers l'infini. La marche aléatoire à boucles effacées « se déplie » plus que la marche auto-évitante uniforme. En 1998, Richard Kenyon démontra mathématiquement cette prédiction en exploitant, entre autres, le lien entre les marches aléatoires à boucles effacées et la manière de carrelé une portion du plan avec des dominos (voir *Les théorèmes de l'impossible*, par Ian Stewart, Pour la Science, février 2000).

Nous allons maintenant, pour un moment, oublier les chemins auto-évitants et nous tourner vers les marches aléatoires autorisées à se couper.

Les marches aléatoires

Deux personnes errent au hasard dans un Manhattan infini (où, ainsi que dans beaucoup de villes américaines, les rues se croisent à angle droit). Elles effectuent chacune une marche aléatoire dans le réseau formé par les rues. Elles sont parties du même endroit, et nous voulons déterminer la probabilité p_n qu'elles parcourent des chemins qui ne se coupent pas. Dans cet exemple, n ne désigne pas le nombre de pas effectués par les marcheurs, mais le nombre de carrefours traversés. Au bout d'un temps infiniment long, leurs chemins se croisent obligatoirement : la probabilité de non-intersection tend vers zéro quand les trajets parcourus sont infiniment longs. La question est de savoir à quelle vitesse.

Michael Aizenman, chercheur à la double casquette de physicien théoricien et de mathématicien, a promis en 1984 une bouteille de vin français millésimée d'une grande année à qui déterminerait cette probabilité. En 1988, B. Duplantier et K.H. Kwon prédirent que la probabilité décroissait comme $n^{-5/8}$. Avec G. Lawler et O. Schramm, nous avons démontré récemment cette prédiction. Il est à noter que la preuve mathématique utilise des outils différents des arguments de la physique théorique, tels que le mouvement brownien, l'analyse complexe et l'invariance conforme. Ce résultat ne dépend pas du réseau utilisé, carré ou hexagonal.

Le chemin auto-évitant, enveloppe du brownien

L'étude des exposants d'intersection des marches aléatoires est plus accessible mathématiquement que celle des chemins auto-évitants car lorsque n croît vers l'infini, on sait décrire un objet aléatoire vers lequel la marche aléatoire converge : le mouvement brownien (voir la figure 5). Nous pouvons ainsi relier les exposants à certaines propriétés de la trajectoire brownienne plane. En particulier, la détermination d'un exposant dit de disconnexion prouve la conjecture formulée par Benoît Mandelbrot au début des années 1980, qui devina, dans l'enveloppe d'une trajectoire brownienne, un chemin auto-évitant.

Faisons évoluer une trajectoire brownienne dans un plan et attendons qu'elle repasse près de son point de départ (cela



6. LA BOUTEILLE DE VIN mise en jeu en 1984 par Michael Aizenman pour la détermination de la probabilité de non-intersection de deux marches aléatoires. Cette bouteille a été débouchée en 2001, à l'occasion d'un congrès pour célébrer la formule $\xi(1,1) = 5/4$. On reconnaît les signatures, dans l'ordre des aiguilles d'une montre à partir d'en haut à gauche, de B. Duplantier, G. Lawler, W. Werner, M. Aizenman et O. Schramm.

peut être long, mais soyons patients, ça finira par arriver). Cette courbe (voir la figure 1), puisqu'elle est presque fermée, définit une surface. Traçons-en le contour en gras. B. Mandelbrot fit une analogie entre ce contour et les chemins auto-évitants et prédit que les deux types de courbes partagent la même dimension fractale, c'est-à-dire $4/3$ (on avait déjà conjecturé que la dimension fractale des chemins auto-évitants était $4/3$). En 1998, à partir de certains résultats que nous avons obtenus avec G. Lawler, B. Duplantier a utilisé le formalisme dit de «gravité quantique» (formalisme destiné à comprendre comment la gravité se comporte à petite échelle) pour donner une justification physique à la conjecture de B. Mandelbrot et à celle de l'exposant de non-intersection des marches aléatoires. En 2000, avec G. Lawler et O. Schramm, nous publions une démonstration mathématique de ce résultat.

Nous avons également démontré que, localement, le contour brownien ressemble à s'y méprendre à la seule limite possible des longs chemins auto-évitants que nous avions évoquée plus haut. Ceci peut paraître surprenant : le contour brownien est la frontière extérieure d'une surface. Regardons une carte de la Bretagne où

n'apparaîtraient que les contours de la côte. Grâce au dessin des embouchures des fleuves, nous serions en mesure, pour n'importe quel point de la côte, de préciser de quel côté du tracé se trouvent le continent et la mer. On pourrait penser qu'il en est de même pour le contour brownien et qu'il est possible, en observant une partie de celui-ci, de deviner de quel côté se situe la trajectoire brownienne. Puisqu'un chemin auto-évitant a exactement le même aspect vu d'un côté ou de l'autre, notre résultat montre que le contour brownien possède cette propriété de symétrie.

Notons avant de conclure que cette courbe auto-évitante fractale construite avec G. Lawler et O. Schramm peut être interprétée comme la manière naturelle de choisir au hasard parmi toutes les possibilités un chemin auto-évitant dans le plan. Cette courbe jouerait le même rôle vis-à-vis des chemins auto-évitants que le mouvement brownien vis-à-vis des marches aléatoires.

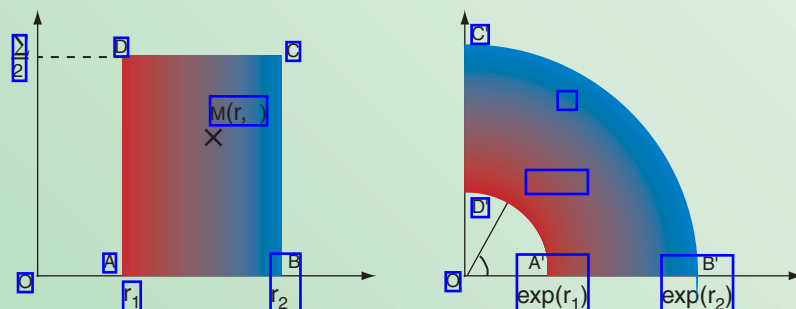
Les chemins auto-évitants, aussi simple soit leur construction, cachent, du point de vue de la physique théorique et du point de vue mathématique, des problèmes profonds dont les solutions utilisent des arguments assez élaborés issus de domaines aussi

7. LES TRANSFORMATIONS CONFORMES

Une transformation d'une partie du plan dans une autre qui conserve les angles est nommée une transformation conforme. Des exemples simples sont la translation ou l'homothétie. En voici un autre. Prenons un rectangle délimité dans le plan par les points $A(r_1, 0)$, $B(r_2, 0)$, $C(r_2, \pi/2)$ et $D(r_1, \pi/2)$. À chaque point $M(r, \theta)$ de ce rectangle, associons un point M' situé à distance $\exp(r)$ de l'origine O du repère et tel que la droite (OM') fasse un angle θ avec l'axe des abscisses. L'image du rectangle est un quart de couronne comprise entre les cercles de rayon $\exp(r_1)$ et $\exp(r_2)$. Cette application est une transformation conforme : l'image d'une intersection orthogonale (celle entre les segments AB et AD) est une intersection orthogonale (l'arc de cercle $A'D'$ croise avec un angle droit le segment $A'B'$). D'après un théorème dit de Riemann, il existe toujours une transformation conforme qui relie deux domaines quelconques du plan.

On peut noter que l'exemple précédent s'interprète en termes de nombres complexes. En écrivant M sous la forme du nombre complexe z égal à $r + i\theta$, l'image de M , M' , est située au nombre complexe z' égal à l'exponentielle de z : $\exp(z)$. Ce lien entre les transformations conformes et les fonctions complexes rend d'une certaine façon les problèmes à deux dimensions plus féconds qu'en dimension supérieure (les exposants de non-intersection associés aux chemins auto-évitants dans l'espace ne sont pas *a priori* des nombres remarquables).

Les transformations conformes sont utiles pour déterminer les propriétés du mouvement brownien. Par exemple, on évalue la probabilités de non-intersection entre deux trajectoires browniennes en projetant par transformation conforme les zones non explorées par une des trajectoires sur un domaine à la géométrie plus simple grâce au théorème de Riemann.



EXEMPLE DE TRANSFORMATION CONFORME. L'image d'un point $M(r, \theta)$ est un point M' situé à la distance $\exp(r)$ de l'origine et pour lequel la droite (OM') fait un angle θ avec l'axe des abscisses.

variés que la théorie des transitions de phase, la gravité quantique ou encore la théorie conforme des champs. Bien que physiciens et mathématiciens traitent les mêmes problèmes, leur manière de les résoudre diffère. De nombreux résultats admis en physique théorique sont des problèmes ouverts en mathématiques. Cependant, l'interaction entre les idées et les résultats des mathé-

maticiens et des physiciens théoriciens a été extrêmement fructueuse pour les deux disciplines lors de ces dernières années, et c'est dans cet esprit que nous avons débouché avec B. Duplantier, O. Schramm et G. Lawler, à l'occasion d'un congrès en 2001 réunissant mathématiciens et physiciens, le cru mis en jeu par M. Aizenman pour la détermination des exposants d'intersection.

Wendelin WERNER est professeur à l'Université Paris-Sud et membre du Département de mathématiques d'Orsay. Nous remercions B. Duplantier pour l'aide amicale qu'il nous a apportée.

G. F. LAWLER, *Intersections of Random*

Walks, éditions Birkhauser-Boston, 1996. N. MADRAS, G. SLADE, *The Self-Avoiding Walk*, éd. Birkhauser-Boston, 1996.

CARLO VANDERZANDE, *Lattice Models of Polymers*, Cambridge University Press, 1998.

L'autonomie (géologique) de la Corse

MAURICE MATTAUER

Le statut actuel du continent corso-sarde est le résultat d'une histoire mouvementée : l'origine de la Corse est espagnole, puis elle a été française et continentale et a subi des influences italiennes. Actuellement, elle se rapproche lentement du continent européen.

Au début du XX^e siècle, les tribunaux résonnaient des joutes de deux ténors du barreau, tous deux Corses, Vincent de Moro-Giafferi et César Campinchi. Quand l'un parlait, l'autre haussait les épaules ou laissait tomber une pile de livres, dans l'espoir de tromper l'attention des jurés ou du jury. En une seule instance, Vincent de Moro-Giafferi écouta sans mot dire et applaudit son confrère quand celui-ci commença sa plaidoirie par : « Cette Corse continentale, que l'on dénomme quelquefois la France... »

Campinchi avait pressenti les résultats récents obtenus par les géologues : il fut un temps où la Corse était une partie de la France et aussi de l'Espagne. Actuellement, les mesures montrent que la Corse se rapproche du continent.

La Corse n'a acquis une certaine autonomie que 15 à 20 millions d'années avant Napoléon, quand elle s'est détachée du continent européen lors de l'ouverture d'un petit océan situé entre la Provence et le golfe du Lion, au Nord, et le petit continent corso-sarde, au Sud-Est. Le fond de cet océan est constitué de basaltes, comme tous les océans, ces basaltes étant issus du manteau lors de la montée des laves basaltiques dans la zone d'écartement. Ces basaltes sont recouverts par quatre à cinq kilomètres de sédiments marins, avec des fonds marins de 2 000 à 3 000 mètres de profondeur. Tel est le dernier épisode notable du voyage de la Corse.

Le déplacement de la Corse espagnole

Pour comprendre la constitution (géologique) actuelle de la Corse, il faut remonter dans le temps. Il y a 300 millions d'années, l'océan Atlantique n'existait pas encore et l'on pouvait se rendre à pied sec de la France jusqu'en Amérique. On a pu reconstituer les positions relatives à l'époque de la France, de l'Ibérie, de l'Afrique et de l'Amérique.

À l'époque, l'Ibérie était séparée de la France par une grande faille et décalée de 400 kilomètres vers l'Ouest par rapport à sa position actuelle. Le bloc corso-sarde appartenait alors à la partie Est de l'Ibérie, et la Corse se trouvait au Sud de l'actuelle chaîne des Pyrénées (qui n'existait pas encore). Cette appartenance de la Corse à l'Europe explique que la partie Ouest de la Corse est constituée de vieux terrains granitiques d'âge primaire (hercyniens), de la même nature que le Massif central, les Maures et l'Esterel.

Le lent mouvement des plaques a fait coulisser l'Ibérie le long de la grande faille et la Corse s'est retrouvée plus à l'Est, avec la Sardaigne au Sud du golfe du Lion.

Ensuite, il y a environ 40 millions d'années, l'Ibérie, incluant la Corse et la Sardaigne après la dérive vers l'Est, s'est rapprochée de l'Europe en se déplaçant vers le Nord. La compression résultant de ce déplacement a fait surgir la chaîne des Pyrénées, dont les reliefs allaient de l'Atlantique à la Côte d'Azur

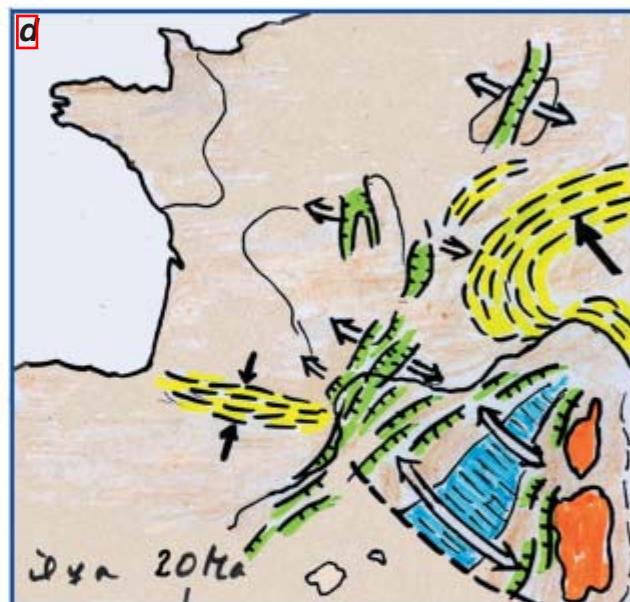
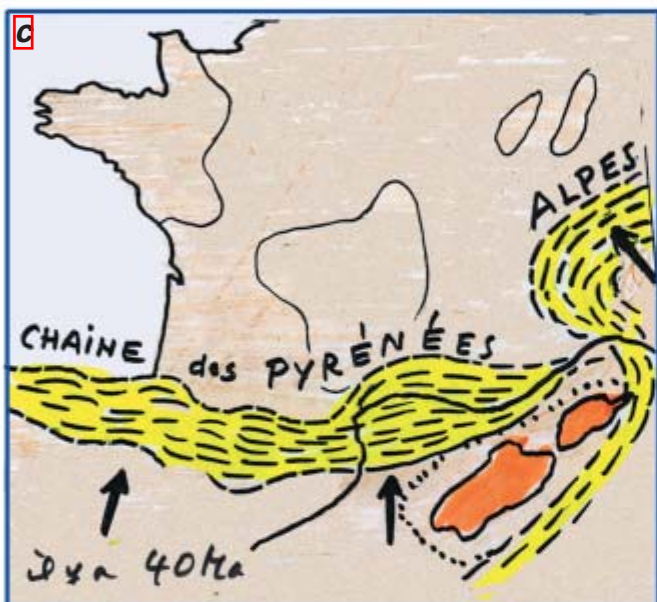
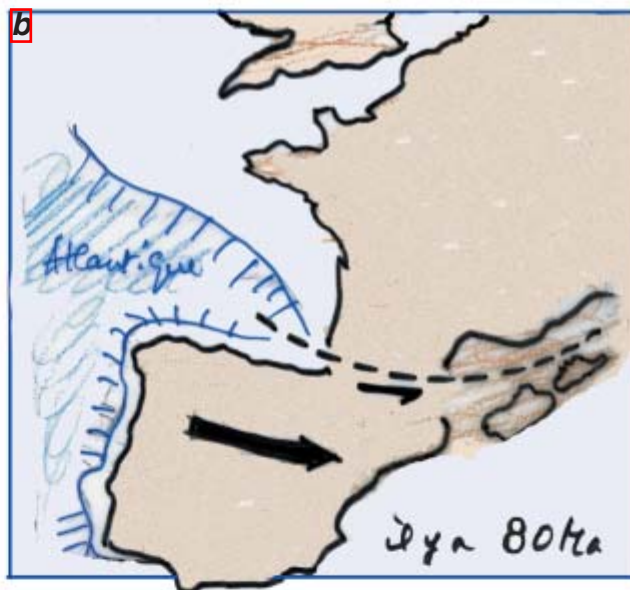
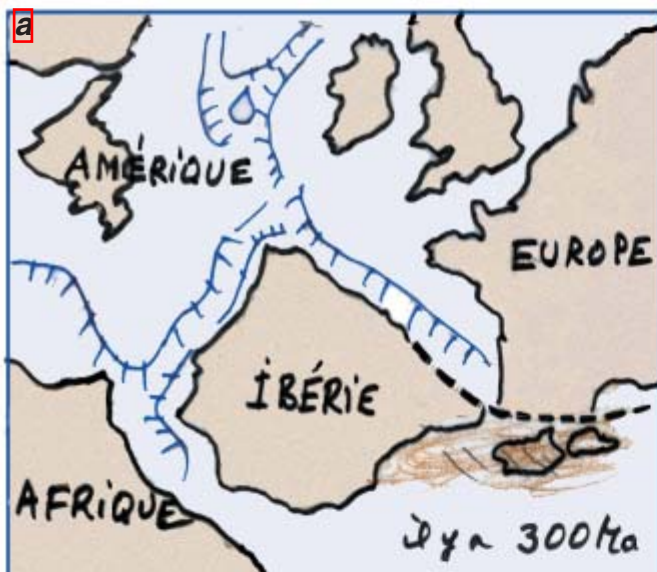
actuelle. Des montagnes se trouvaient alors dans le golfe du Lion.

Il y a 30 millions d'années, un très grand bouleversement a modifié le relief de l'Ouest de l'Europe et de la Méditerranée. En France, des fossés d'effondrement se sont ouverts, du fossé rhénan au Languedoc. Les failles d'extension qui se sont formées alors ont provoqué l'effondrement des reliefs antérieurs, et la mer a envahi les zones effondrées. Tout le Languedoc a été « étiré ». Des sédiments continentaux et parfois marins se sont empilés dans les bassins d'effondrement (jusqu'à 4 000 mètres en Camargue). Lors de cette extension, la chaîne des Pyrénées s'est effondrée à l'emplacement actuel du golfe du Lion. Cette extension a continué doucement pendant une dizaine de millions d'années.

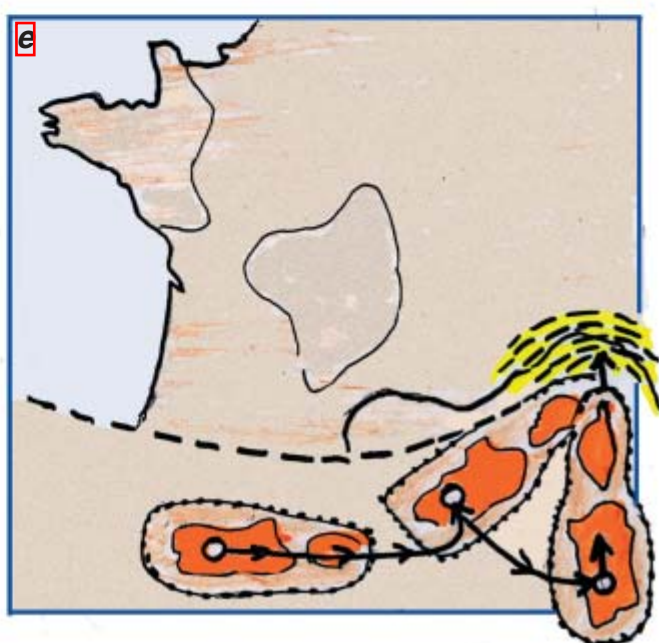
L'individualisation de la Corse

Il y a 20 millions d'années, l'étiement s'est brusquement accéléré et a provoqué l'ouverture du petit océan méditerranéen, avec la rotation du continent corso-sarde, enfin indépendant, jusqu'à sa position actuelle.

Il y a 5,6 millions d'années, la Corse a assisté à un événement extraordinaire : du haut de ses montagnes, elle a vu le niveau de la Méditerranée baisser de 500 mètres... puis de 1 000 mètres et, probablement de 1 500 mètres. Entre la côte provençale et la Corse, on a vu apparaître une



1. EN RECONSTITUANT (a) la position des grands continents (Europe, Afrique, Amérique) immédiatement après la formation de la chaîne hercynienne, il y a 300 millions d'années, on constate que l'Ibérie (dont ce que l'on dénomme actuellement la Corse faisait partie) est décalée d'environ 400 kilomètres par rapport à sa position actuelle. (b) Situation il y a 80 millions d'années : l'Ibérie s'est déplacée vers l'Est, le long de la faille nord-pyrénéenne, le long d'une faille de coulissage (ces deux reconstitutions sont d'après J. L. Olivet, IFREMER). (c) L'Ibérie se rapproche de la France suivant une direction Nord-Sud, ce qui provoque la formation de la chaîne des Pyrénées. Une petite partie de la Corse appartient à la chaîne alpine. (d) Allure générale des structures d'extension et des fossés d'effondrement qui ont affecté l'Ouest de l'Europe il y a environ 30 millions d'années. la partie Est de la chaîne des Pyrénées disparaît, effondrée dans le golfe du Lion. Entre 20 et 15 millions d'années, le bloc corso-sarde subit une rotation de 30 degrés (flèches), ce qui ouvre un petit océan. (e) Le voyage de la Corse a été un long périple. Elle a suivi le périple de l'Ibérie, s'en est détachée et, aujourd'hui, poussée par la plaque africaine, elle se rapproche actuellement du continent ; dans 15 à 20 millions d'années, elle se trouvera accolée au continent européen en créant une chaîne de montagnes et elle aura alors perdu sa légendaire autonomie. La géologie aura réglé les problèmes politiques.





2. CETTE CARTE GEOLOGIQUE permet de repérer les régions où apparaissent les roches de la vieille chaîne hercynienne. Le rose clair correspond à des granites et à des roches métamorphiques. C'est le cas en Corse, au Portugal et dans le Massif central. Les

sédiments tranquilles d'âge secondaire (en bleu et vert) et tertiaire (en jaune et brun) recouvrent ce vieux socle. Dans la chaîne des Alpes et des Pyrénées, la compression a souvent fait remonter ce vieux substratum.

immense dépression où il ne subsistait qu'un fond de mer très saumâtre...

Ses bordures correspondaient à des reliefs abrupts, où les rivières dévalaient les pentes en creusant des vallées encaissées. Cet événement résulte de soulèvements qui se sont produits entre le Maroc et la plaque ibérique, et qui ont coupé toute communication entre l'Atlantique et la Méditerranée. En conséquence, le niveau de la Méditerranée a baissé des valeurs indiquées précédemment, par évaporation.

Cet épisode ne dura pas plus de 300 000 ans. En effet, grâce au fonctionnement de failles dans la région de Gibraltar, la communication fut rétablie avec l'Atlantique. Les eaux de l'Atlantique réinvestirent la dépression associée à la Méditerranée, en noyant toutes les vallées profondes qui s'étaient creusées sur les bordures.

C'est au cours de cette période que la Corse a été la plus indépendante. C'était alors une gigantesque citadelle aux portes de l'Europe, bordée par des reliefs abrupts, avec des dénivellés atteignant 4 000 mètres au voisinage du mont Cinto.

L'insularisme de l'île corso-sarde a eu des effets sur son peuplement animal récent. Comme dans d'autres îles méditerranéennes, l'isolement a été à

l'origine de nanisme et de gigantisme (les éléphants nains de Crète et les rats géants de Gargano, en Italie du Sud). En Sardaigne, on a signalé un cerf nain et même des fragments d'homme préhistorique anormalement grand, mais qui semble culturellement peu évolué. En Corse, une espèce de lapin nain n'a pas disparu depuis longtemps.

L'insularisme de la Corse fut plusieurs fois rompu. On a retrouvé des fossiles d'origine africaine appartenant à des époques anciennes ; ils sont probablement arrivés grâce au contact qui a dû exister entre la Tunisie et le Sud de la Sardaigne. Des fossiles d'époques plus récentes correspondent à des formes européennes venues on ne sait comment.

Le futur de la Corse

L'état actuel de la Corse ne correspond qu'à un *statu quo* transitoire, comme chacun le sait. Dans quelques millions d'années, tout va encore changer, et les géologues peuvent faire quelques prévisions.

Comme la région de Nice et de Gênes est périodiquement ébranlée par des séismes correspondant à une compression Nord-Sud, il faut admettre que la Corse se déplace actuellement vers le

Nord. Grâce au récent réseau GPS de Grasse et de Corse, les géologues préciseront la vitesse de déplacement : il faudra attendre plusieurs années car le déplacement est probablement faible, peut être deux à trois millimètres par an.

Si cette vitesse se maintient, le Cap corse aura avancé de 60 kilomètres en 20 millions d'années. Il y a tout lieu de penser que la mer Ligure et le golfe de Gênes se seront alors peu à peu transformés en une petite chaîne de montagnes.

Ainsi, la Corse qui a quitté assez rapidement le continent il y a 20 millions d'années en ouvrant un océan devrait revenir doucement pour se réincorporer à la vieille Europe, si la convergence actuelle Afrique-Europe se maintient à la vitesse actuelle, ce qui n'est qu'une supposition. L'avenir est plus difficile à prédire que le passé.

Toutefois, dans cette hypothèse, pendant cette période, tout aura beaucoup changé aux alentours. La Méditerranée se sera une nouvelle fois asséchée et tous les sédiments déposés en Méditerranée finiront par être comprimés, plissés, et livrés à l'érosion dans l'amorce d'une nouvelle chaîne de montagnes.

Maurice MATTAUER est professeur émérite de géologie à l'Université de Montpellier.



D'un prion à l'autre

RALPH ZAHN

Plus les prions de deux espèces se ressemblent plus leur transmission d'une espèce à l'autre est facile. Or les prions humains et bovins ont des structures quasi identiques. Heureusement, les charges électriques qu'ils portent en surface diffèrent, ce qui limite le passage de la vache à l'homme.

La «vache 133» fut le premier cas répertorié d'encéphalopathie spongiforme bovine, ou ESB. En 1984, elle avait été examinée par un vétérinaire, en raison d'un amaigrissement inexplicable et d'une déformation de la colonne vertébrale. Puis, apparurent des troubles de la coordination et des convulsions, avant que la vache ne meure en février 1985. L'année suivante, le Laboratoire central de médecine vétérinaire de Weybridge, en Angleterre, l'identifia comme ayant été victime d'une maladie bovine jusqu'alors inconnue, bientôt connue sous le nom de maladie de la vache folle.

Depuis lors, en Grande-Bretagne, plus de 180 000 vaches ont été contaminées par l'encéphalopathie spongiforme bovine, et abattues. Bien que l'épidémie ait commencé à décroître, on y dénombre encore plusieurs milliers de cas chaque année. En France, on dénombre, à ce jour, 340 cas.

La «crise de la vache folle» a, pour notre société, d'importantes conséquences économiques, mais également éthiques. Ainsi, elle a déjà coûté plusieurs milliards d'euros, notamment pour l'élimination des cadavres, la destruction des farines animales et la mise en œuvre des tests rapides de dépistage de la maladie. Elle a pourtant eu un effet positif : elle a déclenché une série de réflexions quant à nos pratiques d'élevage et d'alimentation du bétail, visant à éviter à l'avenir des crises de ce type.

Chez l'homme, une encéphalopathie spongiforme, une dégénérescence donnant au cerveau l'aspect d'une éponge, fut décrite pour la première fois en 1921. Le neurologue Alfons Maria Jakob, à Hambourg, décrit «des maladies étranges du système nerveux central avec des diagnostics inhabituels». Il pensa – à tort – qu'un cas décrit l'année précédente par le neurologue Hans Gerhard Creutzfeldt, à Breslau, appartenait à la même catégorie. C'est pourquoi cette pathologie incurable fut nommée dès 1922 maladie de Creutzfeldt-Jakob. Elle atteint essentiellement des personnes âgées de plus de 60 ans, qui décèdent en général au cours des six mois suivant l'apparition des symptômes.

1. LE «CORPS» DE LA PROTEINE PrP BOVINE semble être entouré de coton ; on a superposé une vingtaine de photographies (des modélisations) instantanées de sa partie mobile constituée de 107 acides aminés (en couleur argentée). Le corps, constitué d'une chaîne repliée de 110 acides aminés, comprend des domaines en hélices (en vert), des domaines antiparallèles (en bleu) et des domaines qui semblent enroulés au hasard (en jaune).



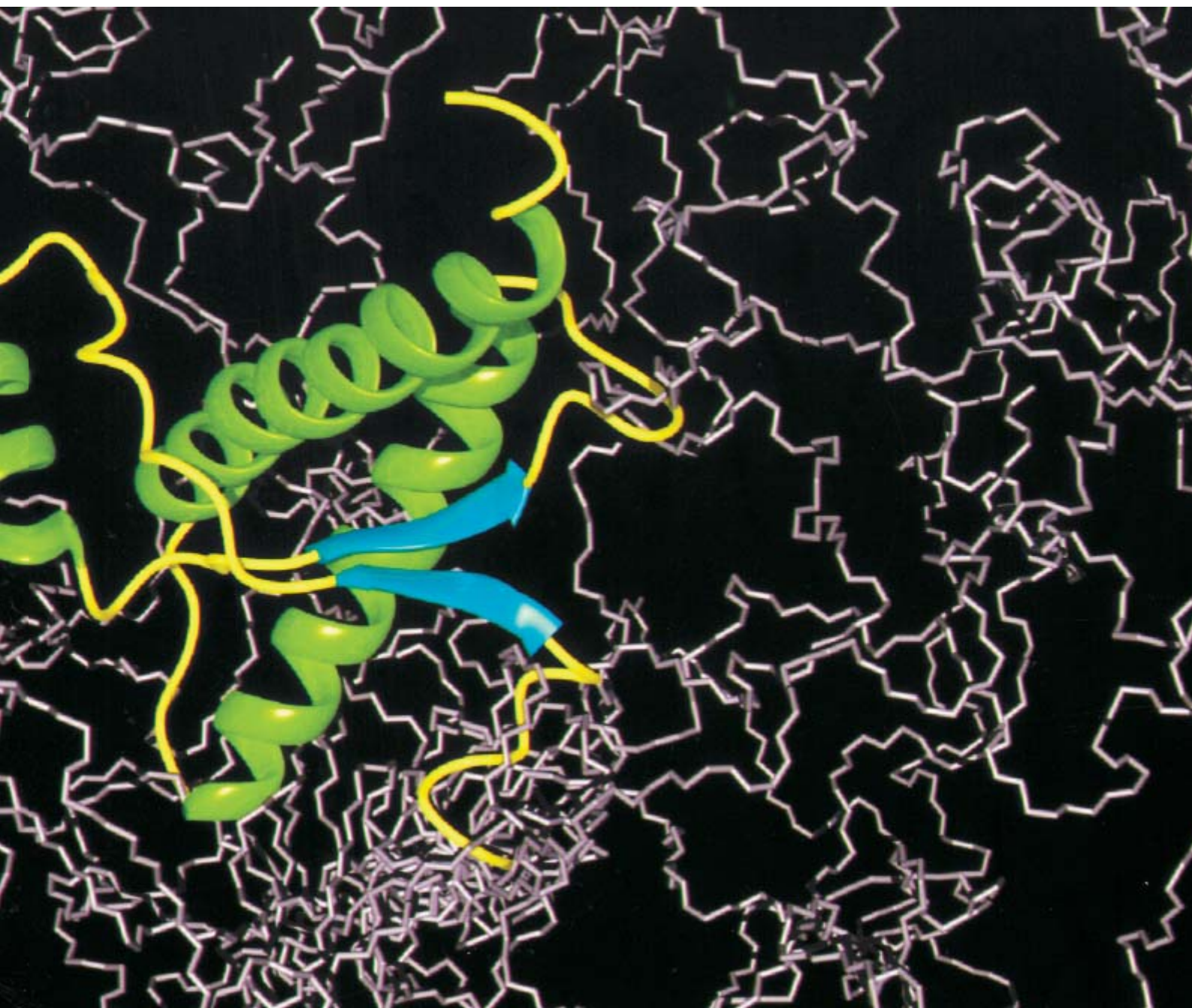
Il existe une forme familiale de la maladie de Creutzfeldt-Jakob et une forme sporadique, qui se déclare sans antécédents et dont l'incidence dans le monde entier est d'environ un cas par million d'habitants et par an. Pour la France, cela représente moins d'une centaine de cas par an.

Lorsqu'en 1993 deux jeunes éleveurs britanniques furent atteints de maladie de Creutzfeldt-Jakob, on suspecta pour la première fois un lien avec l'encéphalopathie spongiforme bovine. À ce moment-là, plusieurs dizaines de milliers de bovins contaminés étaient déjà entrés dans la chaîne alimentaire humaine. L'agent de l'encépha-

lopathie spongiforme bovine était-il transmissible à l'homme? Était-il capable de passer la barrière d'espèce? D'autres personnes relativement jeunes contractèrent la maladie de Creutzfeldt-Jakob et, en 1996, on décrivit une nouvelle forme de cette maladie. Contrairement à la forme classique, le nouveau «variant» de la maladie de Creutzfeldt-Jakob commençait par des symptômes psychiques et non par des troubles moteurs. Par ailleurs, l'âge moyen des malades était de 27 ans, ce qui est notablement inférieur à l'âge moyen d'apparition des formes classiques. La première victime du nouveau variant

fut le Britannique Stephen Churchill, qui mourut à l'âge de 18 ans. Jusqu'en avril 2001, plus de 100 personnes développèrent la maladie ou décédèrent. Selon une communication de la Commission européenne, il y eut 97 cas en Grande-Bretagne, 3 en France et 1 en Irlande.

Dès le XVIII^e siècle, une dégénérescence spongiforme du cerveau sévissait chez les animaux domestiques : la scrapie ou tremblante du mouton, car les animaux atteints marchaient comme s'ils tremblaient. On émit alors l'hypothèse que les cadavres de moutons atteints de tremblante et qui avaient été transformés en farines



animales avaient transmis l'encéphalopathie aux bovins (toutefois, cette hypothèse n'a pas été formellement démontrée).

Dès 1967, Tikvah Alper, de l'Hôpital Hammersmith de Londres, avait découvert que des extraits cérébraux de moutons malades restent infectieux même après avoir été traités par des rayons ionisants de faible longueur d'onde. La dose utilisée aurait normalement dû détruire tout matériel génétique constitué d'acides nucléiques, ou du moins l'endommager. Cet échec était très étonnant, car, d'après les connaissances de l'époque, tous les agents infectieux étaient censés contenir du matériel génétique composé d'acides nucléiques. John Griffith, à Londres, proposa alors une hypothèse quasi hérétique : l'agent responsable de la tremblante serait constitué en partie, voire en totalité, de protéines. Par la suite, des expériences similaires, réalisées avec des extraits cérébraux de personnes décédées de la forme classique de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, semblèrent confirmer l'hypothèse. Toutefois, la plupart des spécialistes pensaient qu'il s'agissait plutôt d'une espèce particulière de virus.

Ce fut Stanley Prusiner et ses collègues de l'Université de Californie, à

San Francisco, qui précisèrent la nature biochimique de l'agent de la tremblante du mouton. Au début des années 1980, ils montrèrent que «l'agent infectieux» est constitué de protéines et de quelques sucres. S. Prusiner donna à l'agent infectieux le nom de protéine prion.

Pour devenir infectieuse, la concentration en protéines prions doit atteindre environ 100 000 molécules. Avec des méthodes extrêmement sensibles, Detlev Riesner et ses collègues de l'Université de Düsseldorf n'ont mis en évidence aucun matériel génétique. D'après leurs essais, on peut exclure qu'il n'y a, parmi les 100 000 molécules d'une protéine prion, pas plus d'une molécule d'acide nucléique de plus de 80 nucléotides. Un fragment aussi court ne pourrait pas coder une protéine. À titre de comparaison, les plus petits virus contiennent plusieurs milliers de nucléotides.

Dès lors, comment les prions se multiplient-ils, sans informations génétiques classiques? Il ne faisait aucun doute qu'ils se reproduisent, puisqu'après une injection intracérébrale de prions de la tremblante à des hamsters de laboratoire, la quantité détectée dans le cerveau des animaux qui deviennent malades est notablement supérieure à la quantité injectée. En

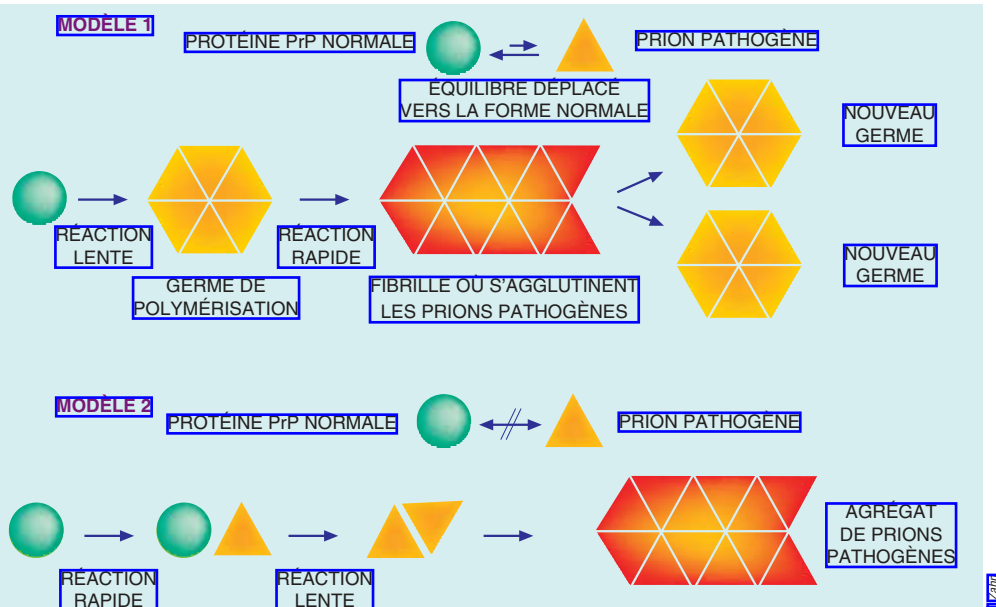
1985, Charles Weissmann, à Londres, découvrit que les hamsters contaminés, mais également leurs congénères sains, produisent leur propre protéine normale. Alors, on distingua deux formes : la forme cellulaire normale, PrP^C, et la forme pathogène, infectieuse, PrP^{Sc}, C pour cellule et Sc initialement pour scrapie, mais ensuite pour toutes les maladies à prions. Quelles sont les différences entre les deux formes? En ce qui concerne la composition, aucune. En revanche, l'arrangement géométrique est spécifique de l'une ou de l'autre des deux formes.

Alors que la protéine PrP «saine», inoffensive, se dissout dans l'eau, les prions «pathogènes» s'agglomèrent en filaments. Dans le cerveau des patients atteints de la maladie de Creutzfeldt-Jakob ou d'animaux contaminés par des maladies à prions, ces filaments forment de véritables grumeaux. De surcroît, contrairement aux protéines PrP normales, les prions pathogènes sont extrêmement résistants aux enzymes qui découpent les protéines, les protéases. Cela signifie qu'une fois formées, les plaques amyloïdes ne peuvent pratiquement plus être éliminées du cerveau, et que les prions infectieux ingérés avec les aliments ne sont pas découpés dans le tube digestif en petits fragments inoffensifs.

Une troisième propriété est encore plus grave : pour réduire de 30 pour cent le pouvoir infectieux d'extraits de bovins, on doit les chauffer pendant 20 minutes à 133 °C, sous une pression égale à trois fois la pression atmosphérique. Le premier cas d'encéphalopathie spongiforme bovine est vraisemblablement apparu parce que ces conditions n'ont pas été respectées.

De la protéine inoffensive au prion pathogène

Un prion pathogène apparaît lorsqu'une protéine PrP normale prend une conformation anormale. Cela se produit parfois de façon spontanée en raison d'une anomalie de repliement de la protéine naturelle, mais la probabilité augmente quand le gène codant la protéine PrP normale porte une mutation telle que la protéine adopte préférentiellement la conformation anormale. Comme le proposait S. Prusiner en 1987, un prion devenu pathogène pourrait obliger des protéines PrP normales à changer de



2. DEUX MODELES de transformation de la protéine PrP normale en prion pathogène ont été proposés. Dans le modèle de la formation de germes (modèle 1), il règne un équilibre thermodynamique entre la protéine PrP normale et le prion pathogène, dont la structure spatiale a été modifiée : l'équilibre est normalement déplacé du côté de la forme inoffensive. Lorsque des molécules pathogènes s'agglutinent pour constituer un germe de polymérisation, il se forme des amas, ou «fibrilles». Parfois, ces amas se rompent et forment de nouveaux germes, de sorte que la quantité de prions pathogènes augmente. Dans le second modèle, une molécule pathogène aurait un effet «contaminateur», imposant sa conformation anormale à toute la protéine PrP normale avec laquelle elle serait en contact. Des fibrilles commenceraient à se former quand les molécules pathogènes seraient assez nombreuses.

forme et à adopter la conformation pathogène : ce serait un moyen d'assurer sa multiplication. Cela expliquerait pourquoi les maladies à prions sont transmissibles, pour autant que les prions ingérés avec les aliments parviennent au cerveau.

Selon le modèle de S. Prusiner, une protéine PrP normale et un prion pathogène s'assembleraient pour former un hybride et se sépareraient lorsque la conformation anormale serait transmise. À chaque nouveau cycle, les molécules infectieuses devraient doubler, mais ce n'est que lorsque leur concentration est suffisante qu'elles s'assembleraient en longues chaînes, c'est-à-dire en fibrilles amyloïdes (voir la figure 2).

Peter Lansbury et ses collègues de la faculté de médecine, de l'Université Harvard, à Cambridge, ont proposé un autre modèle, dit de la formation de germes. Les deux formes de protéines seraient en équilibre thermodynamique, passant d'une forme à l'autre ; dans le cas normal, l'équilibre serait déplacé vers la forme «saine» qui prédominerait. C'est seulement lorsque plusieurs molécules anormales parviendraient à constituer un germe de polymérisation, qu'elles formeraient alors un piège à prions pathogènes, déplaçant l'équilibre. Parfois, les amas en croissance se rompent et forment de nouveaux germes de polymérisation, assurant une multiplication rapide des germes.

L'équipe de Manfred Eigen, à l'Institut Max Planck de chimie-physique et biologie, à Göttingen a analysé en détail la cinétique de ces modèles (voir *L'énigme des prions*, page 86 à 91). Toutefois, personne n'a encore réussi à reproduire le modèle sur de véritables molécules : on ignore encore comment produire, par génie génétique, un prion qui adopterait d'emblée la conformation anormale.

D'après des expériences réalisées par l'équipe de S. Prusiner sur des souris transgéniques, un facteur complémentaire – un cofacteur – semble nécessaire au changement de conformation. Ces facteurs pourraient être des protéines chaperonnes, qui, naturellement, aident les protéines à se replier correctement. Elles participeraient au dépliement des protéines mal conformées, mais les protéines dépliées, échappant à la vigilance de leurs protéines chaperonnes, adopteraient la conformation pathogène au lieu de la conformation normale.

Ensuite, la conformation anormale étant très stable, les prions pathogènes échapperaient à tout traitement correcteur. Ainsi, contrairement à leur mission, les protéines chaperonnes favoriseraient la conformation pathogène en abaissant la barrière énergétique qui doit être franchie lors de la transformation d'une forme repliée en une autre.

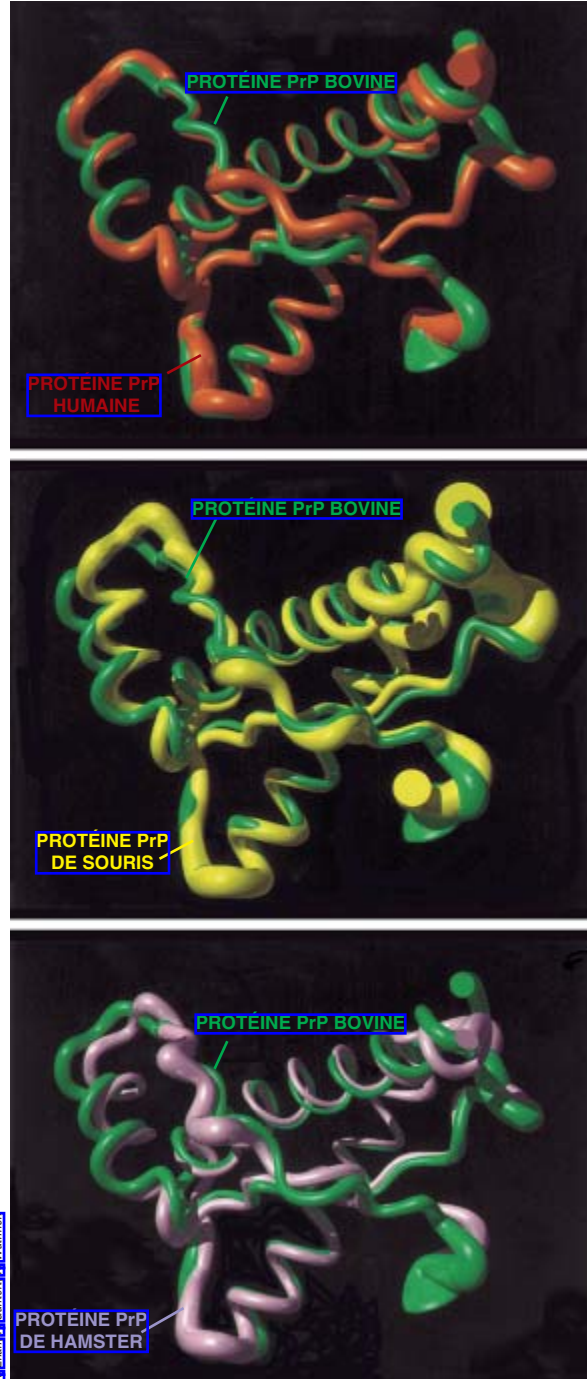
Une protéine à queue mobile

Les détails de la transformation d'une protéine PrP cellulaire inoffensive en un prion infectieux restent encore mystérieux. Pour les préciser, on doit d'abord déterminer la conformation spatiale des deux formes de protéines. On pourrait alors étudier pourquoi et comment la protéine PrP normale se convertit en prion pathogène.

Depuis 1996, nous étudions la structure de ces protéines. Nous travaillons sur une protéine produite par des bactéries modifiées qui absorbent du carbone 13 et de l'azote 15. Ces isotopes nous permettent de déterminer la structure spatiale de cette protéine par spectroscopie par résonance magnétique nucléaire, ou RMN. Connaissant la structure d'une protéine, on en déduit son mécanisme de repliement et ses interactions avec d'autres protéines.

En collaboration avec Francisco Lopez Garcia et Kurt Wüthrich, nous avons récemment élucidé la structure tridimensionnelle des protéines PrP «saines» d'origines bovine et humaine (voir la figure 3). Les deux protéines ont une longue terminaison mobile – une queue –, attachée à un «corps», plutôt sphérique, comprenant trois segments enroulés en hélices alpha et un élément en forme de tôle ondulée (les feuillets bêta).

Nous avons également découvert les mouvements de la queue, très mobile, de la protéine (voir la figure 1). Les protéines ont rarement de telles terminaisons dépourvues de structure fixe, et cette particularité pourrait jouer un rôle – que nous ignorons encore – dans la fonction normale de la protéine PrP. Nous n'avons pas encore identifié le rôle de la protéine normale, car, chez la souris, l'élimination totale du gène qui la code n'a aucune conséquence : les souris se développent normalement. Quoi qu'il en soit, nous savons que cette protéine est surtout



3. LA COMPARAISON DES PROTEINES PrP de différentes espèces animales révèle les différences et les ressemblances. La protéine PrP bovine (en vert) a une silhouette plus proche de celle de la protéine PrP humaine (en rouge) que de celle de la protéine PrP de la souris (en jaune) ou du hamster (en violet). Les molécules ont été représentées sans leur région mobile. La grande similarité des protéines humaine et bovine aurait favorisé la transmission de l'encéphalopathie spongiforme bovine à l'homme.

présente dans le système nerveux, et qu'elle se fixe sur la surface externe des neurones au moyen d'un sucre, lié à l'acide aminé placé en fin de chaîne, à la position 230.

La protéine participe peut-être à la transmission des signaux entre neurones voisins, car elle est présente sur les synapses, les zones de contact entre neurones. Peut-être intervient-elle

LA TERRE

E

50 expériences pour découvrir

— André Prost —

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



Un pli antic

Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modèlent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 002401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE

dans le transport des ions cuivre à travers la membrane, car la partie mobile de la protéine présente une forte affinité pour ces ions, importants pour le fonctionnement de certaines enzymes qui protègent les cellules contre le stress oxydatif.

Séquences superflues, séquences clés

Malheureusement, on ne peut pas encore analyser le prion pathogène, car les fibrilles ont tendance à s'agréger, ce qui interdit leur analyse aux rayons X ou par spectroscopie par résonance magnétique nucléaire, laquelle n'est pas utilisable pour les grosses protéines en solution, qui, de surcroît, sont insolubles. L'équipe de C. Weissmann a réussi à repérer les zones de la protéine PrP normale qui ne sont pas indispensables à la conversion en prion pathogène. Ils ont produit des souris chez qui certaines séquences du gène codant la protéine PrP avaient été éliminées. La délétion d'un long fragment constitué des acides aminés 23 à 88 de la queue flexible n'avait aucune conséquence : les animaux pouvaient toujours être infectés par le prion.

En revanche, quand la protéine était raccourcie encore davantage, les souris devenaient résistantes, comme si elles ne synthétisaient plus du tout de protéine PrP normale. Dès 1993, l'équipe de S. Prusiner avait montré que de longues séquences de la protéine PrP normale adoptent une structure en feuillets bêta, lors de la conversion en prion pathogène. Il s'agit notamment de la séquence des acides aminés 90 à 120 de la terminaison libre, qui, une fois repliée en feuillets bêta, résiste aux enzymes protéolytiques. Outre les questions que posent encore la structure de la protéine PrP normale et celle du prion pathogène, reste une autre question ouverte : comment un prion d'une espèce peut-il se transmettre à une autre espèce et devenir pathogène ?

Pour comprendre comment les barrières d'espèces peuvent être franchies, les biologistes ont d'abord injecté des prions directement dans le cerveau de différents animaux de laboratoire. Ainsi, des hamsters ont reçu des prions extraits de cervelles de souris contaminées ; ils sont devenus malades après une durée d'incubation d'environ 380 jours. La durée d'incubation pour des souris à qui l'on aurait injecté les mêmes prions aurait été trois fois

plus courte. La durée d'incubation pour une transmission de prions de hamster à d'autres hamsters n'est que de 60 jours, et les souris résistent aux prions de hamster. Ainsi, l'efficacité de la barrière d'espèce dépend à la fois de l'espèce réceptrice et de l'origine des prions. Elle pourrait être franchie quand les prions transmis et ceux de l'espèce réceptrice interagissent.

Nous nous sommes demandé dans quelle mesure la structure des protéines PrP normales participe à l'efficacité de la barrière d'espèce. Nous avons comparé des structures modélisées des protéines PrP de la souris, du hamster, de la vache et de l'homme. Nous avons ensuite montré que les protéines PrP normales de la souris, du hamster et de la vache présentent, localement, des différences. Cela expliquerait pourquoi on peut transmettre expérimentalement l'encéphalopathie spongiforme bovine à la souris et au hamster, et confirmerait qu'il existe tout de même une barrière d'espèce plus ou moins élevée. Les protéines de la vache et de l'homme ont une ossature presque identique. Pour autant, cela signifie-t-il qu'il n'y a pas de barrière d'espèce pour la transmission du prion bovin à l'homme ?

L'évaluation des risques

Une protéine n'a pas seulement un «squelette», elle a aussi une «musculature» : les résidus d'acides aminés. C'est pourquoi nous avons simulé sur ordinateur les surfaces – les rondeurs – des protéines PrP normales humaine et bovine. Nous avons fait apparaître les charges électrostatiques de surface (voir la figure 4). Les deux protéines ont des ossatures semblables (seuls huit acides aminés diffèrent), mais les répartitions des charges présentent 21 différences. Ainsi, la protéine PrP bovine normale porte en un site une charge négative, absente dans la version humaine. Inversement, la molécule humaine porte plusieurs charges négatives absentes de la protéine bovine. Ces différences de charges électriques de surface expliquent vraisemblablement – du moins en partie – la barrière d'espèce qui protège l'homme de l'encéphalopathie spongiforme bovine.

Malheureusement, on ne sait pas préciser davantage les risques encourus, et les estimations de l'ampleur de l'épidémie due au nouveau variant

PROTÉINE PrP BOVINE

PROTÉINE PrP HUMAINE

CHARGE POSITIVE

ZONE DE NEUTRALITÉ ÉLECTRIQUE

CHARGE NÉGATIVE

4. LA REPARTITION DES CHARGES DE SURFACE des protéines PrP humaine et bovine diffère. Les flèches jaunes indiquent les domaines chargés négativement (*en rouge*) dans la protéine PrP humaine, mais qui sont absents de la protéine PrP bovine. Au contraire, les flèches

blanches montrent des charges négatives présentes sur la protéine PrP bovine et absentes de la protéine humaine. Ces différences renforcent sans doute la barrière d'espèce entre l'homme et la vache, et limite la transmission de l'encéphalopathie spongiforme bovine à l'homme.

de la maladie de Creutzfeldt-Jakob varient notablement : dans le meilleur des cas, quelques centaines de personnes seraient atteintes ; dans le pire, plus de 100 000 personnes auraient déjà été contaminées. Jusqu'à présent, toutes les victimes avaient des spécificités génétiques qui se retrouvent chez 35 pour cent des Européens : la susceptibilité à la maladie différerait d'une personne à l'autre.

En Grande-Bretagne, probablement 750 000 bovins infectés sont entrés dans la chaîne alimentaire. Les tissus et les organes sont plus ou moins infectieux. Lorsque la maladie est déclarée chez l'animal, le cerveau, la moelle épinière et les yeux contiennent de grandes quantités de prions : près d'un milliard de protéines pathogènes par gramme de tissus. C'est également le cas de la moelle osseuse, des ganglions lymphatiques, des amygdales, de certaines parties de l'intestin grêle et du gros intestin, ainsi que de la rate et des glandes surrénales : environ un million de prions par gramme. En revanche, on n'a jamais réussi à détecter de prions dans le lait ou dans les muscles. Toutefois, lors de l'abattage et de la préparation, des

prions risquent d'être transmis par des couteaux ou par des scies contaminés à des morceaux de bœuf normalement sains. Les produits d'origine bovine sont également utilisés en dehors de l'industrie agroalimentaire : 70 pour cent des produits pharmaceutiques contiennent des extraits bovins, notamment de la gélatine. Néanmoins, son utilisation semble être sans risque, en raison des procédés de fabrication et de surveillance mis en œuvre.

Aujourd'hui, les tests rapides de dépistage de l'encéphalopathie spongiforme bovine utilisés sur les animaux abattus n'offrent pas une sécurité totale, car ils détectent le prion seulement lorsque sa concentration cérébrale est

élevée. Plusieurs équipes recherchent des tests beaucoup plus sensibles de détection du prion chez l'animal. La sensibilité requise dépendra du nombre de prions nécessaires pour infecter un être humain, ce qui n'est pas encore connu. Toujours est-il qu'une vache peut être contaminée par l'ingestion de seulement un gramme de cervelle infectée.

Pour juguler la crise de l'encéphalopathie spongiforme bovine, nous devons continuer à étudier l'agent pathogène et à élucider sa structure interne. C'est sur ces seules bases que l'on pourra développer des méthodes diagnostiques performantes, ainsi que des médicaments efficaces contre la maladie de Creutzfeldt-Jakob.

Ralph ZAHN mène ses recherches à l'Institut de biologie moléculaire et de biophysique de l'École Eidgenössischen Technische Hochschule, à Zurich.

Stanley PRUSINER, *Prions*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 95, pp. 13 363-13 383, 1998.

Ralph ZAHN, *Prion propagation and molecular chaperones*, in *Quarterly*

Reviews of Biophysics, vol. 32, pp. 309-370, 1999.

Hans KRETZSCHMAR et al., *Function of PrP^c as a copper-binding protein at the synapse*, in *Archives of Virology*, suppl. 16, pp. 239-249, 2000.

Adriano AGUZZI et al., *Prions : pathogenesis and reverse genetics*, in *Annual Reviews of the New York Academy of Sciences*, vol. 920, pp. 140-157, 2000.



L'énigme des prions

MANFRED EIGEN

Pour améliorer la fiabilité des tests de dépistage de la maladie de la vache folle, on devra encore préciser les mécanismes d'action et de multiplication des agents responsables de cette maladie.

L'encéphalopathie spongiforme bovine, encore nommée maladie de la vache folle, est transmissible à l'homme et provoque, après une courte période d'incubation, la forme humaine de la maladie, nommée le nouveau variant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, qui aboutit inéluctablement à la mort. La maladie de Creutzfeldt-Jakob est connue depuis longtemps et suit la même évolution, mais elle ne touche pas des personnes si jeunes et sa probabilité d'apparition est très faible.

Si les mesures prises pour éviter de nouvelles contaminations ont été drastiques, de nombreuses questions restent ouvertes : quel est le degré de sécurité des tests ? Quelle est la durée d'incubation chez les bovins ? Chez l'homme ? Les réponses à ces questions ne sont pas précises, car nous ignorons comment l'agent responsable de la maladie de la vache folle se reproduit dans l'organisme et finit par déclencher les symptômes. Pour comprendre l'épidémie d'encéphalopathie spongiforme bovine et ses effets, nous devons d'abord élucider à quelle vitesse s'effectuent les mécanismes moléculaires sous-jacents, c'est-à-dire en déterminer la cinétique. Ce n'est qu'à cette condition que l'on pourra trouver des mesures efficaces pour enrayer l'épidémie.

La recherche sur les mécanismes d'action du prion, l'agent « infectieux » de la maladie animale et humaine progresse, de sorte que l'on a mis au point des tests de détection des prions infectieux plus fiables, capables de déceler l'agent responsable à une concentration dix à cent fois inférieure à celle des méthodes utilisées jusqu'à présent. Ces tests devraient également permettre le diagnostic de la maladie de la vache folle à un stade plus précoce. Il faudrait cependant des tests encore plus sensibles de plusieurs ordres de grandeur pour que l'on puisse déterminer si un morceau de viande de bœuf est vraiment sans risque, donc pour pouvoir garantir qu'il ne contient pas de prions pathogènes. Les nouvelles connaissances acquises en matière de cinétique de la multiplication des prions ouvrent la voie à de telles méthodes de dépistage.

Stanley Prusiner, de l'Université de San Francisco, a obtenu le prix Nobel de chimie en 1997 pour avoir découvert que les agents infectieux de l'encéphalopathie spongiforme bovine et des maladies apparentées sont des protéines. Il a montré qu'une protéine normale est synthétisée naturellement par l'organisme sain, mais on en ignore encore la fonction. La protéine normale est nommée PrP, et sa forme cellulaire PrP^c. En revanche, la forme anormale ou « infectieuse » est la protéine PrP^{sc}. La désignation *sc* rappelle que l'on connaît depuis longtemps une forme ancienne de la maladie animale, la scrapie ou

tremblante du mouton. La protéine pathogène se distingue de la forme normale uniquement par sa structure spatiale, c'est-à-dire par le repliement de la chaîne d'acides aminés qui constitue les protéines.

Une unique molécule de la protéine pathogène n'est pas infectieuse. La quantité minimale de protéines pathogènes capables de déclencher une infection est plutôt de l'ordre de 100 000 molécules. Cette évaluation résulte d'expériences où, après avoir inoculé à différents groupes d'animaux de laboratoire diverses quantités de la protéine pathogène, on a observé combien d'animaux contractaient la maladie, dans chaque groupe.

L'étrangeté du prion

Charles Weissmann et ses collègues de l'Université de Zurich ont montré que des souris dont le gène de la protéine normale avait été inactivé ne deviennent jamais malades, quelle que soit la quantité de protéines pathogènes administrée : pour qu'un animal devienne malade, il doit synthétiser la protéine PrP normale. De surcroît, Detlev Riesner, de l'Université de Düsseldorf, a montré que même avec des mesures physico-chimiques extrêmement sensibles, on ne détecte aucun ADN ni aucun ARN dans l'« agent » responsable des maladies de type encéphalopathie spongiforme bovine. On peut exclure que les unités infectantes de protéines pathogènes contiennent autre chose qu'une molécule d'une centaine de nucléotides.

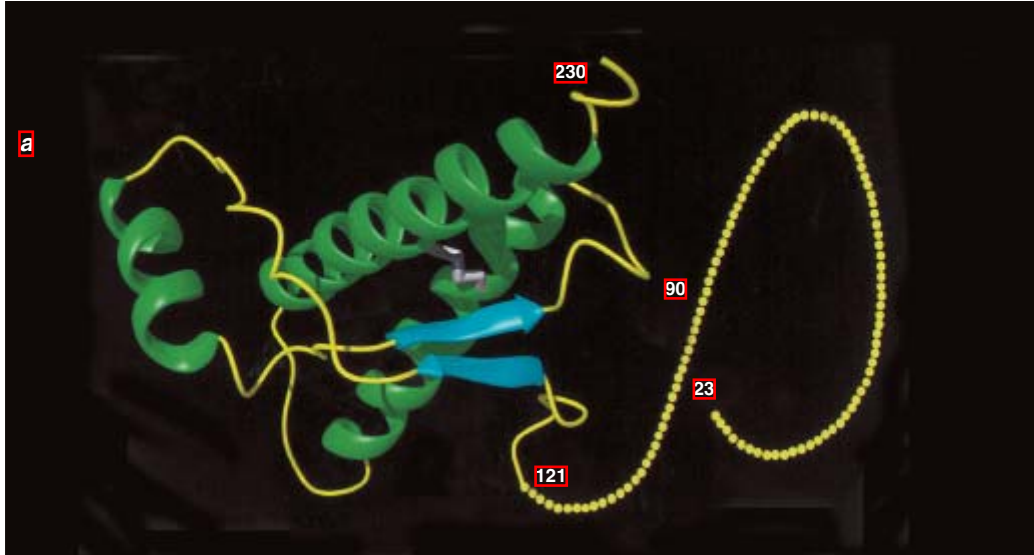
Pourtant, les maladies à prions sont « infectieuses » dans la mesure où l'agent pathogène se multiplie de façon exponentielle. Jusqu'à présent, toutes les maladies infectieuses avaient été attribuées à un agent « reproductible », fondé sur la duplication de son matériel génétique (de l'ADN ou de l'ARN), ce qui n'est manifestement pas le cas des prions. Bien sûr, cette constatation ne remet pas en cause nos connaissances en virologie et en bactériologie « classiques ». Elle montre simplement qu'il existe des systèmes constitués uniquement de protéines qui simulent le comportement réplcatif des acides nucléiques.

C'est à Kurt Wüthrich, de l'École supérieure de technique, à Zurich, que l'on doit une nouvelle découverte dans ce domaine. À l'aide de mesures par résonance magnétique nucléaire, il a déterminé la structure des protéines PrP naturelles (voir la figure 1). Elles présentent un domaine « globulaire » au sein duquel les chaînes d'acides aminés forment trois structures enroulées en hélice. Ce domaine globulaire peut être « digéré » par une enzyme dite protéolytique ; au contraire, le domaine globulaire des prions pathogènes

résiste à toutes les enzymes. Sans doute, la forme pathogène contient-elle moins d'hélices et davantage de ce que l'on nomme des feuillets bêta, où la chaîne d'acides aminés a une structure de «tôle ondulée». Les enzymes ne peuvent alors couper qu'une partie de l'extrémité libre de la chaîne.

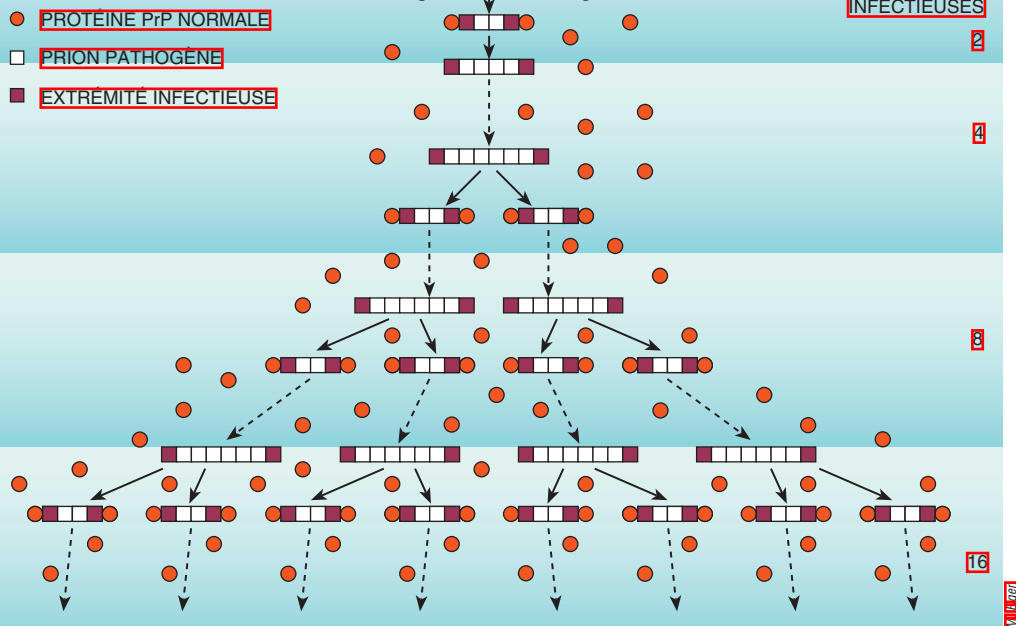
Le test actuellement utilisé pour le dépistage de l'encéphalopathie spongiforme bovine repose sur cette plus ou moins grande résistance aux enzymes. De plus, K. Wüthrich a calculé le degré de divergence entre les prions de différentes espèces animales d'après la structure de leur domaine globulaire. Il a montré que les prions bovin et humain ont une structure spatiale très proche, ce qui permettrait leur transmission d'une espèce à l'autre.

S. Prusiner fut aussi le premier à proposer un mécanisme de transformation de la protéine PrP normale en prion pathogène : quand une molécule



1. LA PROTEINE PrP BOVINE naturelle (a) est constituée d'une séquence (entre les acides aminés 121 à 230) dont la structure est complexe, alors que le reste de la molécule (des acides aminés 23 à 121) forme une terminaison (en pointillés jaunes) dépourvue de structure fixe et libre de se déplacer. Le domaine replié comprend trois hélices alpha (en vert) et un court feuillet bêta (en bleu). Quand on compare cette protéine bovine à la protéine PrP normale de l'homme (b), on constate que

le «corps» de la protéine humaine est, comme la protéine normale bovine, constituée de trois domaines enroulés en hélices (en rouge) et d'une structure en feuillet bêta (en bleu). Lors de la transformation des protéines PrP normales en prions pathogènes, la géométrie de cette zone centrale change. Les chiffres indiquent la position des acides aminés dans la séquence. Les acides 1 à 22 servent d'étiquette d'adressage, et cette séquence est éliminée dès que la destination est atteinte.



2. LES PRIONS pathogènes se multiplient en deux grandes étapes : une phase de croissance et une phase de division. Quand des protéines PrP normales se fixent aux extrémités d'un prion pathogène, elles adoptent la conformation anormale des prions infectieux. Progressivement, par addition de molécules saines à la chaîne infectieuse, cette dernière s'allonge. Au cours de la seconde phase, les chaînes en croissance se scindent en deux (de sorte que leur longueur moyenne reste constante au cours du temps). Alors que l'allongement des chaînes n'augmente pas le nombre de prions infectieux, leur rupture aboutit à une multiplication exponentielle. En réalité, le mécanisme de multiplication est moins régulier que sur le schéma.

pathogène se fixe sur une protéine PrP normale, elle contraint cette dernière à changer de forme et à adopter la forme pathogène. L'agent infectieux catalyserait la conversion de la forme inoffensive en forme nocive et, de proche en proche, assurerait sa propre multiplication.

Selon Peter Lansbury, à Boston, le prion pathogène se multiplierait par un mécanisme proche d'une polymérisation. Dans ce type de réaction, on synthétise un polymère, tel le polyéthylène, par « collage » linéaire d'un grand nombre de sous-unités identiques : ici, une chaîne linéaire de prion pathogène serait obtenue en raboutant des protéines PrP normales qui, une fois assemblées, deviendraient pathogènes. De surcroît, une chaîne ne deviendrait dangereuse, qu'après avoir atteint une taille critique (la chaîne forme alors ce que l'on nomme un germe), au-delà de laquelle, l'addition de nouvelles unités est plus rapide que l'élimination, par des enzymes, de sous-unités déjà fixées. Ces hypothèses semblaient cohérentes avec les observations que l'on fait sur les personnes décédées de la maladie de Creutzfeldt-Jakob : en général, le prion pathogène est présent dans le cerveau des victimes, sous forme de bâtonnets, et « l'unité infectieuse » comporte un

grand nombre de sous-unités de la protéine PrP normale.

En 1996, j'ai étudié la cinétique des réactions chimiques en cause dans cette maladie. J'ai montré que pour que les résultats soient cohérents avec les faits, plusieurs sous-unités doivent interagir. Plusieurs enzymes « allostériques » contrôlent leur activité en adoptant leur forme active seulement après intervention d'une molécule dite effectrice. Grâce à cet effet coopératif, qui impose le changement de structure, on détermine un nombre minimal de prions nécessaires à l'apparition de la maladie.

En fait, le mécanisme de formation de germes de P. Lansbury comprend, lui aussi, une sorte d'interaction coopérative entre les éléments constitutifs de la chaîne du prion pathogène. Un seul composant de cette chaîne est incapable de déclencher les modifications de structure qui rendent le prion pathogène ; pour que la transformation ait lieu, un nombre de sous-unités au moins égal à celui que comporte le germe critique doit coopérer. C'est seulement alors que la vitesse de synthèse de la chaîne devient supérieure à celle de sa dégradation.

Toutefois, bien que la chaîne puisse croître par autocatalyse après avoir atteint la taille du germe critique, on ne constate pas l'accélération expo-

nentielle caractéristique des réactions autocatalytiques. Cela suppose qu'après la transformation, le catalyseur initial, tout comme le produit de la réaction, restent disponibles pour de nouveaux cycles d'autocatalyse, de sorte que le nombre d'éléments autocatalytiques double à chaque cycle de réaction. Pourtant, ce n'est pas ce qui se produit au cours d'une polymérisation, où seule l'extrémité des chaînes présente une activité catalytique constante.

A nouveau, cette difficulté a trouvé une solution : le mécanisme de polymérisation produit lui aussi une croissance exponentielle lorsque les chaînes en cours de construction sont dégradées en continu, libérant en permanence de nouveaux catalyseurs. Martin Nowak, à l'Université de Princeton, a élaboré un modèle, que Joanna Masel, de l'Université d'Oxford, a appliqué à l'évolution des maladies à prions.

Un modèle de la multiplication des prions

Dans ce modèle, M. Nowak a tout d'abord posé les équations du bilan de la croissance, de la rupture des protéines et de leur dégradation. La croissance correspond à une expression de l'allongement de la chaîne. L'action conjointe de l'allongement et de la rupture des chaînes aboutit à l'augmentation exponentielle du nombre d'extrémités de chaînes douées de pouvoir catalytique. La dégradation à laquelle sont soumis les polymères limite la durée de vie des germes infectieux.

La vitesse d'allongement dépend de trois mécanismes : la fixation d'une protéine normale à l'une des extrémités du prion pathogène (limitée par la fréquence de rencontre des partenaires de la réaction) ; le détachement d'une unité saine dont la structure n'a pas encore été transformée ; la conversion de la protéine saine en une protéine pathogène par transformation de sa structure (elle est alors intégrée dans la protéine et assure l'elongation de la chaîne).

Les vitesses de ces trois mécanismes peuvent être regroupées en une seule équation mathématique. Au lieu de poser une équation pour le bilan de chacun des prions pathogènes pris séparément, M. Nowak a utilisé deux termes dont l'un com-

prend la quantité totale d'unités de protéines PrP normales incluses dans les chaînes polymériques de différentes longueurs, et l'autre reflète le nombre de ces chaînes et, par conséquent, de toutes les terminaisons à activité catalytique.

La méthode présente l'intérêt que plusieurs termes s'annulent. Il ne reste que deux équations différentielles, qui décrivent la variation en fonction du temps des deux termes mentionnés précédemment. Les solutions sont constituées de la somme de deux fonctions exponentielles, où le temps apparaît comme exposant, une fois avec le signe plus et une fois avec le signe moins (voir l'encadré ci-contre).

L'une des fonctions représente un terme de croissance, l'autre un terme de dégradation. Ce dernier décrit l'établissement d'un état d'équilibre, où la quantité des chaînes de longueur donnée est constante. Au bout d'un certain temps, ce terme devient négligeable devant le terme de croissance. Le nombre de chaînes de polymères – et celui des prions pathogènes – augmente alors de façon exponentielle, tandis que le nombre de protéines PrP normales diminue.

Une durée d'incubation prolongée

Joanna Masel, à l'Université d'Oxford, a analysé en détail toutes les conclusions tirées de ce modèle et les a comparées à des données expérimentales. Ses résultats seront précieux pour les recherches en cours visant à diagnostiquer les maladies à prions à un stade toujours plus précoce. Ainsi la fixation d'un prion normal sur une chaîne et sa transformation en un prion pathogène durent à peu près un quart d'heure. Un prion pathogène contient un millier de sous-unités : son temps de formation sera d'une dizaine de jours (1 000 quarts d'heure). Selon diverses expériences, cette durée varie de 5 à 20 jours. Pour qu'un état d'équilibre s'établisse, il faut qu'une rupture de chaîne, en moyenne, se produise pendant ce temps. La demi-période pour la rupture en un point donné est d'environ 30 ans. Chaque chaîne présentant en moyenne 1 000 points de rupture possibles, il se produit dans l'ensemble de l'agrégat une rupture de chaîne environ tous les dix jours. La formation et la rupture des chaînes s'équilibrent, mais le

nombre de chaînes (et, par conséquent, d'extrémités de chaînes actives) augmente de façon exponentielle.

Une autre grandeur importante est le rapport entre la vitesse de formation et la vitesse d'élimination des prions pathogènes. D'après des mesures effectuées sur des animaux de laboratoire, les deux vitesses sont du même ordre de grandeur. Cela signifie que le matériel infectieux doit «se reproduire» sans cesse pour survivre. On ignore encore comment se fait l'élimination, mais les défenses immunitaires interviennent vraisemblablement, ainsi que d'autres mécanismes de dégradation ou d'inactivation des prions pathogènes. Le terme traduisant la dégradation est proportionnel à la quantité disponible de prions infectieux. De surcroît, seul

le substrat de la réaction, le prion normal à transformer, se déplace librement en solution et atteint une chaîne pathogène en croissance (schématiquement, on dit que cette réaction rapide est «contrôlée par la diffusion»). Les chaînes de prions pathogènes ne sont pas libres, mais fixées à des membranes : ainsi, une «unité infectieuse» serait bien constituée de 100 000 molécules de prions, mais les chaînes se rompraient dès qu'elles atteignent une longueur environ égale à 1 000 sous-unités. Les fragments restent dans le voisinage et se comportent comme des essaims coopératifs. Ils ne se dispersent qu'à partir du moment où ils se détachent de la membrane.

Ainsi, le matériau pathogène double au bout de plusieurs semaines,

La cinétique de la multiplication

Pour comprendre la multiplication des prions infectieux du point de vue mathématique, on doit prendre en compte l'ensemble des réactions pouvant conduire à une chaîne pathogène de longueur i , et évaluer la vitesse de formation de cette molécule. Certaines réactions, par exemple les défenses immunitaires, peuvent inactiver le mécanisme (a). La chaîne peut se rompre à n'importe quel endroit (b). Seuls les fragments d'une longueur minimale n restent infectieux. Enfin, la chaîne peut s'allonger grâce à la fixation d'une protéine PrP naturelle et de sa conversion en forme pathogène (c). Le métabolisme produit et dégrade des protéines PrP saines à des vitesses données, respectivement v_p et v_d .

Toutes ces réactions ont des constantes de vitesse spécifiques. On exprime le nombre total de chaînes (y) et le nombre total de

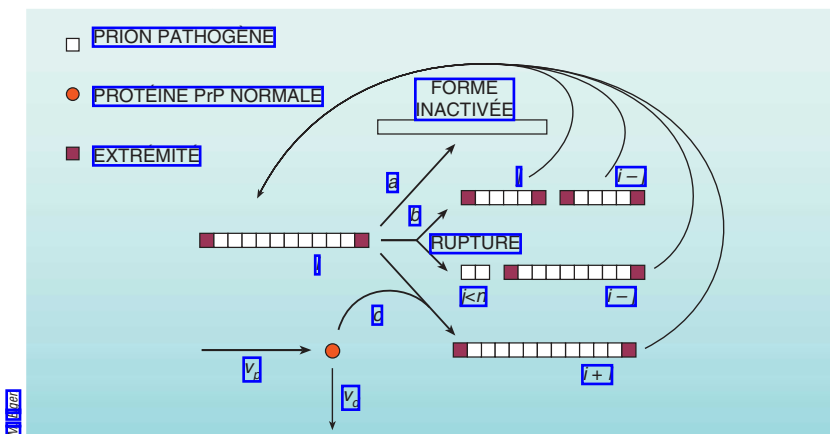
prions pathogènes qu'elles renferment (z) en fonction du temps et de la concentration en protéines PrP normales (x).

Ces termes sont liés par des équations différentielles. À l'équilibre de la réaction, la concentration en protéines PrP normales est considérée comme étant quasi constante, et l'on obtient les expressions de y et de z :

$$y(t) = A_2 e^{k_2 t} + A_1 e^{-k_1 t}$$

$$z(t) = B_2 e^{k_2 t} + B_1 e^{-k_1 t}$$

Ces deux solutions comprennent chacune un terme de croissance et un terme de dégradation. Ce dernier a une constante de temps ($-k_1$) négative : il s'établit un équilibre tel que la répartition des longueurs des chaînes reste constante. Au bout d'un certain temps, le terme de croissance l'emporte. Ces équations révèlent aussi que les prions infectieux se multiplient lentement.



Un prion pathogène peut soit être inactivé (a), soit se diviser (b). Progressivement, la longueur de la chaîne pathogène augmente (c), mais il s'établit un équilibre, où la répartition de la longueur des chaînes pathogènes reste quasi constante et où le nombre des prions pathogènes finit par l'emporter sur le nombre des prions inoffensifs.

et la multiplication d'un germe infectieux jusqu'à une concentration décelable par des méthodes d'analyse classiques requiert près d'une année. Malgré ces résultats, on s'interroge encore sur les phases initiale et terminale de l'infection, sur les modes d'infection, sur le temps qui s'écoule jusqu'à l'invasion du cerveau et de la moelle épinière, ainsi que sur la façon dont l'agent pathogène dégrade ces tissus dans la phase terminale.

Sensibilité des tests et dépistage précoce

Connaissant la cinétique de l'infection, on détermine le stade où l'on peut dépister la maladie. Plus le diagnostic sera précoce, plus efficace sera la lutte contre l'épidémie.

En raison de l'extrême lenteur de la multiplication des prions pathogènes, une méthode de dépistage plus sensible permet de diagnostiquer la maladie des mois, voire des années plus tôt. En 1994, nous avons décrit une méthode adaptée à la détection de très petites quantités de prions. Il s'agit de la spectroscopie de corrélation de fluorescence. La spectroscopie de fluorescence classique consiste

à marquer les molécules à détecter à l'aide d'un colorant qui devient fluorescent lorsqu'il est éclairé par une longueur d'onde caractéristique. On irradie l'ensemble de l'échantillon et l'on mesure l'intensité de la fluorescence, qui indique la concentration de la molécule fluorescente. Celle-ci doit toutefois être suffisamment élevée pour que le signal de fluorescence mesuré soit supérieur au bruit de fond. Cela requiert des concentrations supérieures à 10^{15} particules par litre.

Les nouvelles méthodes détectent des concentrations notablement inférieures. On n'analyse plus la totalité de l'échantillon, mais on dirige le rayon laser sur la plus petite surface possible, imposée par la longueur d'onde choisie. Dans notre cas, le volume analysé par le laser est inférieur au femtolitre (10^{-15} litre). Comme la concentration en molécules fluorescentes est infime et que le signal risque d'être noyé dans le bruit de fond, on n'enregistre plus le signal stationnaire pondéré en fonction du temps, mais on se «met à l'affût» et on attend qu'une molécule fluorescente pénètre dans le faisceau laser. La molécule n'y reste que quelques millisecondes, mais pendant ce temps elle

émet plusieurs milliers de photons. Cette salve de photons se distingue des photons isolés du bruit de fond.

Le dispositif de détection est constitué d'un microscope confocal à fluorescence et d'un ordinateur. Par cette méthode, on visualise des molécules une par une, de sorte que l'on détecte des concentrations extrêmement faibles, de l'ordre de la femtomole, ce qui correspond à environ un milliard de particules par litre.

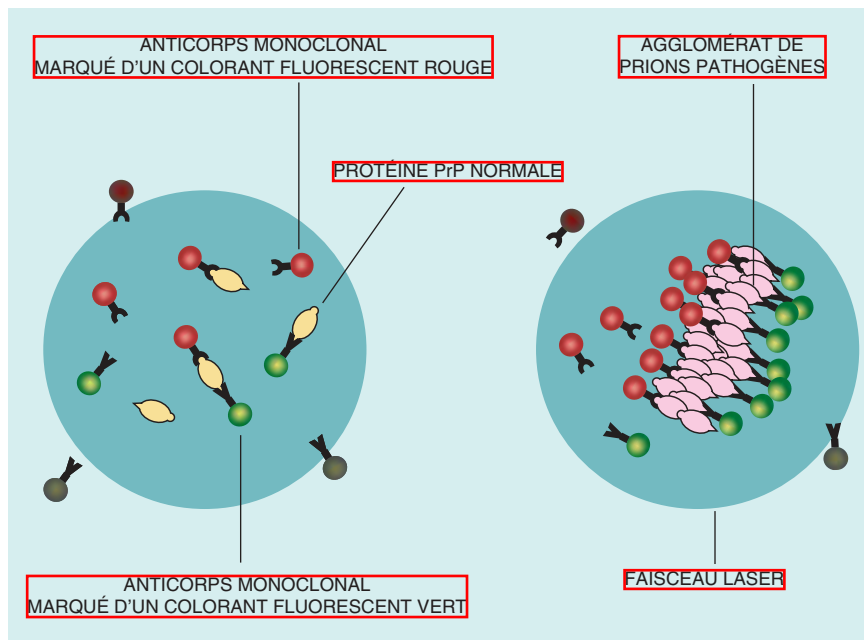
Cette méthode, dite d'autocorrélation, fonctionne avec un marqueur fluorescent lié à une substance qui se fixe avec une grande affinité sur le composé à détecter, apposant une sorte d'étiquette lumineuse. On utilise généralement des anticorps monoclonaux, qui se fixent spécifiquement sur des séquences spécifiques du prion normal. Le prion pathogène est un agrégat de protéines, constitué de nombreux prions normaux, de sorte qu'un grand nombre d'«étiquettes» peuvent s'y fixer.

On peut utiliser deux substances fluorescentes : dès qu'un agrégat pathogène pénètre dans le volume analysé, il émet simultanément un signal rouge et un signal vert, par exemple. Leur coïncidence est une preuve de la présence du prion infectieux. Bien qu'une protéine PrP normale puisse également fixer à la fois un marqueur rouge et un vert, elle ne forme pas d'agrégats de grande taille et ne produit qu'un signal très faible.

La SIFT (pour *Scanning for intensely fluorescent targets*, c'est-à-dire méthode de scannage des cibles très fluorescentes) est une méthode de détection de la fluorescence. Nous l'avons utilisée pour analyser le liquide céphalo-rachidien de personnes souffrant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob.

La sensibilité de cette méthode est 10 à 100 fois supérieure à celle des méthodes classiques de dépistage de l'encéphalopathie spongiforme bovine. La méthode autorise le dosage de l'agent pathogène dans les fluides corporels accessibles, par exemple le liquide céphalo-rachidien. En principe, on pourrait l'appliquer au dépistage de l'encéphalopathie spongiforme bovine chez les bovins vivants (bien que le prélèvement de liquide céphalo-rachidien soit compliqué et nécessite une anesthésie).

Les exigences en matière de recherche de l'agent de l'encéphalopathie spongiforme bovine sont dras-



3. UN MARQUAGE A L'AIDE DE DEUX COLORANTS FLUORESCENTS améliore la détection des prions pathogènes. La méthode (SIFT) utilise deux types d'anticorps qui se fixent spécifiquement sur deux sites différents des prions. L'un est marqué d'un colorant fluorescent rouge, l'autre d'un colorant fluorescent vert. Lorsqu'ils rencontrent un prion pathogène à longue chaîne, les anticorps fluorescents s'y fixent en de nombreux sites (à droite). La particule pathogène trahit sa présence en émettant une forte fluorescence verte et une intense fluorescence rouge lorsqu'elle est excitée par un faisceau laser adapté. Seuls quelques anticorps se fixent sur les protéines PrP normales, de sorte que ces dernières ne fournissent qu'un signal fluorescent très faible lorsqu'elles sont éclairées par le même faisceau laser (à gauche).

tiques. On ne doit pas se contenter d'une concentration en prions pathogènes inférieure à un seuil donné, on doit s'assurer que la viande est totalement exempte de matériel infectieux. On doit trouver comment interdire toute commercialisation de denrées alimentaires susceptibles de contenir des germes pathogènes.

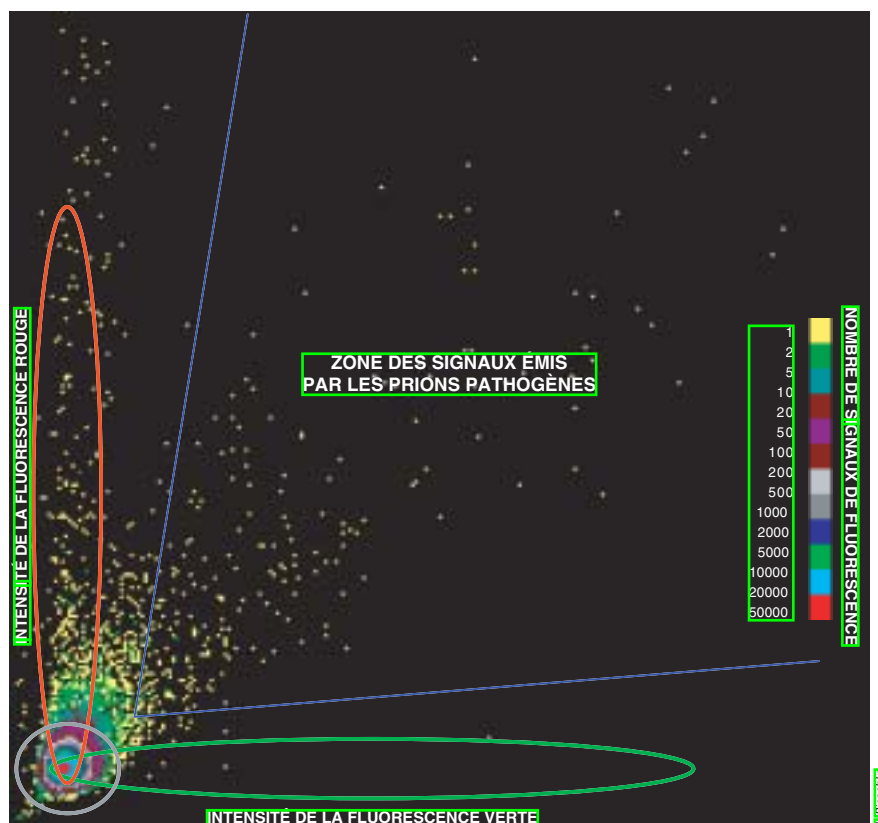
Or, toutes les méthodes de dépistage connues aujourd'hui présentent, certes, une sensibilité extrêmement élevée, mais elles ne détectent que des quantités de prions pathogènes très supérieures aux 100 000 sous-unités d'un germe infectieux. Les nouvelles méthodes, parfois 100 fois plus sensibles que les méthodes classiques n'améliorent guère la situation. Dès lors, comment peut-on débusquer les prions pathogènes parmi l'énorme quantité de particules propres à l'organisme?

La sécurité du consommateur

On pourrait essayer de multiplier artificiellement les germes présents jusqu'à ce que leur concentration dépasse le seuil de détection. Pour les virus et les bactéries, dont le pouvoir pathogène est inscrit dans leurs gènes, cela ne pose aucune difficulté, notamment grâce à la méthode d'amplification des gènes, la PCR. Il faut entre une seconde et une minute pour qu'une séquence caractéristique soit doublée. Pour un échantillon ne contenant qu'une seule séquence cible d'ADN, on obtient 30 réplifications en une demi-heure, soit environ un milliard (2^{30}) de copies.

Même si l'on disposait d'une méthode analogue pour les prions, une telle amplification nécessiterait environ un an, en raison de la cinétique décrite précédemment. Comment peut-on accélérer ces réactions *in vitro*? On pourrait, par exemple, exploiter le fait que les agrégats sont hydrophobes et se fixent préférentiellement sur les membranes. Il nous faudrait influencer sur la cinétique de façon à amplifier en peu de temps les traces infimes de prion pathogène. Ainsi pourrait-on dépister une infection dès qu'elle commence.

La question lancinante de la nature exacte du prion se pose à nouveau. L'agent infectieux n'est ni une protéine isolée ni un polymère défini de sous-unités protéiques. Il s'agit plutôt d'agrégats unidimensionnels de



4. AFIN D'ÉVALUER L'INTÉRÊT DE LA MÉTHODE SIFT pour la recherche de prions pathogènes chez l'homme, on a ajouté une quantité donnée d'agrégats de prions infectieux à du liquide céphalo-rachidien prélevé sur des personnes souffrant de troubles neurologiques qui n'étaient pas dus à une maladie à prions. Dans cette méthode, on utilise deux anticorps marqués par des colorants fluorescents (un rouge et un vert) et, lorsque la fluorescence est intense, on en déduit que le faisceau laser a éclairé un amas de molécules qui ont fixé l'un ou l'autre, ou les deux colorants. On a ainsi enregistré les signaux lumineux et leur intensité (sur l'axe vertical, la fluorescence rouge et sur l'axe horizontal, la fluorescence verte). On observe une majorité de signaux faibles produits par des anticorps marqués à l'aide d'un colorant fluorescent, qui correspondent à la détection de prions inoffensifs (en bas, à gauche). Au contraire, lorsqu'un agrégat de prions pathogènes ayant fixé un grand nombre d'anticorps fluorescents rouges et verts est éclairé par le faisceau laser, il émet une fluorescence intense (composée à parts quasi égales de rouge et de vert). Ces émissions intenses sont représentées par des points jaunes dans la zone supérieure droite (entre les deux lignes bleues). Les points à l'intérieur de l'ellipse rouge et de l'ellipse verte proviennent d'autres agrégats protéiques, qui fixent par hasard l'un des deux marqueurs fluorescents.

protéines, constitués de prions pathogènes et caractérisés par une longueur moyenne de chaîne. La taille de l'unité infectieuse ne dépend pas seulement de cette longueur moyenne. Les agrégats sont probablement plutôt fixés à des membranes, et seules les extrémités des chaînes sont infectieuses. Une seule chaîne de 100 000 sous-unités pathogènes a un pouvoir

infectieux 1 000 fois inférieur à la même quantité d'unités pathogènes réparties sur 1 000 fragments de chaînes d'une longueur moyenne de 100 unités. Le nombre des extrémités de chaînes «infectieuses» qui assurent la croissance exponentielle des unités pathogènes est un facteur clé des maladies spongiformes transmissibles.

Manfred EIGEN est directeur émérite du Département de cinétique biochimique de chimie et de biophysique de l'Institut Max Planck, à Göttingen.

J. MAZEL et al., *Quantifying the Kinetic Parameters of Prion Replication*, in *Biophysical Chemistry*, vol. 77, p. 139, 1999.

J. BIESCHKE et al., *Ultra-sensitive Detection*

of Pathological Prion Protein Aggregates by Dual-color Scanning for Intensely Fluorescent Targets (SIFT), in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 97, p. 5468, 2000.

M. EIGEN, *Das Gen und der Mensch*, sous la direction de G. Gottschalk, éditions Wallstein Verlag, 2000.

Des cellules productrices de prions

DIDIER VILETTE

La fonction de la protéine PrP normale et sa transformation en prion pathogène seront précisées par l'étude de lignées de cellules qui produisent des prions.

La tremblante du mouton et de la chèvre est une encéphalopathie spongiforme transmissible, décrite depuis longtemps, et très répandue : elle touche les ovins et les caprins sur l'ensemble du globe à l'exception de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande, réputées indemnes. En France, elle touche jusqu'à 10 pour cent des animaux de certains troupeaux. Ainsi, cette pathologie est un problème de santé animale et fait l'objet de recherches menées dans différents laboratoires de l'Institut national de recherche agronomique, l'INRA. De surcroît, la tremblante ovine est considérée comme le prototype des encéphalopathies spongiformes transmissibles naturelles. La maladie se propage naturellement comme une maladie infectieuse, contrairement aux encéphalopathies spongiformes transmises expérimentalement aux rongeurs. Les enseignements tirés de l'étude de la tremblante du mouton et de son agent pathogène sont précieux pour les recherches menées sur les souches naturelles responsables de l'encéphalopathie spongiforme bovine, ou maladie de la vache folle, ou de la maladie humaine de Creutzfeldt-Jakob.

Pour étudier la fonction de la protéine PrP normale et sa transformation en prion pathogène, nous essayé d'obtenir des cellules qui synthétiseraient à la demande des prions. Nous nous sommes fondés sur divers résultats expérimentaux établis par les équipes qui travaillent depuis plusieurs années sur les prions. Ainsi, nous savons aujourd'hui que la sensibilité de l'animal à la maladie dépend de l'expression du gène codant

la protéine PrP normale : des souris transgéniques chez qui cette protéine est surexprimée développent la maladie beaucoup plus rapidement que les autres souris. En outre, la protéine PrP normale intervient dans le franchissement de la barrière d'espèce : l'infection par des prions pathogènes provenant d'une autre espèce est, en général, bien plus rapide quand l'animal receveur synthétise la protéine PrP normale de l'espèce infectante. Ainsi, nous avons choisi de renforcer, par transfection, l'expression de la protéine PrP ovine normale dans différentes lignées cellulaires, qu'elles soient de mouton ou d'autres espèces, puis nous avons testé si elles assuraient la réplication des prions pathogènes ovins.

Dans un premier temps, nous avons tenté d'utiliser des lignées cellulaires provenant du système nerveux central de mouton (l'organe cible des prions pathogènes), mais, après la transfection, la protéine PrP ovine normale était peu surexprimée, et ces cellules se révélèrent être un piètre moyen de multiplier les prions. Avec nos collègues de l'équipe Infections à prions, à Jouy-en-Josas, nous avons alors mené des essais sur des lignées cellulaires issues d'autres espèces, et nous avons obtenu de bons résultats avec une lignée de cellules épithéliales de lapin. Nous avons placé le gène codant la protéine PrP ovine normale sous contrôle d'un promoteur inductible par les tétracyclines, c'est-à-dire qu'en agissant

sur le promoteur, on commande le moment de l'expression et la quantité de protéine produite. Ce gène ovine modifié a été réintroduit par transfection dans les cellules épithéliales de lapin. La lignée cellulaire correspondante a été nommée Rov. En l'absence de l'inducteur – la doxycycline –, le gène ne s'exprime pas et les cellules Rov ne produisent pas la protéine PrP ovine normale. En revanche, dès que l'on introduit de la doxycycline dans le milieu de culture, les cellules modifiées de lapin synthétisent la protéine ovine.

La deuxième étape consistait à vérifier que l'on pouvait aussi produire du prion ovine pathogène. Pour infecter les cellules Rov, on les fait incuber pendant quelques jours en présence d'un broyat de cerveau de mouton atteint de la maladie. Pour détecter si des prions ovins sont bien produits dans les cellules infectées, nous avons réalisé deux types de tests. Le plus simple consiste à détecter biochimiquement la présence de la protéine PrP anormale dans les cellules infectées. Pour ce faire, on extrait les protéines cellulaires, on fait agir une protéase pour dégrader la protéine PrP normale (seul le prion pathogène résiste aux protéases) et l'on recherche par des méthodes de laboratoire adaptées la présence de la forme pathogène. La deuxième « preuve » de la présence de prions pathogènes consiste à inoculer dans le cerveau d'animaux sains des extraits de nos cultures. Si l'animal meurt d'une encéphalopathie spongiforme, c'est bien que la culture cellulaire contenait l'agent infectieux.

La longueur de la période d'incubation des encéphalopathies spongiformes est l'une des difficultés des expériences menées sur les prions. Afin de se doter d'un modèle animal plus sensible aux prions ovins que les souris classiques, nous avons mis au point, avec Jean-Luc Vilotte, du laboratoire de Génétique biochimique et cytogénétique de l'INRA, des souris transgéniques qui expriment non plus la protéine PrP normale de souris, mais la protéine PrP normale de mouton. Nous avons obtenu des animaux pour lesquels la période d'incubation a été réduite d'un an (passant de 14 mois à 2 mois), quand elles sont infectées par le prion ovine.

Grâce à notre modèle de souris transgéniques, nous avons montré que les cellules Rov assurent une production stable des prions ovins pathogènes : toutes les souris transgéniques inoculées avec les cultures infectées succombent d'une encéphalopathie spongiforme. Les concentrations infectieuses obtenues après multiplication de ces prions en culture sont comparables à celles que l'on obtient chez l'animal. De plus, nous avons vérifié qu'en l'absence d'expression de la protéine PrP normale, les prions pathogènes ne sont pas produits.

Sur cette culture de cellules épithéliales de lapin, certaines cellules (en bleu) ne produisent pas de prions pathogènes de mouton, mais d'autres (en marron) en synthétisent.

Olivier Andreoletti

Enfin, les cellules Rov infectées convertissent la protéine PrP normale en protéine anormale, agrégée et résistante à la dégradation par les protéases.

Généralement, on admet que, chez l'animal, le prion pathogène est à l'origine de la mort neuronale ; pourtant, dans nos cultures cellulaires, nous n'avons constaté aucun effet cytopathogène associé à la multiplication de l'agent infectieux dans les cellules Rov. Ni leur croissance ni leur viabilité ne sont perturbées par la réplication de l'agent ovin, et l'observation au microscope ne permet pas de distinguer les cellules infectées des cellules contrôles. En conséquence, des cultures infectées peuvent être maintenues et étudiées pendant plusieurs mois. Ainsi, des cellules qui ne sont pas d'origine neuronale peuvent assurer une réplication efficace de prions pathogènes pour peu que l'expression de la protéine PrP normale soit suffisante.

La mise au point de ces nouveaux outils ouvre de nombreuses perspectives pour la recherche sur les encéphalopathies spongiformes transmissibles. Aujourd'hui, on ne dispose d'aucun modèle qui permettrait d'étudier la réplication de prions bovins ou humains en culture cellulaire. La méthode que nous avons mise au point pour l'agent de la tremblante du mouton permettrait d'assurer la multiplication des prions responsables de l'encéphalopathie spongiforme bovine ou de la maladie de Creutzfeldt-Jakob. Grâce à ces cultures cellulaires, on pourra tester de nombreuses molécules et identifier celles qui bloquent la propagation de ces agents pathogènes.

Les souches de tremblante circulant dans le cheptel ovin sont très variées et leur caractérisation, longue et complexe, nécessite la transmission à l'animal de laboratoire. Les modèles cellulaires pourraient représenter une alternative à l'expérimentation animale et nous serviront à étudier, à l'échelle cellulaire, le cycle infectieux, la réplication et la propagation de ces agents infectieux non conventionnels.

Didier VILETTE mène ses recherches dans l'équipe de Hubert Laude, Virologie et immunologie moléculaires, de l'INRA, à Jouy-en-Josas.

D. VILETTE et al., *Ex vivo propagation of infectious sheep scrapie agent in heterologous cells expressing ovine PrP prion protein*, in *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 98, pp. 4055-4059, 2001.

L'amplification des prions par PMCA

Les prions, les agents infectieux associés aux encéphalopathies spongiformes transmissibles, semblent constitués uniquement d'une protéine qui ne diffère de la protéine naturelle PrP, présente à la surface de nombreuses cellules de l'organisme, que par sa conformation. Aujourd'hui, de nombreuses questions restent ouvertes : par quel mécanisme, le prion pathogène se réplique-t-il dans l'organisme ? Comment déclenche-t-il la maladie ? Quelles substances pourrait-on utiliser pour lutter contre la maladie ? Et enfin, comment peut-on améliorer les tests de dépistage de cet agent pathogène ?

L'émergence du nouveau variant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob impose de mettre au point des procédés de diagnostic qui puissent détecter la maladie de façon rapide, efficace et précise. Toutefois, la difficulté principale tient au fait que les prions pathogènes ne sont abondants que dans l'organe cible principal : le cerveau. Pourtant, on a montré que les prions pathogènes sont également présents en petites quantités dans certains tissus, tels que les organes lymphoïdes et le sang. Généralement, les maladies infectieuses sont diagnostiquées grâce aux réactions immunitaires que l'agent infectieux déclenche dans l'organisme ou par l'amplification de la signature (la présence d'acides nucléiques spécifiques) de l'agent incriminé, notamment par la réaction d'amplification des gènes, la PCR. Toutefois, les encéphalopathies spongiformes transmissibles ne déclenchent pas de réactions immunitaires, car l'agent infectieux est une protéine qui a la même séquence qu'une protéine synthétisée naturellement par l'organisme. De surcroît, la PCR n'est d'aucune aide, puisque les prions ne contiennent pas d'acides nucléiques. Dès lors, quel test diagnostique précoce, sensible et spécifique peut-on utiliser pour diagnostiquer une encéphalopathie spongiforme transmissible ?

La méthode standard la plus sensible utilisée jusqu'à présent pour détecter l'agent infectieux consiste à inoculer le matériau testé dans le cerveau d'animaux de laboratoire (des souris ou des hamsters) et à observer l'apparition de symptômes. Malheureusement, ce type d'expérience peut prendre des mois, voire des années. Pour détecter plus rapidement les prions pathogènes, plusieurs laboratoires européens ont mis au point des tests biochimiques, mais ils sont moins sensibles que les tests biologiques, et il n'est pas établi qu'ils repèrent les animaux porteurs asymptomatiques. De surcroît, ces tests sont pratiqués *post-mortem* sur le cerveau des animaux abattus, et nous devons absolument trouver com-

ment dépister les animaux vivants infectés, qui sont encore dans la période d'incubation. Ces tests devront être pratiqués sur des tissus facilement accessibles, de préférence le sang. Diverses méthodes ont été proposées, mais ce sont souvent des variations sur le même thème, des améliorations des réactifs ou de l'appareillage déjà utilisés.

Nous n'avons pas essayé de mettre au point une méthode de détection plus sensible, mais nous avons tenté d'amplifier des traces de prions indétectables par tout autre méthode aujourd'hui disponible. Nous avons élaboré la méthode d'amplification cyclique des protéines anormalement repliées, la PMCA, qui imite la réplication des prions *in vivo*. Au moment de l'infection, les animaux ou les hommes sont contaminés par de minuscules quantités de prions pathogènes, qui se répliquent lentement au détriment de la protéine PrP normale. La PMCA reproduit le même scénario, à ceci près qu'il est accéléré, au point que quelques années dans la réalité deviennent quelques heures en laboratoire. Le prion pathogène est un petit oligomère qui contient plusieurs unités protéiques dans une conformation anormale, et la protéine infectieuse enclenche le repliement anormal de la protéine normale. De cette façon, de plus en plus de protéines normales sont transformées et incorporées dans le polymère pathogène. Pour multiplier le nombre d'unités mal conformées, nous avons utilisé des ultrasons dont on sait qu'ils cassent les polymères.

Par ce procédé de sonication, les agents pathogènes sont découpés en petits fragments qui vont «repousser» en présence de protéine PrP. Ainsi, avec la PMCA, on soumet un échantillon contenant des traces de prions et un excès de protéine PrP à des cycles d'incubation (où le polymère pathogène croît) suivis de bouffées d'ultrasons (qui multiplient le nombre d'unités infectieuses). Le nombre de cycles peut être multiplié à volonté et la quantité de prions pathogènes augmente exponentiellement. Cette méthode est spécifique, car, en l'absence de prion, la protéine PrP ne peut être transformée.

C'est la première méthode qui autorise une amplification cyclique, *in vitro*, des prions, selon un principe qui ressemble à la multiplication de l'ADN par PCR. La PMCA servira certainement dans des tests sanguins de dépistage de l'encéphalopathie spongiforme bovine et du nouveau variant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, à un stade précoce.

Claudio SOTO, Institut de recherches pharmaceutiques *Serono*

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1



Les premiers carrés tétra et pentamagiques

CHRISTIAN BOYER

Les carrés magiques ont une vie propre, distincte du courant mathématique principal. La découverte des premiers carrés tétra et pentamagiques prolonge une tradition millénaire.

Vous savez ce qu'est un carré magique : un carré de côté n , comportant donc $n \times n = n^2$ cases, où vous placez tous les nombres de 1 à n^2 de façon que les sommes des lignes, colonnes et diagonales soient toutes égales. Le carré magique de côté 3 est connu des Chinois depuis très longtemps : il daterait de... 2 200 ans avant Jésus-Christ ! (Figure 1a.) Un carré magique 4x4 est représenté dans Melancholia de Dürer (gravure de 1514 à côté du titre).

On sait aujourd'hui construire des carrés magiques de toute taille, à l'aide de nombreux et très variés algorithmes.

CARRÉS BIMAGIQUES ET TRIMAGIQUES

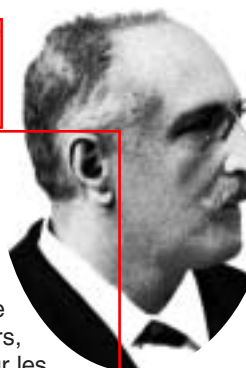
A la fin du XIX^e siècle, on eût l'idée de rajouter une condition supplémentaire. Si le carré magique reste magique lorsque l'on remplace chacun des nombres par son carré, alors le carré est dit « bimagique ». Hélas, le carré chinois est magique, mais vraiment pas bimagique, les sommes

variant de 77 à 107 ! (Figure 1b.) On imagine la difficulté pour construire de tels carrés bimagiques.

Le premier carré bimagique (figure 1c) connu date de 1890, et est dû au français Pfeffermann, qui n'a jamais donné sa méthode de construction. D'autres carrés bimagiques ont été ensuite trouvés par d'autres auteurs, ainsi que des méthodes pour les construire. Vous pourrez lire l'article de Pierre Tougne paru dans Pour la Science en août 1981, disponible sur le site de Pour la Science : www.pourlascience.com.

Les amateurs ont, bien sûr, essayé d'aller au-delà de la bimagie : les records sont faits pour être battus ! Mais l'art est difficile et le carré bimagique de Pfeffermann échoue en trimagie : les sommes des cubes des cellules, selon les rangées, varient entre 526 400 et 555 200. Seules 4 lignes valent la somme correcte, 540 800. Le premier carré trimagique, donc

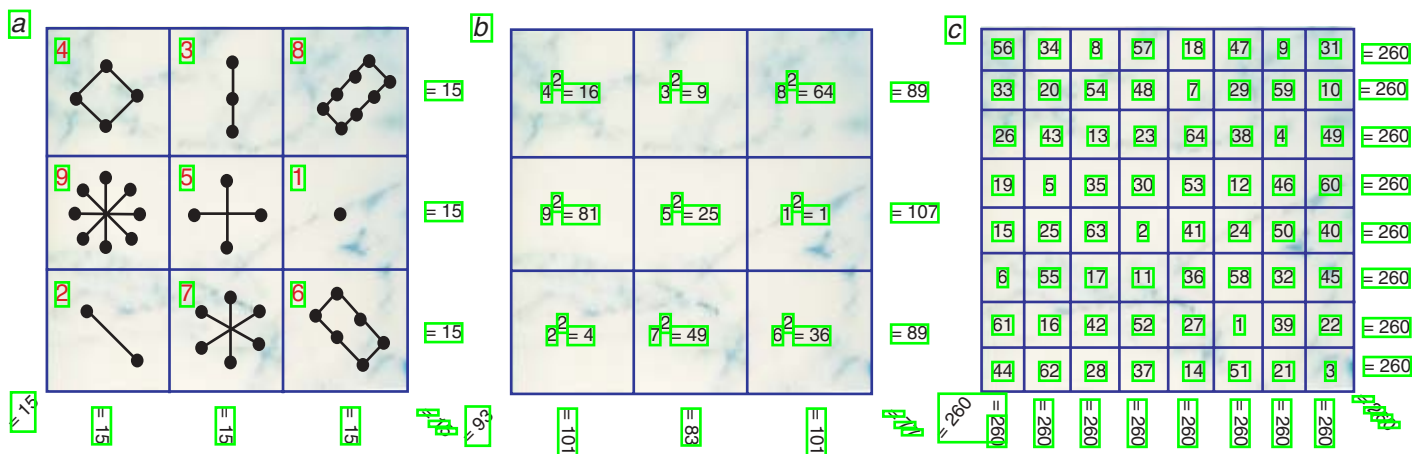
allant jusqu'au cube des cellules, est dû au français Gaston Tarry (1843-1913), un aveyronnais qui, après avoir étudié en Mathématiques Spéciales au Lycée Saint-Louis à Paris, fait toute sa carrière en Algérie au service des Contributions directes de l'Administration des Finances. Son métier lui fait donc manipuler les chiffres !



TOI AUSSI BRUTUS

Écoutons Tarry (représenté ci-dessus) raconter comment est née sa passion pour les carrés magiques alors qu'il avait une cinquantaine d'années :

Pendant trois ans, peu près, un ami d'Alger [Brutus Portier], mage enragé, n'a cessé de me turlupiner pour que je m'occupe des carrés magiques. Je l'envoyais promener, n'aimant pas ce que je considérais comme un jeu de casse-tête chinois. Un jour, mon pro-



1. Le carré magique 3x3 est le plus simple (a) : il était connu des Chinois avec la représentation indiquée ici. Ce n'est pas un carré bimagique : les sommes des carrés des éléments selon les lignes, les colonnes et les deux diagonales ne donnent pas la même valeur (b). Le premier

carré bimagique est celui de Pfeffermann (c). Il est facile de vérifier, en élevant au carré tous ses éléments, que la somme des carrés des éléments des lignes colonnes et diagonales sur le nouveau carré obtenu est égale à 11 180. En revanche, ce carré n'est pas trimagique.

Un professeur de magie malgré moi m'affirma qu'il était impossible de construire des carrés diaboliques (panmagiques) de côté 3n, n n'étant pas divisible par 3. Cela me surprit.

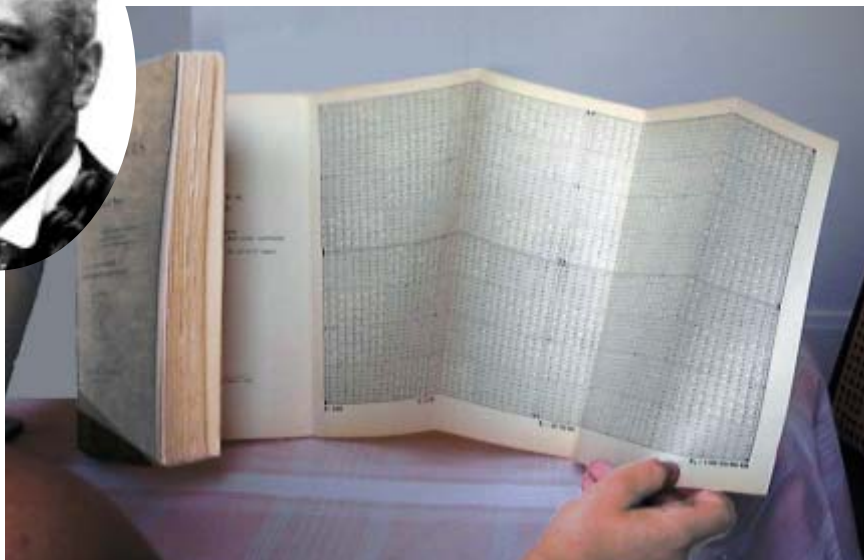


Étonné, Gaston Tarry examine donc le problème et, vous vous en doutez, découvre son premier carré panmagique de côté 15 (un carré panmagique ou diabolique est un carré qui est magique pour toutes ses lignes, ses colonnes et toutes ses diagonales entières ou brisées, et pas seulement pour ses deux diagonales classiques). Une passion est née et Tarry écrira un grand nombre d'articles sur les carrés magiques dans les revues scientifiques de l'époque.

En 1905, Tarry est le premier à construire un carré trimagique. Son carré a pour côté 128. Tarry appelait sa méthode «condensateur cabalistique», dont on trouve la description dans La Mathématique des Jeux de Maurice Kraitchik. Nous ne résistons pas au plaisir de citer Gaston Tarry dans le texte : Ce condensateur est une véritable machine magique chargée à sa limite. En la déchargeant, nous obtiendrons des effets magiques. La décharge ne peut avoir lieu que dans un milieu bon conducteur, un champ magique. Étonnant!

Les records actuels, avant cet article, sont toujours des carrés trimagiques, mais les amateurs ont essayé de trouver des carrés inférieurs à 128. Bizarrement, il est plus difficile de trouver des petits carrés trimagiques que des grands.

Les recherches de Tarry seront poursuivies par un autre français au prénom rarissime, Eutrope Cazalas, général de son état. Ce fils d'un contrôleur des Contributions directes (décidément, après Gaston Tarry...) est un esprit brillant qui, après



3. Carré trimagique, entièrement calculé à la main, en 1933, par le général Eutrope Cazalas (1864-1943), représenté en médaillon. Eutrope publia ce carré dans son ouvrage, Les Carrés Magiques au Degré n.

CARRÉ	TAILLE	INVENTEUR	PAYS	DATE
BIMAGIQUE	8x8	G. Pfeffermann	France	1890
TRIMAGIQUE	128x128	Gaston Tarry	France	1905
TRIMAGIQUE	64x64	Général Cazalas	France	1933
TRIMAGIQUE	32x32	William Benson	États-Unis	Publié en 1976*
TETRAMAGIQUE	512x512	C. Boyer-A. Viricel	France	2001
PENTAMAGIQUE	1024x1024	C. Boyer-A. Viricel	France	2001

4. Les records des carrés multimagiques obtenus à ce jour. * Dans son ouvrage de 1976, Benson indique avoir construit le carré trimagique 32 x 32 dès 1949.

avoir fait l'École Polytechnique, devient rapidement capitaine de l'armée de terre, traduit en 1899 un ouvrage russe Vers l'Inde, et publie en 1909 un opuscule Le Ballon Militaire capturé Wurzburg en 1796 (mais tout ceci n'a aucun rapport

avec les carrés magiques...). Il continue à monter en grade, combat avec éclat pendant la guerre 1914-1918, et devient général en 1921. Notre général, alors à la retraite de l'armée, construit en 1933 le premier carré trimagique 64x64 connu, qu'il cal-

a	b	c
16400 2 331 1017 ... 587 653 436 16400 59 774 964 ... 626 696 393 16400 931 158 92 ... 490 304 529 16400 220 997 803 ... 657 599 962 16400 836 125 187 ... 265 463 754 16400 889 72 130 ... 308 502 715 16400 16400 16400 16400 16400 16400 16400	67108608 0 139938 18244 ... 243899 122205 262143 67108608 140551 1957 156227 ... 105916 260186 121592 67108608 18959 157869 3403 ... 258740 104274 243184 67108608 242703 104109 258891 ... 3252 158034 19440 67108608 121607 260517 105539 ... 156604 1626 140536 67108608 261632 122018 244036 ... 18107 140125 511 67108608 67108608 67108608 67108608 67108608 67108608 67108608	536870400 0 733632 419712 ... 828863 314943 11048576 536870400 866545 895569 745329 ... 803246 653036 182030 536870400 885538 82978 791138 ... 257437 965597 363037 536870400 885597 83933 790941 ... 257634 964642 362978 536870400 867086 395982 744590 ... 803985 652593 181489 536870400 1023 733759 418943 ... 829632 314816 11047552 536870400 536870400 536870400 536870400 536870400 536870400 536870400

2. Le plus petit carré trimagique (a) connu à ce jour est un carré 32 x 32, publié par William Benson en 1976. Le premier carré tétramagique connu (b) : ce carré est magique et les carrés, cubes et puissances 4 des éléments de ce carré forment aussi des carrés

magiques. En (c), le premier carré pentamagique connu dont les puissances cinquièmes des éléments forment aussi un carré magique, de même que les puissances inférieures. Tous les carrés complets peuvent être consultés sur le site de Pour la Science.

5. LES FORMULES «MAGIQUES»

Comment déterminer les sommes des lignes, colonnes et diagonales des carrés multimagiques ?

Un carré magique de côté n contient tous les nombres de 1 à n^2 .

Commençons par la magie simple. Il est connu que la somme des premiers nombres entiers de 1 à N est : $N(N+1)/2$. La somme des premiers nombres entiers de 1 à n^2 est donc : $n^2(n^2+1)/2$

Puisqu'il y a n lignes à ce carré, il suffit de diviser par n pour savoir ce que doit être la somme magique S_1 de chaque ligne, colonne ou diagonale, soit $S_1 = n(n^2+1)/2$

Pour la bimagic, la somme des carrés des premiers nombres entiers de 1 à n^2 est $n^2(n^2+1)(2n^2+1)/6$. En divisant par n , nous obtenons la somme S_2 de chaque ligne, colonne ou diagonale, soit donc $S_2 = n(n^2+1)(2n^2+1)/6$ ou encore $S_2 = (2n^2+1)/3$. Pour la trimagic, la somme des cubes est $S_3 = n \times S_1^2$

Pour la tétramagic, Fermat donnait, dès 1636, dans une lettre envoyée à Roberval, la solution de la somme des entiers de 1 à N élevés à la puissance 4.

Voici la formule de Fermat après avoir remplacé N par n^2 , puis divisé par n :

$S_4 = ((4n^2 + 2) \times n \times S_1^2 - S_2) / 5$. En remplaçant $(4n^2 + 2) \times S_1$ par $6S_2$, on peut écrire, plus simplement que Fermat : $S_4 = S_2 \times (6n \times S_1 - 1) / 5$.

Pour la pentamagic (somme des puissances 5) : $S_5 = (3n \times S_2^2 - S_3) / 2$.

Si l'on préfère développer S_p , cela donne le tableau suivant, tableau générique puisqu'il permet de calculer jusqu'aux sommes des records futurs, les carrés hexa, hepta et octomagiques :

$$\begin{aligned} S_1 &= (1/2) n^3 + (1/2) n \\ S_2 &= (1/3) n^5 + (1/2) n^3 + (1/6) n \\ S_3 &= (1/4) n^7 + (1/2) n^5 + (1/4) n^3 \\ S_4 &= (1/5) n^9 + (1/2) n^7 + (1/3) n^5 - (1/30) n \\ S_5 &= (1/6) n^{11} + (1/2) n^9 + (5/12) n^7 - (1/12) n^3 \\ S_6 &= (1/7) n^{13} + (1/2) n^{11} + (1/2) n^9 - (1/6) n^5 + (1/42) n \\ S_7 &= (1/8) n^{15} + (1/2) n^{13} + (7/12) n^{11} - (7/24) n^7 + (1/12) n^3 \\ S_8 &= (1/9) n^{17} + (1/2) n^{15} + (2/3) n^{13} - (7/15) n^9 + (2/9) n^5 - (1/30) n. \end{aligned}$$

Pour calculer S_p lorsque le carré p -magique de côté n contient les nombres de 0 à $n^2 - 1$ (au lieu des nombres de 1 à n^2), il faut mettre le signe - au lieu du signe + de la deuxième colonne.

Vous remarquerez que la 1ère colonne de S_p est égale à $1/(p+1) \times n^{2p+1}$. Cette particularité est connue depuis le milieu du XVIII^e siècle, grâce à Pascal. Jacques Bernoulli s'intéressa ensuite à cette question de la somme des puissances d'entiers, et depuis son *Ars conjectandi* paru après sa mort début XVIII^e, les nombres utilisés dans ce développement s'appellent maintenant nombres de Bernoulli (1/6, -1/30, 1/42, -1/30, 5/66, ...).

Voici ce que donnent ces formules pour quelques tailles de carrés $A \times A$:

	3 x 3	4 x 4	5 x 5	6 x 6	7 x 7	8 x 8	9 x 9	32 x 32
S_1	15	34	65	111	175	260	369	16400
S_2	95	374	1105	2701	5775	11180	20049	11201200
S_3	675	4624	21125	73926	214375	540800	1225449	8606720000

Sur les sommes ci-dessus (S_p) d'un carré p -magique de côté n , contenant les nombres de 1 à n^2 , on retrouve les sommes du carré bimagique 8x8 de Pfeffermann et trimagique 32x32 de William Benson.

	32 x 32	512 x 512	1024 x 1024
S_1	16368	67108608	536870400
S_2	11168432	11728056920832	375299432076800
S_3	8573165568	2305825417061203968	295147342229667840000
S_4	7019705733392	483565716171561366524160	247587417561640996243120640
S_5	5987221633671168	105636341097042573844228866048	216345083469423421673932062720000

Avec ces sommes S_p d'un carré p -magique de côté n , contenant les nombres de 0 à $n^2 - 1$, on retrouve les sommes des 2 carrés tétramagique 512x512 et pentamagique 1024x1024 de l'article. Pour plus de détails sur les sommes des puissances, voir le chapitre 14 *Sommation des puissances numériques*, livre II de la *Théorie des Nombres* d'Edouard Lucas, Librairie Blanchard.

cule à la main et le publie intégralement à la fin de son impressionnant livre *Les Carrés Magiques au Degré n*. Notre général pensait alors – à tort – qu'il ne pouvait en exister de plus petits.

Le premier carré trimagique 32 x 32 connu est dû à l'américain William Benson. Même s'il est plus petit que celui du général Cazalas, il est toujours un peu trop grand pour être publié ici et nous n'en donnerons ici que les coins (figure 2a) : les sommes des carrés des lignes, colonnes et diagonales sont 11 201 200 (Benson avait utilisé un ordinateur IBM pour ses calculs). Les sommes des cubes des lignes, colonnes et diagonales sont 8 606 720 000. La totalité de ce carré a été publiée pour la première fois en 1976 dans le livre *New recreations with Magic Squares* (pages 86-87) de W. Benson et O. Jacoby, consultable sur le site Internet de Pour la Science. On en retrouve une copie intégrale dans le récent livre *Les carrés magiques* (page 146) de René Descombes ; on ne sait pas aujourd'hui si il existe des carrés trimagiques de taille inférieure à 32 x 32.

CARRÉS TÉTRAMAGIQUE ET PENTAMAGIQUE

Personne à notre connaissance n'a encore été au-delà de la trimagic. Serait-il impossible de construire des carrés dont la magie va jusqu'à la puissance 4, voire 5 ?

En étudiant une méthode de construction de carrés trimagiques 32x32 due à André Viricel, donc construisant des carrés de même taille que celui de William Benson, j'ai essayé d'aller au-delà pour construire des carrés tétramagiques (...si l'on aime le grec) ou quadrimagiques (...si l'on préfère le latin).

Après avoir essayé sans succès sur des carrés de côté 32, 64 et 128, j'ai pu construire des carrés de côté 256 tétramagiques pour les lignes et colonnes, mais dont, hélas, les diagonales restaient obstinément trimagiques «seulement».

Je suis donc ensuite monté à la taille 512, et là, gagné, c'est le bonheur, j'ai obtenu les premiers carrés entièrement tétramagiques ! En avant-première mondiale (soyons pompeux), les coins du premier carré tétramagique sont indiqués sur la figure 2b, le carré total étant consultable sur le site Internet de Pour la Science.

Attention, il utilise les nombres de 0 à $512^2 - 1 = 262\,143$. Si vous préférez les carrés classiques commençant par 1, il suffit de rajouter 1 à chaque cellule... cela modifie bien sûr les sommes, mais le carré est toujours tétramagique.

C'est un carré vraiment monstrueux ..., avec ses 262 144 cellules. Ce carré tétramagique se permet même d'avoir une caractéristique supplémentaire : ses

512 lignes sont pentamagiques, donc jusqu'à la puissance 5. Alors, pourquoi s'arrêter en si bon chemin? Les carrés pentamagiques ne doivent pas être loin.

Bingo! La méthode, appliquée aux carrés de taille 1024×1024 permet de trouver des carrés pentamagiques! Les coins du carré pentamagique découvert sont indiqués sur la figure 5. La méthode employée est indiquée ci-contre.

VÉRIFICATIONS

J'entends déjà l'objection : ces carrés sont-ils vraiment tétra et pentamagique? Étant donnée la taille du carré, personne ne peut manuellement vérifier la véracité de l'affirmation. Cela ne peut se faire que par informatique. Et qui dit informatique, dit... bug possible! D'où le doute insidieux.

Les différentes vérifications ont été faites par des personnes indépendantes (par Christian Boyer, Enghien les Bains, UBasic / Yves Gallot, Toulouse, C et librairie Integer de Proth / Renaud Lifchitz, Paris, Mathematica / Olivier Ramare, Lille, MuPAD) dans des lieux différents et avec des outils distincts : ces carrés sont bel et bien tétra et pentamagiques!

Si vous voulez le vérifier vous-même, ils sont à votre disposition à l'adresse Internet <http://www.pourlascience.com>, mais attention, sous forme ASCII zippée, les fichiers font quand même 0,8 et 3,8 méga-octets! Et attention à votre programme de vérification! Il doit savoir calculer en multiprécision, S_5 , la somme magique du carré pentamagique, (voir la figure 5) étant de l'ordre de 2×10^{32} .

Et si vous, lecteur, étiez le prochain détenteur du record de multimagie? Peut-être saurez-vous trouver des carrés tétramagiques et pentamagiques plus petits, de côté inférieur respectivement à 512 et 1 024? Je suis persuadé que de tels carrés existent.

Je formule l'hypothèse que cette méthode continue à fonctionner, et doit permettre de trouver relativement facilement des carrés hexamagiques, heptamagiques, octomagiques, etc. jusqu'à un niveau quelconque de multimagie, en augmentant suffisamment la taille de carrés, et bien sûr à condition d'utiliser de bons moyens informatiques. Peut-être vérifieriez-vous cette hypothèse?

LE MYSTÈRE DU CARRÉ BIMAGIQUE 7X7

À côté de ces monstrueux carrés multimagiques, il est plaisant de s'arrêter sur le problème opposé, celui du plus petit carré multimagique possible. Il est facile de démontrer qu'aucun carré bimagique de côté inférieur ou égal à 5 ne peut exister. Il est plus difficile, mais faisable,

6. LA MÉTHODE UTILISÉE

Voici le secret utilisé pour obtenir ces carrés tétra et pentamagiques. Cette méthode est initialement due à André Viricel qui a aujourd'hui 88 ans, et qui garde toujours un esprit aussi vif et acéré que lorsqu'il était professeur de mathématiques en activité.

André Viricel a initialement conçu cette méthode pour construire des carrés trimagiques 32×32 . Ma contribution a donc été modeste : j'ai eu simplement l'idée de la tester sur des niveaux supérieurs de multimagie, et sur des carrés de taille plus grande, et de l'implémenter informatiquement.

Voici la méthode qui vous permettra de calculer vous-même vos propres carrés multimagiques :

Démarrer par le coin haut gauche, en choisissant deux nombres N_1 et N_2 , différents et non nuls. Calculer la ligne 0 et la colonne 0, à l'aide de la multiplication numérale "@", puis calculer les autres lignes et colonnes, à l'aide de l'addition numérale "&" des éléments de la ligne 0 et de la colonne 0 : ces deux opérations sont détaillées plus bas.

	Col 0	Col 1	Col 2	...	Col i	...
Li 0	$0 = (0,0)$	$N_1 = (a,b)$	$2 @ (a,b)$	...	$i @ (a,b)$	...
Li 1	$N_2 = (c,d)$	$(a,b) \& (c,d)$	$2 @ (a,b) \& (c,d)$	...	$i @ (a,b) \& (c,d)$	...
...	...	...	...	...	...	...
Li j	$j @ (c,d)$	$(a,b) \& j @ (c,d)$	$2 @ (a,b) \& j @ (c,d)$	...	$i @ (a,b) \& j @ (c,d)$	...
...	...	...	...	...	...	...

La notation (a,b) indique un nombre décomposé dans la base n (n étant le côté du carré), a étant le quotient et b le reste. Prenons maintenant l'exemple de notre carré tétramagique (figure 2b). Regardons son coin haut gauche :

0	139938
140551	1957

$N_1 = 139938 = 273 \times 512$ (taille du carré) + 162 Donc $(a,b) = (273,162)$

$N_2 = 140551 = 274 \times 512$ (taille du carré) + 263 Donc $(c,d) = (274,263)$

Nous ne connaissons pas actuellement les règles exactes qui permettent de savoir si un couple N_1 et N_2 va engendrer un carré multimagique. Mais vous trouverez des couples autres que 139938/140551 qui donnent des carrés tétramagiques 512×512 : les plus petits sont 535/1103, 535/1145, etc...

Addition numérale &

Ce que l'on appelle ici l'addition numérale «&» est bien connue des informaticiens : il s'agit du OU EXCLUSIF, $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$, $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 0$.

$139938 = 100010001010100010$ (en base 2)

$140551 = 100010010100000111$ (en base 2)

$139938 \& 140551 = 000000011110100101$ (en base 2) = 1957 (en base 10) : 1957 est bien le nombre du tableau, sous le nombre 139938

Multiplication numérale @

Calculons l'avant-dernière cellule de la ligne 0 de notre carré tétramagique.

Elle vaut donc $510 @ (273,162)$. Commençons par calculer $510 @ 273$. $510 = 11111110$ (en base 2) et $273 = 100010001$ (en base 2)

La multiplication numérale se calcule comme la multiplication classique que l'on apprend à l'école, sauf que l'addition finale effectuée n'est pas classique, mais numérale (donc « ou exclusif » binaire). Cela donne :

$$\begin{array}{r}
 11111110 \\
 @ 100010001 \\
 \hline
 111111110 \\
 \& 111111110 \dots \\
 \hline
 \& 111111110 \dots \\
 \hline
 = 111100001000011110
 \end{array}$$

Pour conclure la multiplication et afin que le résultat reste de la même taille que ses deux opérands (inférieurs à 512), on effectue une addition numérale supplémentaire des parties droite et gauche du résultat, soit donc : $000011110 \& 011110000 = 01101110$

Le résultat de $510 @ 273$ est donc 11101110 en base 2, soit 238 en base 10.

Si, par la même méthode, on calcule $510 @ 162$, on trouvera 349.

Le résultat de $510 @ (273,162)$ est donc $(238,349) = 238 \times 512 + 349 = 122205$.

Dans le coin haut droit de notre carré tétramagique, on retrouve bien ce nombre dans l'avant-dernière cellule de la ligne 0 (figure 2b) :

122205	262143
260186	121592

de démontrer qu'aucun carré bimagique de côté 6 ne peut exister.

Pour un éventuel carré bimagique de côté 7, la question est encore aujourd'hui réputée ouverte. Démarrons le raisonnement.

Dans un carré 7 x 7, il y a 49 cases. Il faut donc caser les nombres de 1 à 49, soit donc 25 impairs et 24 pairs. La somme S_1 des éléments d'une rangée d'un tel carré doit être égale à $7 \times (49 + 1)/2$, soit 175.

La somme S_2 des carrés des éléments d'une rangée doit être égale à $7 \times (49 + 1) \times (2 \times 49 + 1)/6 = 5775$, qui est de la forme $4k + 3$.

Les carrés des nombres pairs étant de la forme $4k$, et les carrés des nombres impairs étant de la forme $4k + 1$, une somme de 7 carrés ne peut faire $4k + 3$ que si la rangée contient 3 ou 7 nombres impairs.

Pour caser 25 impairs sur 7 rangées, la seule possibilité est donc d'avoir : 6 rangées à 3 impairs et 1 rangée à 7 impairs. D'où la question majeure : existe-t-il des groupes de 7 nombres impairs distincts, compris entre 1 et 49, dont la somme fait 175 et la somme des carrés fait 5 775 ?

En 1892, Michel Frolov, dans le bulletin de la renommée Société Mathématique de France, affirmait qu'il n'existe aucun de ces groupes : il en conclut qu'aucun carré bimagique 7 x 7 ne peut exister. Erreur, Monsieur Frolov ! Mais nous lui pardonnerons, car l'informatique n'existe pas encore à son époque.

Nous avons trouvé exactement 60 groupes ayant ces propriétés, comme par exemple :

$$G_1 = 49, 43, 25, 19, 17, 13, 9$$

$$G_2 = 49, 41, 29, 19, 17, 11, 9$$

...

$$G_{13} = 49, 33, 31, 25, 23, 13, 1$$

...

$$G_{60} = 41, 37, 33, 31, 25, 7, 1$$

Pour constituer une ligne et une colonne d'un tel carré, il suffit qu'il existe au moins un couple de 2 parmi ces 60 groupes ayant un et un seul élément commun.

Si nos calculs sont justes, il y a exactement 424 couples possibles parmi ces groupes de 7 impairs. Par exemple les groupes G_2 , G_{13} cités ci-dessus ont en

17	29	11	19	41	49	9
36	44	7	38	5	25	20
37	3	34	18	8	33	12
15	45	30	14	46	13	12
6	2	43	35	26	31	32
16	28	40	47	22	1	21
48	24	10	4	27	23	39

7. Un carré «quasi» bimagique 7x7 obtenu avec G_2 et G_{13} . Je vous défie de trouver mieux !

commun le seul nombre 49 : le nombre 49 sera alors l'intersection ligne/colonne du couple G_2/G_{13} .

Si on ne se limite pas aux nombres impairs, il existe 1 844 groupes de nombres distincts, pairs ou impairs, compris entre 1 et 49, dont la somme fait 175 et la somme des carrés fait 5 775.

Cette liste a été publiée dès 1909 par Achille Rilly dans Sphinx - dipe. Sans informatique, saluons l'exploit !

Il est possible de construire un programme informatique qui, à partir de ces 424 couples, puis en puisant parmi les 1 844 groupes, essaye de construire un carré bimagique. Sauf erreur de programmation de ma part, j'affirme qu'un tel carré bimagique 7 x 7 n'existe pas.

Mais... voici toutefois (figure 7) un exemple de carré de côté 7 que j'ai obtenu, justement à partir du couple d'impairs G_2 / G_{13} présent en 1^{re} ligne / 6^e colonne.

Est-il magique ? Est-il bimagique ? Ce carré 7 x 7 est «quasi» bimagique. Où sont ses failles ? Mon défi : trouverez-vous mieux ?

Je vous laisse prendre votre calculatrice, ou votre tableur, et tapoter. J'affirme, sans preuve mathématique, qu'il est impossible de faire mieux. Mais peut-être est-ce faux ?

Peut-être saurez-vous approcher de plus près la bimagie de côté 7 ? Ou même, éventuellement, infirmer ce que j'annonce, et prouver, tout simplement en le trouvant, que le mythique carré bimagique de côté 7 existe bel et bien ?

Christian BOYER est consultant en informatique : cboyer@club-internet.fr. Il remercie Yves Roussel de l'ADCS et Jacques Bouteloup pour leur aide.

La Mathématique des Jeux ou Récréations Mathématiques, par Maurice Kraitichik, Stevens Frères, Bruxelles, 1930.

Carrés Magiques au Degré n, par le Général E. Cazalas, Hermann, Paris, 1934.

New Recreations with Magic Squares, par William Benson & Oswald Jacoby, Dover Publications, New York, 1976.

Carrés Magiques Carrés Latins et Eulériens, par Jacques Bouteloup, Éditions du Choix, 1991 (cet éditeur est maintenant situé à Marseille).

Les Carrés Magiques, par René Descombes Vuibert, Paris, 2000.

Oracle, ô des espoirs!

DENNIS SHASHA

Aucun oracle n'est absolument fiable : peut-on profiter de cette imperfection pour réaliser quelques profits ?

Prédire précisément le futur est le trait le plus fréquent des paris : jouer en bourse en est un bon exemple. Hélas, les bons oracles sont rares, tout comme les excellents courtiers en bourse. Dans notre jeu, nous chercherons à tirer profit de l'imperfection d'un oracle.

Vous disposez de 100 euros et avez à parier à dix reprises. Chaque pari porte sur le résultat d'un jeu de pile ou face. L'oracle annonce à chaque fois le résultat, et vous lui faites confiance pour parier, mais il ne peut mentir qu'une seule fois au cours du jeu. Quand vous avez parié x euros, la banque vous verse $2x$ euros lorsque l'oracle dit la vérité (vous avez suivi ses conseils) et elle prend votre argent lorsque l'oracle ment (il vous a induit en erreur). De quelle façon pouvez-vous optimiser votre gain final, au terme des dix paris, sans savoir quand l'oracle ment ?

Examinons un deuxième problème. Cette fois, vous décidez à l'avance les sommes que vous jouerez sans savoir quand l'oracle ment. Quels doivent être vos paris dans ce cas, et quelle somme maximale pouvez-vous espérer gagner à coup sûr, toujours sans savoir quand l'oracle ment, ni même s'il ment ? Précisons : vous perdez tout votre argent quand vous n'avez pas de quoi assurer un pari que vous aviez programmé.

Un peu d'aide pour le premier problème. Supposez qu'il n'y a que trois jets et que l'oracle ne puisse mentir qu'une fois. Combien devez-vous parier la première fois ? Le résultat du premier jet étant connu, comment devez-vous parier la deuxième et la troisième fois ? La figure ci-contre indique quelques possibilités.

La solution de l'énigme sera donnée le mois prochain, et sera bientôt disponible sur le site Internet : www.pourlascience.com

Vous avez...		1) Vous pariez d'abord 50	
Pour ce pari, l'oracle dit :			
Vous avez :			
2) Vous pariez :			
Pour ce pari, l'oracle dit :			
Vous avez :			
2) Vous pariez :			
L'oracle dit :			
Vous avez finalement :			

Solution du problème d'énigmaths du numéro 285

Pour un cercle C d'un rayon supérieur ou égal à 10 centimètres, toute coloration en jaune et en rouge satisfait la condition des 10 centimètres : le problème posé était impossible. En voici une preuve en deux étapes. D'abord, montrons qu'il existe dans le cercle deux points (J en jaune et R en rouge) dont la distance qui les sépare est comprise entre 10 et 20 centimètres. Pour ce faire, supposons rouge le centre P du cercle. Quand le périmètre d'un cercle C_p de 10 centimètres de rayon et de centre P , est jaune, alors le cercle C satisfait la condition des 10 centimètres : donc le périmètre de C_p doit être rouge. Deux cas se présentent.

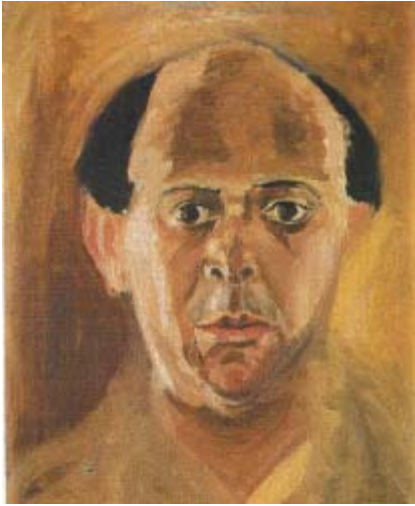
Quand le rayon du cercle C est d'exactement 10 centimètres de longueur, C et C_p sont identiques. Puisque le périmètre

est rouge, nous savons qu'au moins un point J dans le cercle est jaune. Dessinons le segment $[JP]$ puis prolongeons-le au-delà de P jusqu'au périmètre en un point R , qui est rouge. La distance entre J et R est supérieure à la longueur du rayon, mais inférieure au diamètre, donc elle est comprise entre 10 et 20 centimètres.

Lorsque le rayon du cercle C est supérieur à 10 centimètres et que le cercle C_p contient un point jaune, la conclusion du premier cas reste valable. Lorsqu'il n'y a pas de points jaunes dans C_p , nous savons que le cercle C contient un disque rouge D d'un rayon au moins égal à 10 centimètres, mais inférieur au rayon du cercle C . Prenons le premier point J jaune à l'extérieur de ce

disque D et joignons le par un segment à P . Excepté J , chaque point de ce segment est rouge, et le segment est d'au moins 10 centimètres de longueur. Le même raisonnement s'applique lorsqu'on inverse les couleurs. Ainsi, le cercle C contient deux points (J et R) dont la distance qui les sépare est comprise entre 10 et 20 centimètres.

Pour la seconde étape du raisonnement, dessinons les cercles de 10 centimètres de rayon centrés l'un en J et l'autre en R . Ces cercles se coupent en un ou deux points, dont au moins un, Q , est à l'intérieur du cercle C : soit le segment $[JQ]$, soit le segment $[RQ]$ ont des extrémités de couleurs différentes. Ainsi, le cercle C satisfait à coup sûr la condition des 10 centimètres.



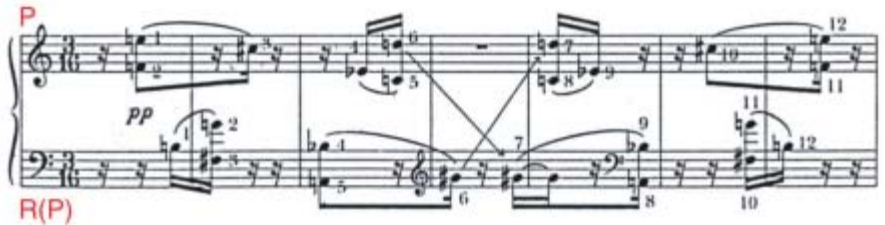
Mathématiques dodécaphoniques

CARLOTA SIMOES

Les mathématiques aident à analyser les règles strictes de la musique dodécaphonique.

Depuis Pythagore, mathématiques et musique sont sœurs jumelles. La musique du xx^e siècle n'échappe pas à l'inspiration mathématique, notamment la musique dodécaphonique ; cette musique a été créée en 1923 par Arnold von Schoenberg (1874-1951) – son autoportrait est à côté du titre –, et adoptée par ses deux élèves Alban Berg (1885-1935) et Anton Webern (1883-1945). Les trois compositeurs étaient intellectuellement «à l'unisson», aussi leur association a été nommée la *Seconde école viennoise de musique*, après celle de Haydn, Mozart et Beethoven.

Les règles de composition de cette musique sont formalisables et la mathématique facilite l'analyse des œuvres du trio viennois. La musique dodécaphonique se distingue de la musique tonale où une des sept notes de la gamme diatonique (*do, ré, mi, fa, sol, la, si, do*) prédomine sur les autres. Le plus souvent, il s'agit de la cinquième note (ici, *sol*) de la gamme choisie par le compositeur pour marquer la



2. LES VARIATIONS POUR PIANO, OPUS 27, de Webern, utilisent une série P (en haut) et la série rétrograde R(P) (en bas). Ces deux séries se combinent, c'est-à-dire que les six premières notes de P, jouées par la main droite, et les six premières notes de R(P), jouées par la main gauche, forment une série complète des 12 notes de la gamme chromatique. Les moitiés suivantes des deux séries composent aussi une série complète.

tonalité. Cette note dominante impose aux autres notes une hiérarchie à laquelle Schoenberg a voulu échapper. En 1923, il établit la méthode à douze tons, qui donne le même mérite à chaque note de la gamme chromatique suivante : *do, do#, ré, m^b, mi, fa, sol, la, la^b, la, s^b, si* ([#] signifie dièse, qui augmente d'un demi-ton la note, et ^b, bémol, qui la diminue d'autant). Dans cette gamme, chaque note est séparée de la suivante par un demi ton.

Une composition dodécaphonique est fondée sur une séquence de ces 12 tons musicaux distincts, sans répétition, nommée série élémentaire (voir la figure 1). L'œuvre est une combinaison de cette série et d'autres séries dérivées par des symétries que nous décrirons plus loin. Par ailleurs, aucune série n'est jouée avant que la précédente ne soit terminée : au terme de la composition, les 12 notes sont apparues un même nombre de fois.

Nous représenterons les notes d'une série par un nombre entier, par convention, la première note étant représentée par 0 : ainsi, la série élémentaire utilisée par Schoenberg dans son *Concerto pour piano, opus 42*, (*m^b, s^b, ré, fa, mi, do, sol^b, la^b, do#, la, si, sol*) devient (0, 7, 11, 2, 1, 9, 3, 5, 10, 6, 8, 4). La différence entre deux nombres représentant deux notes est le nombre de demi-tons qui séparent les deux notes correspondantes.

Quelles symétries sont-elles autorisées dans une composition dodécaphonique ? Notons d'abord que chaque

nombre est une classe d'équivalence modulo 12 : chaque nombre représente d'une part ce nombre, mais aussi ce nombre additionné d'un multiple de 12. Ainsi, par exemple, 1 est équivalent à 49 ou à -11. L'addition de deux nombres devient une addition modulo 12 : par exemple, $(3 + 8)^* = 11$, $(5 + 7)^* = 0$ ou $(7 + 7)^* = 2$ (l'astérisque indique que la somme est effectuée modulo 12, c'est-à-dire que l'on n'écrit que le reste de la division par 12 du résultat de l'addition).

Examinons maintenant les symétries. La série élémentaire est $P = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$, où $a_1 = 0$. La série rétrograde, nommée $R(P)$ est P jouée à l'envers : $R(P) = (a_{12}, a_{11}, a_{10}, a_9, a_8, a_7, a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1)$. Pour la série élémentaire du *Concerto pour piano, opus 42*, $R(P) = (4, 8, 6, 10, 5, 3, 9, 1, 2, 11, 7, 0)$. Dans la série renversée (ou en miroir), nommée $I(P)$, les nombres de la série élémentaire P sont remplacés par leurs nombres opposés modulo 12 : $I(P) = [(-a_1)^*, (-a_2)^*, (-a_3)^*, (-a_4)^*, (-a_5)^*, (-a_6)^*, (-a_7)^*, (-a_8)^*, (-a_9)^*, (-a_{10})^*, (-a_{11})^*, (-a_{12})^*]$, soit, dans notre exemple (0, 5, 1, 10, 11, 3, 9, 7, 2, 6, 4, 8). La série renversée rétrograde, $RI(P)$, est obtenue de P en appliquant les deux opérations précédentes : $RI(P) = [(-a_{12})^*, (-a_{11})^*, (-a_{10})^*, (-a_9)^*, (-a_8)^*, (-a_7)^*, (-a_6)^*, (-a_5)^*, (-a_4)^*, (-a_3)^*, (-a_2)^*, (-a_1)^*]$, soit (8, 4, 6, 2, 7, 9, 3, 11, 10, 1, 5, 0). La série transposée de P par k demi-tons (k est com-



1. LE KINDERSTUCK est la première œuvre dodécaphonique de Webern. La pièce débute par quatre séries qui sont les transposées de P (en haut), de respectivement (de haut en bas) 1, 4, 5 et 6 demi-tons.

pris entre 0 et 11) est obtenue par l'addition modulo 12 de k à tous les nombres de la série P : $P_k = [(a_1+k)^*, (a_2+k)^*, (a_3+k)^*, (a_4+k)^*, (a_5+k)^*, (a_6+k)^*, (a_7+k)^*, (a_8+k)^*, (a_9+k)^*, (a_{10}+k)^*, (a_{11}+k)^*, (a_{12}+k)^*]$. Par exemple, dans le *Concerto pour piano*, Opus 42, $P_5 = (5, 0, 4, 7, 6, 2, 8, 10, 3, 11, 1, 9)$.

De la même façon, nous obtenons les transposées par k demi-tons d'une série rétrograde $R_k(P)$, d'une série renversée $I_k(P)$ et d'une série renversée rétrograde $RI_k(P)$. À partir d'une série élémentaire P , nous construisons 47 séries dérivées que nous pouvons regrouper dans une matrice (voir la figure 4). Une composition dodécaphonique est construite uniquement à partir d'une série élémentaire et de ses dérivées. Le compositeur choisit la série selon l'idée qu'il a de l'œuvre.

Une série étant une permutation de 12 nombres, il en existe donc 12!, soit 479 001 600. Les musiciens se sont intéressés à celles qui avaient certaines propriétés. Prenons, par exemple, la série $P = (0, 2, 7, 5, 10, 9, 3, 4, 11, 1, 8, 6)$: sa série transposée de six demi-tons, soit $P_6 = (6, 8, 1, 11, 4, 3, 9, 10, 5, 7, 2, 0)$ est identique à $R(P)$, aussi cette série élémentaire P a moins de 47 séries dérivées.

Une autre propriété exploitée est la combinaison de deux sous-séries élémentaires. Une série élémentaire $P = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$ peut être divisée en deux séries, nommées hexacordes, de six notes : la série $H_1(P) = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$ et la série $H_2(P) = (a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$. Les séries A et B se combinent quand $[H_1(A), H_2(B)]$ et $[H_1(B), H_2(A)]$ définissent aussi des séries élémentaires. Chaque série élémentaire se combine à sa série rétrograde. Webern a utilisé cette propriété dans *Les variations pour piano*, opus 27 (voir la figure 2), fondée sur la série $P = (0, 1, 9, 11, 8, 10, 4, 5, 6, 2, 3, 7)$, avec $mi=0$. Cette série P se subdivise en $H_1(P) = (0, 1, 9, 11, 8, 10)$ et en $H_2(P) = (4, 5, 6, 2, 3, 7)$. Ici, $R(P) = (7, 3, 2, 6, 5, 4, 10, 8, 11, 9, 1, 0)$ se divise aussi en deux hexacordes. Quand la main droite joue le premier hexacorde de P , $H_1(P) = (0, 1, 9, 11, 8, 10)$, suivi du deuxième hexacorde de $R(P)$, la main gauche joue le premier hexacorde de P .

suivi du deuxième hexacorde de P . La musique a ainsi la forme d'un palindrome : la main droite joue 0, 1, 9, 11, 8, 10, 10, 8, 11, 9, 1, 0, et la main gauche 7, 3, 2, 6, 5, 4, 4, 5, 6, 2, 3, 7. Quand les mains ont joué chacune leur premier hexacorde, les 12 notes de la gamme ont été émises.

Dans *Pièces pour piano*, opus 33a (voir la figure 5), Schoenberg utilise la série élémentaire $P = (0, 7, 2, 1, 11, 8, 3, 5, 9, 10, 4, 6)$, avec $s^b = 0$. $I(P) = (0, 5, 10, 11, 1, 4, 9, 7, 3, 2, 8, 6)$ et $I_5(P) = (5, 10, 3, 4, 6, 9, 2, 0, 8, 7, 1, 11)$. P et $I_5(P)$ sont deux séries combinées, chacune est jouée par une main : là encore, lorsqu'elles ont joué le premier hexacorde, les 12 notes ont été jouées.

Du trio viennois, Anton von Webern est celui qui s'est le plus éloigné de la musique tonale. Ses compositions sont souvent brèves et concises : elles durent seulement quelques minutes. La mélodie traditionnelle y est substituée par des notes individuelles, qui sont parfois attribuées à des instruments différents, comme dans le *Concerto pour neuf instruments*, opus 24. La série élémentaire de cette composition, $P = (0, 11, 3, 4, 8, 7, 9, 5, 6, 1, 2, 10)$, avec $Si = 0$, a été choisie pour ses nombreuses symétries internes. Prenons la série des trois premières notes $T = (0, 11, 3)$, $I(T) = (0, 1, 9)$, $R(T) = (3, 11, 0)$ et $RI(T) = (9, 1, 0)$. En décalant, on obtient : $I_1(T) = (1, 2, 10)$, $R_6(T) = (9, 5, 6)$ et $RI_7(T) = (4, 8, 7)$. La série élémentaire P peut être réécrite à partir de ces mini séries $P = (T, RI_7(T), R_6(T), I_1(T))$: chaque mini série est jouée par un instrument différent (voir la figure 3).

Après Schoenberg, Berg et Webern, d'autres compositeurs ont utilisé des séries pour des éléments musicaux autres que les notes, tels la métrique, l'intensité du son, le timbre...

Si «la musique dodécaphonique a été condamnée par les nazis, car son auteur était juif, par les staliniens pour avoir un formalisme cosmopolite bourgeois et par le public pour être différent de tout ce qui existait», elle est sans doute appréciée des mathématiciens.

Carla SIMOES,
Université de Coimbra, Portugal



3. DANS LE CONCERTO POUR NEUF INSTRUMENTS, OPUS 24, de Webern, la série élémentaire P (en haut) se décompose en quatre sous-séries de trois notes. À partir de la première sous-série Q , on construit $RI_7(Q)$, $R_6(Q)$ et $I_1(Q)$. P se réécrit ainsi $(Q, RI_7(Q), R_6(Q), I_1(Q))$. Chacune de ces sous-séries est jouée par un instrument différent : la flûte, le hautbois, la clarinette et la trompette.

	P	RI	RI ₇	RI ₁₁	RI ₂	RI ₄	RI ₅	RI ₆	RI ₈	RI ₉	RI ₁₀	RI ₁₂
P	0	7	11	2	0	9	3	5	10	6	8	4
RI	7	0	9	11	2	10	3	11	1	8	6	5
RI ₇	11	2	0	9	3	5	10	6	8	4	1	7
RI ₁₁	2	0	9	11	7	0	9	3	5	10	6	8
RI ₂	0	9	3	5	10	6	8	4	1	7	11	2
RI ₄	9	3	5	10	6	8	4	1	7	11	2	0
RI ₅	3	5	10	6	8	4	1	7	11	2	0	9
RI ₆	5	10	6	8	4	1	7	11	2	0	9	3
RI ₈	10	6	8	4	1	7	11	2	0	9	3	5
RI ₉	6	8	4	1	7	11	2	0	9	3	5	10
RI ₁₀	8	4	1	7	11	2	0	9	3	5	10	6
RI ₁₂	4	1	7	11	2	0	9	3	5	10	6	8

4. CETTE MATRICE regroupe les séries dérivées d'une série élémentaire P . À partir de celle-ci, on construit la série rétrograde $R(P)$, la série renversée $I(P)$ et la série renversée rétrograde $RI(P)$. Chacune de ces quatre séries peut être décalée de 1 à 11 demi-tons : on construit ainsi P_k , $R_k(P)$, $I_k(P)$ et $RI_k(P)$, pour k , un entier compris entre 1 et 11. Au total, une série P a 47 séries dérivées.



5. LES PIÈCES POUR PIANO, OPUS 33A, de Schoenberg, sont élaborées à partir d'une série élémentaire P et de la série renversée décalée de cinq demi-tons $I_5(P)$. Ces deux séries (en haut, à

droite) se combinent : quand les mains gauche et droite ont joué chacune les six premières notes de chaque série, les 12 notes de la gamme chromatique ont été jouées.



Chevaucher les ondes

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Un mobile rattrapant les ondes qu'il émet au cours de son mouvement en subit les rudes effets. Au contraire, quand il les dépasse, il peut en profiter.

Un avion qui vole à la vitesse du son vibre tant qu'il est difficile à piloter. Depuis 1947, date à laquelle le «mur du son» fut vaincu par l'aviateur américain Charles Yeager, les pilotes savent que les fortes vibrations qui, au passage du mur du son, secouent la carlingue d'un avion non préparé à cette fin, disparaissent dès que sa vitesse excède celle du son.

L'apparition de vibrations au passage de la vitesse de propagation d'une onde est un phénomène général. Il existe ainsi un «mur de l'onde» pour chaque type : un «mur de l'onde mécanique», un «mur de la vague» etc. Quand la vitesse du mobile a dépassé celle de l'onde qu'il vient de chevaucher, celui-ci reprend une allure paisible.

LE MUR DE LA CATÉNAIRE

En 1990, les ingénieurs de la SNCF qui préparaient le record de vitesse du TGV furent confrontés au phénomène : le train ne pouvait dépasser 500 kilomètres par heure car, à cette vitesse, le captage du courant devient difficile à cause des

mouvements qui agitent la caténaire (le câble tendu, suspendu à l'horizontale au-dessus du train où circule le courant). Ce courant alimentant en énergie la motrice est prélevé par le pantographe, un bras articulé situé sur le toit.

Telle une corde de piano, la caténaire vibre verticalement dans une direction perpendiculaire à son axe : des «ondes transverses» s'y propagent. Leur vitesse est d'autant plus grande que la caténaire est légère et qu'elle est tendue (cette vitesse est égale à la racine carrée du quotient de la tension par la masse par unité de longueur de la caténaire).

À titre de comparaison, la corde de piano qui donne le *la* du diapason (440 hertz) est soumise à une tension d'environ 85 kilogrammes. D'une longueur de 42 centimètres et d'un diamètre de un millimètre, une telle corde d'acier (de densité 7,86) pèse environ 6,2 grammes par mètre. Les ondes qui la parcourent avancent à 370 mètres par seconde (1 330 kilomètres par heure) ; elles font ainsi exactement 440 aller et retour par seconde.

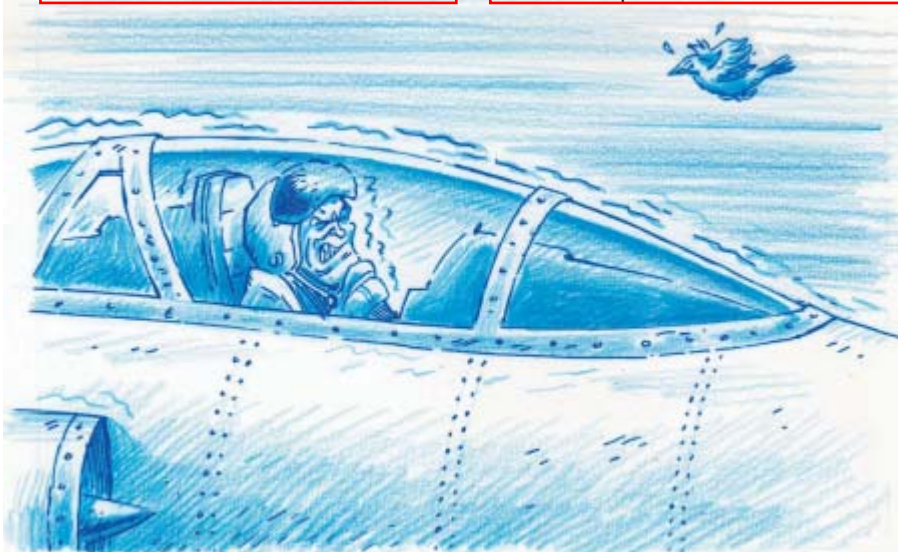
Le problème des ingénieurs de la SNCF était que les ondes transverses

qui parcourent une caténaire sont plus lentes que sur une corde à piano et deviennent comparables aux vitesses des trains les plus rapides. Une caténaire de TGV est constituée d'un câble profilé de cuivre pur d'une section de 150 millimètres carrés, soutenu par un câble porteur en bronze. Comme la densité du cuivre est de 8,9, la masse par unité de longueur d'un tel câble est de quelque 1,4 kilogramme par mètre soit environ 200 fois plus que celle de la corde à piano déjà évoquée ; il est mis sous une tension 30 fois plus forte que celle de cette corde, soit 2 600 décanewtons. La vitesse de propagation des ondes transverses le long de la caténaire est, par conséquent, seulement deux fois et demie plus faible que le long de la corde à piano. Elle vaut environ 500 kilomètres par heure.

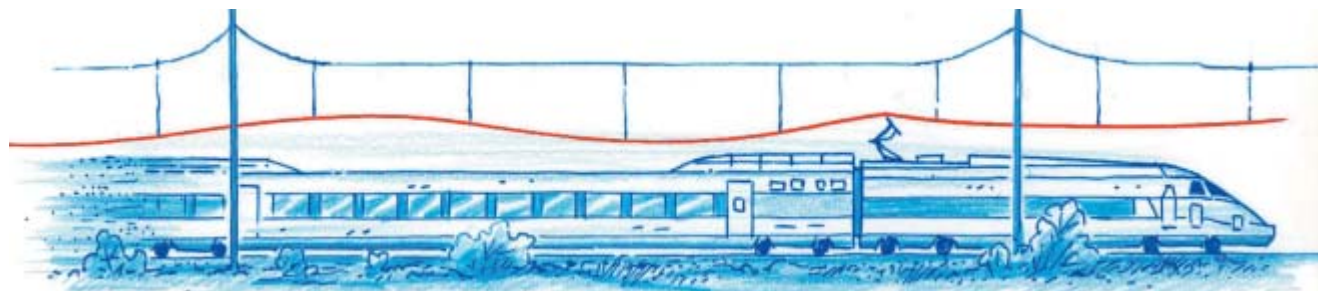
Toutefois, contrairement au marteau du piano, le pantographe ne frappe pas la caténaire, mais la soulève. Afin de créer le bon contact électrique recherché, il pousse le câble de cuivre vers le haut. Lorsque le train est à l'arrêt, le pantographe soulève le câble avec une force d'environ cinq décanewtons ; la caténaire adopte la forme d'un V renversé dont la pointe est soutenue par le pantographe. La situation est similaire lorsque le train se déplace lentement. La vitesse augmentant, le V renversé dû au pantographe se déforme et des ondulations sont transmises dans la caténaire.

L'amplitude de ces déformations augmente avec la vitesse d'autant plus que l'on s'approche de la vitesse de propagation des ondes. Le soulèvement de la caténaire atteint alors 30 à 35 centimètres par endroits : tout se passe comme si le câble se dérobait devant le pantographe. Le phénomène dégrade le captage du courant jusqu'à entraîner la disjonction des engins de traction, voire des avaries sur les installations!

Ainsi, la vitesse de propagation de ce type d'onde apparaît comme une vitesse limite. Il existe un «mur de la caténaire» analogue au mur du son. Sur une voie de TGV normale, où la vitesse



De violents mouvements agitaient la carlingue d'un avion transsonique qui dépassait le mur du son ; ce phénomène fit courir de graves dangers aux pilotes d'essais qui franchirent en premier le mur du son après la Seconde guerre mondiale. Actuellement, la conception des avions supersoniques modernes permet d'atténuer considérablement tous ces effets.



La motrice d'un TGV est alimentée en courant électrique par l'intermédiaire du pantographe, un bras articulé conçu pour soulever le câble électrique suspendu au-dessus du train (la caténaire). Après le passage du TGV, la déformation imposée par le pantographe engendre des oscillations de ce câble, d'autant plus nocives que la vitesse du TGV est proche de la vitesse de propagation des

ondes mécaniques dans la caténaire (500 kilomètres par heure) : à cette vitesse l'onde est stationnaire par rapport au train et les déformations de la caténaire détachent celle-ci du pantographe, ce qui coupe l'alimentation en électricité. La SNCF limite pour cette raison la vitesse des TGV à 70 pour cent de la vitesse de propagation, c'est-à-dire à 350 kilomètres par heure.

de propagation des ondes mécaniques est proche de 500 kilomètres par heure, un bon captage de l'électricité n'est possible que si le TGV ne dépasse pas 470 kilomètres par heure. La SNCF a d'ailleurs spécifié que, lors des trajets normaux, la vitesse de ses TGV ne devait jamais excéder 70 pour cent de la vitesse de propagation des ondes le long de la caténaire. Pour franchir la barre symbolique des 500 kilomètres sur rails il faut donc augmenter la vitesse de propagation des ondes mécaniques le long de la caténaire. Pour y parvenir, les ingénieurs avaient le choix entre deux solutions : abaisser la masse par unité de longueur de la caténaire ou augmenter sa tension. La première solution imposait de changer de matériau ; moins dense que le cuivre, le cadmium aurait fait l'affaire. Cependant, le temps disponible pour préparer le record de vitesse ne suffisait pas pour concevoir, fabriquer et tester des caténaires d'un nouveau type. Aussi, les ingénieurs ont-ils choisi d'augmenter la tension de la caténaire. Après des tests de résistance des installations en place, la caténaire a été retendue sous une plus forte tension, 3 000 décanewtons. Cette précaution a porté la vitesse de propagation des ondes mécaniques à 532 kilomètres par heure sur tout le tronçon du record. Finalement, le 18 mai 1990, la rame 325 a pu atteindre la vitesse record de 515,3 kilomètres par heure. Conformément à ce qu'avaient prévu les ingénieurs, la caténaire ne se souleva pas plus de 30 centimètres.

LE MUR DES ONDES DE GRAVITÉ

Si le «mur de la caténaire» semble infranchissable, la plupart des «murs d'ondes» ne le sont pas. Bien avant le mur du son, un autre mur, moins célèbre avait été franchi, dès le début du XIX^e siècle, sur les canaux anglais : le «mur des ondes de gravité». Les ondes

de gravité sont, par exemple, les vagues sur la mer ou celles que crée un bateau sur une surface d'eau. Leur formation est un phénomène d'analyse délicate, car la vitesse de propagation de telles vagues varie avec leurs longueurs d'onde, lesquelles dépendent à leur tour de leurs conditions de création.

La situation se simplifie toutefois dans un canal peu profond car la vitesse de propagation de toutes les vagues dont la longueur d'onde est supérieure à la profondeur du canal y est constante ; elle est égale à la racine carrée du produit de la profondeur du canal par l'accélération de la pesanteur.

Dans les canaux de faible profondeur (1,2 mètre) en usage en Angleterre au XIX^e siècle pour la navigation de barges à fond plat, cette vitesse excède à peine 12 kilomètres par heure. Si le canal est étroit, les ondes en occupent toute la largeur, et le sillage en V habituellement observé à l'arrière des bateaux ne se développe pas. Les ondes prennent naissance à l'avant du bateau et forment plusieurs ondulations qui suivent la poupe de l'embarcation. Ces ondes se déplacent avec la barge, leurs crêtes restant quasi perpendiculaires au bord du canal. Elles ralentissent le bateau qui doit en permanence gravir la vague qu'il crée devant lui, contrairement au surfeur qui profite de l'énergie de la vague qu'il chevauche en la descendant continuellement.

Comme les déformations d'une caténaire, ces ondulations de la surface de l'eau augmentent en amplitude quand s'accroît la vitesse de l'embarcation. Ces oscillations commencent à se briser et à écumer quand le bateau approche de la vitesse de propagation des ondes dans le canal (12 kilomètres à l'heure). Ce phénomène dissipe de l'énergie, ce qui freine encore plus le bateau. Cet effet est toutefois beaucoup moins gênant que les oscillations de la caténaire ou que les effets aérodynamiques à l'approche du mur du son. Le bateau peut continuer à

naviguer malgré l'apparition de ces vagues turbulentes, et si l'on dispose d'un bon cheval, il est même possible de lui faire dépasser la vitesse des vagues.

Dans un savoureux texte de 1844, l'Anglais Scott Russel raconte comment le phénomène fut découvert par hasard dans le canal de Glasgow à Ardrossan. «Un cheval fougueux tirant une barge de William Houston, l'un des propriétaires du canal, prit peur et partit au galop, tirant le bateau avec lui. Il fut observé par Monsieur Houston à son grand étonnement, que les vagues pleines d'écume de la poupe qui dévastaient les rives habituellement avaient disparu ; le bateau semblait porté sur une eau bien plus lisse qui freinait beaucoup moins le bateau. Monsieur Houston eut l'intelligence de reconnaître l'intérêt de cette découverte pour la société exploitant le canal, dont il était actionnaire. Il s'occupa lui-même d'introduire sur le canal des bateaux naviguant à des vitesses pouvant atteindre neuf miles par heure, ce qui augmenta considérablement les bénéfices des propriétaires du canal».

Une fois le «mur de l'onde» passé, les vagues créées par le bateau sont désordonnées et ont une amplitude très faible. L'eau est à nouveau plate devant le bateau et la résistance à l'avancement fortement réduite.

Le grand physicien Rutherford, à qui l'on demandait s'il suivait la mode dans ses recherches en physique, avait déjà répondu : «Je crée la vague, je ne la suis pas...». Comme le batelier de William Houston.

R. LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. J.-M. COURTY est physicien, chargé de recherche au CNRS.

La caténaire, au-delà du mur Michel Barberon, L'album des records La vie du rail hors série juin 1990

James Lighthill, Waves in Fluids, Cambridge University Press, 1978.

Astronomie

L'Univers chiffonné

Jean-Pierre Luminet.
Éditions Fayard, 2001
(384 pages, 140 francs).

Jean-Pierre Luminet défend depuis plusieurs années une idée originale : l'Univers occuperait un volume plus petit que celui que nous voyons et, s'il donne l'impression de s'étendre au-delà, ce serait une pure illusion d'optique. La forme (la topologie) particulière – «chiffonnée» – de l'espace permettrait à la lumière issue d'une galaxie d'emprunter plusieurs chemins pour parvenir à nos yeux : cet effet créerait de multiples images fantômes de ce même objet qui, plus lointaines, simuleraient un espace plus grand.

D'emblée, l'ouvrage séduit. Le style est clair, précis et agréable. Les fervents de cosmologie redécouvriront avec plaisir des notions familières, et en assimileront de nouvelles avec aisance. L'auteur mêle avec bonheur les explications théoriques au développement des concepts scientifiques et des idées philosophiques. D'anecdotes savoureuses en événements historiques, on apprend toujours quelque chose en lisant Jean-Pierre Luminet. On appréciera le découpage en chapitres courts et indépendants, ainsi que les renvois dans le texte qui permettent d'accéder de façon commode à des sujets précis.

Tandis que la première partie de l'ouvrage présente et défend la thèse du «chiffonnage» de l'Univers, la seconde expose les sujets classiques de cosmologie. Si on apprécie l'analyse des questions d'actualité, on regrettera l'omission des problèmes touchant aux limites de notre physique, comme les singularités ou le problème de la causalité (lors du Big Bang,

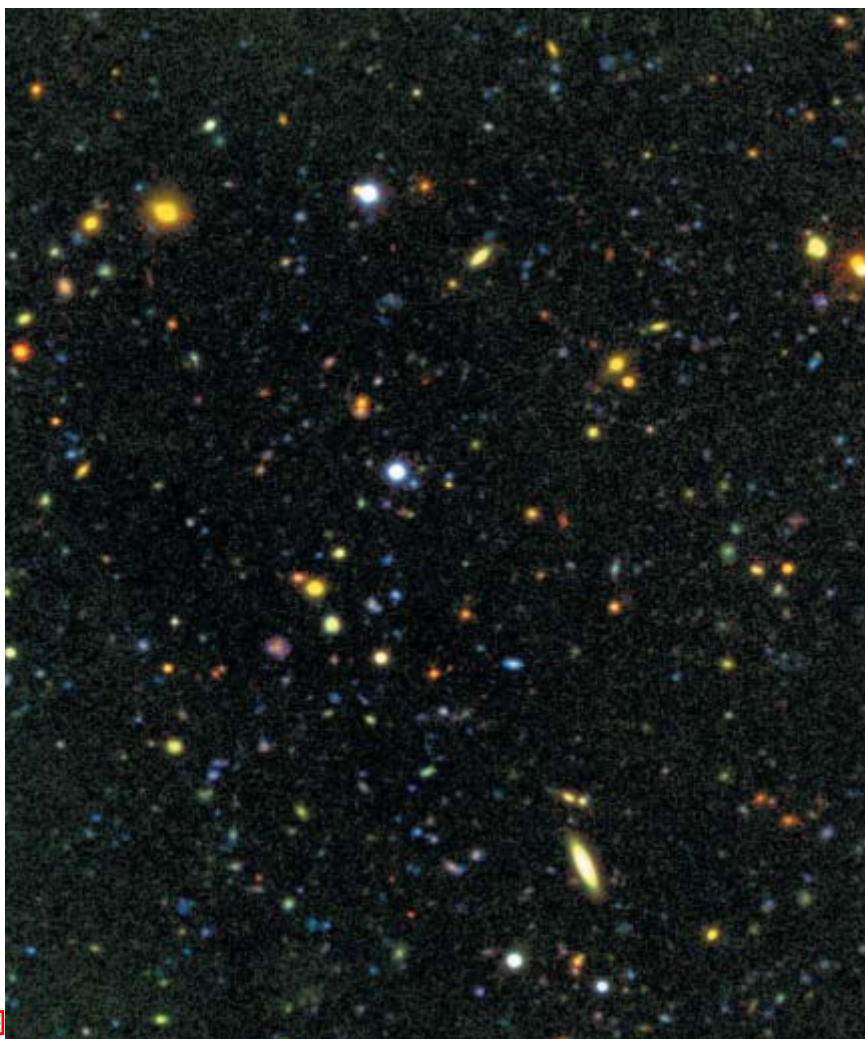
aucun signal n'a eu le temps de connecter entre eux les points de l'Univers).

La forme est plaisante, le fond, en revanche, pose des questions communes à nombre d'hypothèses cosmologiques. La réticence principale à la thèse du chiffonnage vient de ce qu'elle échappe à toute contrainte théorique ou physique, donnant en cela le sentiment d'être formulée «gratuitement». L'auteur reconnaît, en toute honnêteté, que la preuve expérimentale de son idée est fort délicate à obtenir. En vérité, il paraît difficile de séparer l'influence de la seule topologie de l'Univers des autres hypothèses sur lesquelles repose l'interprétation des données, car une observation «pure» n'existe pas en cosmologie. Par ailleurs, toute vérification est impossible dans le cas où le rayon de l'Univers réel dépasse le rayon de l'Univers visible (car alors, les images fantômes n'ont pas eu le temps de se former), ce qui limite encore la portée de l'hypothèse.

L'intérêt du modèle chiffonné est qu'il nous permettrait de concevoir que notre Univers soit fini, alors que sa courbure (déduite d'un paramètre de densité Ω égal ou légèrement inférieur à un), indiquerait qu'il serait, dans l'interprétation classique, infini (si Ω est inférieur à un, la courbure globale de l'Univers est positive et l'Univers est fermé, s'il est inférieur à un, sa courbure est négative et l'Univers est ouvert). L'auteur rappelle utilement que le concept d'infini n'est pas opérationnel en physique, et juge que son modèle d'univers chiffonné fini règle la question. Toutefois, on peut envisager sans aucune incohérence que s'il possède localement une courbure négative, notre Univers pourrait se refermer à plus grande distance, et rester ainsi fini. Dans ce cas, l'hypothèse de l'Univers chiffonné n'a plus d'utilité.

Le problème d'infini ne se présente que dans le cadre des univers homogènes et isotropes, et la critique majeure que j'adresserai à notre auteur est de se cantonner à ce cadre trop strict. Affirmer que l'Univers posséderait à toute échelle les mêmes propriétés que celles qui sont observées sur une dizaine de milliards d'années-lumière me semble infondé. En outre, imposer l'idée d'homogénéité au nom d'un «principe cosmologique» de perfection ne revient-il pas à régresser à une époque vieille de plus de trois siècles, avant que Kepler n'ose désacraliser la figure mythique du cercle ? En bref, si la topologie de l'Univers est fascinante à bien des égards, le physicien pourra légitimement estimer que ce problème ne se pose pas pour le monde réel.

Christian MAGNAN,
Groupe de recherche en astronomie-astrophysique du Languedoc



Parmi ces milliers de galaxies prises au VLT (Very Large Telescope) au Chili, les plus rouges sont (en moyenne) les plus éloignées, les plus bleues, les plus proches. Mais les sources les plus lointaines sont-elles des galaxies réellement situées à plus grande distance ou, selon la théorie de l'univers chiffonné, des images fantômes de galaxies plus rapprochées ?

Enfant et raisonnement : le développement cognitif de l'enfant

Robert Siegler. De Boeck Université, 2000 (448 pages, 240 francs).

Ce livre est la traduction française de *Children thinking*, publié en 1998. Il comporte dix chapitres et une impressionnante bibliographie (environ 1 000 entrées). L'auteur présente d'abord brièvement les questions principales qui se posent dans l'étude du développement cognitif de l'enfant : les capacités sont-elles innées ? Quels sont les stades de la progression, les mécanismes de changement ? Comment comprendre les différences entre les individus ? Comment se développent les réseaux neuronaux ? Quelle est l'influence de l'environnement social et culturel ? etc. Il aborde ensuite deux des principales théories du développement cognitif : d'une part, la théorie de Jean Piaget et d'autre part, les diverses approches du traitement de l'information.

La théorie constructiviste de Jean Piaget postule que l'enfant atteint dans un ordre invariable les stades sensori-moteur, préopératoire, ceux des opérations concrètes, puis formelles. Elle décrit « ce que l'enfant comprend du monde et ce qu'il sait y faire » à chacun de ces stades, et formalise les mécanismes qui permettent la transition d'un stade au suivant. Ainsi, grâce à l'« assimilation », l'enfant transforme les informations nouvelles auxquelles il a accès afin de les intégrer aux structures mentales (au mode de pensée) dont il dispose, tandis que, à l'inverse, l'« accommodation » lui permet d'ajuster son mode de pensée aux expériences nouvelles qu'il rencontre. Quant à l'« équilibre », synthèse des deux mécanismes précédents, elle est le véritable moteur du développement conceptuel de l'enfant. Elle le conduit à construire une représentation du monde qui « ressemble de plus en plus à la réalité » pour reprendre les termes de R. Siegler.

Les autres théories du développement cognitif que présente R. Siegler partagent un postulat fondamental : la pensée est un système de traitement de l'information. Elles mettent l'accent sur les limites de la mémoire de travail qui contraignent la mise en œuvre des mécanismes de traitement de l'information. Ainsi, dans sa théorie « néo-piagétienne », Robbie Case propose une description du développement cognitif en termes de stades



Robert Le Gall / Fotogramma Store / Images

Un enfant ne se reconnaît pas dans un miroir dans les premiers mois de sa vie. Il est d'abord attiré par les reflets, puis il reconnaît un visage, mais croit que c'est celui d'un inconnu, avant de se reconnaître vers l'âge de 18 à 24 mois.

caractérisés par les représentations mentales, et les opérations accessibles à un moment donné du développement. Il s'écarte des conceptions piagésiennes dans son explication des mécanismes de transition entre les stades.

Dans sa propre théorie « évolutionniste », R. Siegler exploite l'analogie entre l'évolution biologique et l'évolution cognitive. Il considère que la compétition entre les stratégies disponibles pour résoudre un problème est un aspect fondamental du système cognitif dont le développement s'expliquerait par la mise en œuvre conjointe de deux mécanismes : la variation et la sélection. L'ouvrage présente ces différentes théories de façon didactique et claire, et permet de se faire une idée de leurs apports, de leurs manques et de leurs complémentarités. R. Siegler montre en particulier comment, en dépit des faiblesses qu'on lui attribue, la théorie piagésienne constitue encore une référence incontournable, de par son exceptionnelle ampleur et la bonne représentation qu'elle donne, somme toute, de la façon dont les enfants pensent. Il souligne et montre, à l'aide d'exemples bien choisis, que les théories du traitement de l'information proposent, en revanche, des analyses et des modélisations plus précises, mais aussi plus locales du développement cognitif.

Les chapitres suivants traitent du développement des principales fonctions cognitives comme la perception, le langage, la mémoire, etc. L'auteur dresse un panorama clair et accessible des connaissances actuellement disponibles sur le développement, de la naissance à l'adolescence, de ces fonctions. Le chapitre consacré à la perception retient le plus l'attention, car R. Siegler y insiste – expériences à l'appui – sur la précocité et la rapidité du développement perceptif visuel et auditif. Ainsi, par exemple, les bébés

manifestent dès la naissance un réflexe d'orientation de l'attention vers un stimulus (visuel ou auditif), avant même de l'avoir identifié. Âgés de quelques jours, ils ne se bornent plus à porter leur attention sur des stimuli qui apparaissent dans leur champ de vision, mais ils recherchent activement les stimulations intéressantes. Vers trois mois, ils sont capables d'anticiper la trajectoire d'un objet en mouvement et de l'attraper. Les bébés manifestent aussi très précocement une préférence nette pour les stimuli humains comme les visages, les voix ou les mouvements : à quatre mois, ils regardent plus longtemps un arrangement de lumières perçu par les adultes comme le dessin animé d'une personne qui marche qu'un nombre équivalent de lumières qui se déplacent de façon aléatoire.

En résumé, l'ouvrage de R. Siegler constitue une bonne introduction à la psychologie cognitive du développement de l'enfant. Il est dommage que la version française de ce manuel présente quelques faiblesses : pourquoi donner les références des traductions anglaises et non les références originales des ouvrages classiques publiés pour la première fois en français, comme ceux de Piaget, pour ne citer que l'exemple le plus célèbre ? Enfin, on ne peut qu'être franchement étonné – pour ne pas dire plus – par le nombre élevé de fautes de français qui émaillent ce texte. Cet ouvrage permet d'appréhender l'essentiel des résultats et des débats à l'ordre du jour dans la psychologie cognitive du développement de l'enfant. Par ailleurs, la richesse de la documentation sur laquelle il s'appuie en fait un outil de travail précieux pour qui souhaiterait approfondir l'étude.

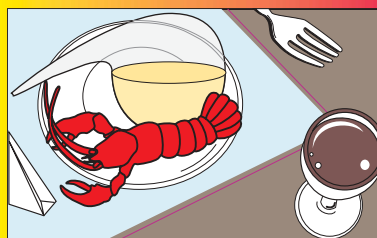
Anne-Marie MELOT, Développement et fonctionnement cognitifs, UMR6095 (CNRS - CEA), Universités de Caen et Paris 5

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 22 août 2001.



Sociologie

Chercher. Jours après jours, les aventuriers du savoir

Sous la direction de Jean-François
Sabouret et Paul Caro.
Éditions Autrement, 2000
(214 pages, 89 francs).

Qui sont aujourd'hui ces aventuriers du savoir? Ne cherchez pas des explorateurs, des découvreurs de terres inconnues et hostiles : le livre présente des chercheurs et, plus particulièrement, ceux du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), qui vient de fêter ses 60 ans. Autrement dit, nous avons ici une hagiographie de l'institution au travers de ses plus « brillants » représentants de la nouvelle génération (les 30, 40 ans), ceux qui ont emprunté la voie royale des thématiques de pointe, et dont la performance est reconnue et récompensée par la médaille de bronze du CNRS. On trouve aussi quelques noms prestigieux d'anciens, compétents, connus et quelque peu débordés par les tâches administratives, dont la lourdeur est bien connue. Le neurobiologiste Jean-Didier Vincent résume les étapes de la vie d'un chercheur : « C'est comme dans une meute de cerfs. On est d'abord un jeune mâle avant de s'affirmer, de se reproduire, puis de dominer. Alors, on vous demande votre avis dans les comités scientifiques. »

Anne Boutin (simulation moléculaire) a « l'impression que les scientifiques sont mal connus et caricaturés ». Apparaissent-ils plus proches et plus authentiques, après ces entretiens conduits par des étudiants en journalisme de Paris et de Lille? Pas vraiment : les portraits sont assez stéréotypés ; ces clones sont passionnés, connaissent des périodes de routine, de petites joies et sablent le champagne pour célébrer les exaltantes découvertes. À défaut de s'enrichir (les salaires sont modestes), ils apprécient leur liberté de pensée et d'horaires, et se réjouissent presque tous d'échapper à l'enseignement. Alors, même si l'on apprend que la simulation est une discipline aussi importante que la modélisation, si on découvre l'existence de particules (certaines hypothétiques comme le graviton), de nanostructures, de molécules, de gènes et de canaux calciques, de communications du futur ou de naines brunes, c'est une science aseptisée qui nous est livrée... et qui ne me fait pas rêver. À lire cet essai, nous sommes dans l'ère des ordinateurs et des logiciels, qui préparent et dictent les protocoles expérimentaux.

Et le terrain? La question paraît déca-
lée! Seule Sabine Trébinjac fait du ter-
rain, car elle est « ouïgourologue » et va
à la rencontre de son matériel d'étude :
une population du Xinjiang, en Chine. Un
peu d'humanité, enfin, mais troublée
par une information donnée au détour
d'une page : on apprend que les ouï-
gourologues forment une communauté
de cinq spécialistes dans le monde!

Le grand public risque de se sentir sur
une autre planète. Nos spécialistes vul-
garisent avec parcimonie : quelques appa-
ritions aux rituelles journées de « La science
en fête » (ne s'essouffent-elles pas un peu?
et pourquoi?), quelques conférences, et
stop. Il est vrai que leurs préoccupations
sont bien éloignées de celles du public, qui
veut entendre parler d'un vaccin contre le
SIDA, de la pénurie éventuelle d'eau potable,
des plantes transgéniques, du nucléaire,
des dépressions nerveuses, de l'origine de
la vie ou du rôle de la science pour le bien
de l'humanité. Ne fallait-il pas commen-
cer par répondre à ces questions?

Le livre a totalement escamoté les dif-
ficultés de nos jeunes diplômés, qui
enchaînent thèse, séjour postdoctoral (de
préférence aux États-Unis) et publica-
tions (de haut niveau) pour essayer d'in-
tégrer ce fameux CNRS ou une Université.
Que deviennent ceux qui sont juste après
les heureux sélectionnés? Les dossiers
sont souvent si bons, le parcours si impe-
ccable, que les commissions mettent des
heures à choisir.

Et puis, la recherche, c'est aussi celle
des laboratoires universitaires, dont cer-
tains survivent sans grands moyens et qui
consacrent du temps à l'enseignement :
la transmission du savoir est-elle devenue
si dépréciée qu'on désire y échapper?

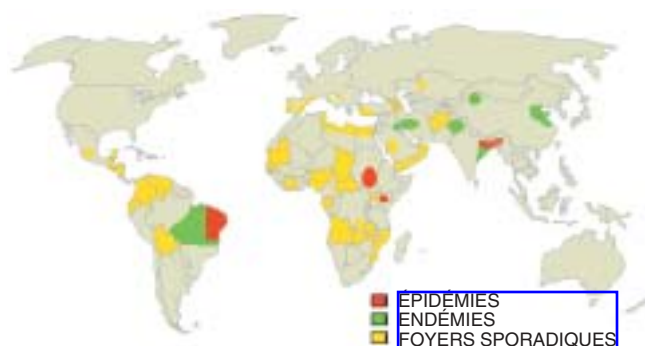
Michèle FEBVRE,
Université de Nice-Sophia Antipolis

Médecine

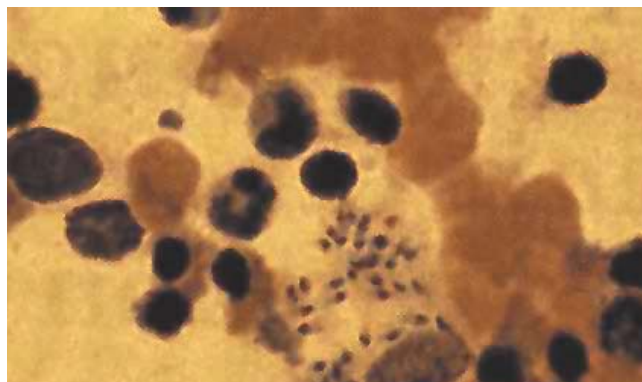
Kala-azar, chroniques indiennes d'une épidémie

Robert Desowitz. Éditions Science
Infuse, 2000 (127 pages, 80 francs).

Le titre et le palais colonial qui illustre
la jaquette de ce petit livre pour-
raient faire croire que l'exotisme est
au rendez-vous et qu'une fois
encore, on nous contera les difficultés
que rencontre l'Homme Blanc qui com-
bat généreusement les maux qui frappent
les Pays du Sud. Pourtant, cette courte
nouvelle, écrite par un épidémiologiste



Pourquoi cette recrudescence de maladies qu'on avait su enrayer, telle la leishmaniose viscérale, ou kala-azar? Cette parasitose commune à l'homme et à certains animaux, due à des protozoaires intra-



cellulaires, a des foyers de plus en plus nombreux, épidémiques (en rouge), endémiques (en vert) ou sporadiques (en jaune) comme dans le bassin méditerranéen.

reconnu, a une portée qui dépasse le cadre tropical où elle se déroule, et elle est exemplaire à plus d'un titre. Le kala-azar, littéralement le «mal noir», est une leishmaniose qui a fait ses premières victimes voici près de 200 ans.

Robert Desowitz conte, sur le rythme d'un roman policier, la longue traque qui a débusqué les causes de la maladie, puis qui a conduit à la définition de mesures de prévention et des traitements. Il ne s'agissait pas uniquement d'identifier, dans le sang des malades, les minuscules protozoaires responsables de leurs fièvres ; il fallait aussi découvrir leurs vecteurs, en l'occurrence une espèce de ces phlébotomes (des insectes de type moustique) qui, nés dans les marais, voletent, le soir venu, et infestent leurs victimes en les piquant de leurs dards. Certains mammifères, compagnons de l'homme, sont aussi infestés et servent de réservoirs aux parasites. Enfin, pour soigner les malades, le seul remède réellement efficace est un produit à base d'antimoine, coûteux.

Malgré toutes les difficultés, on est venu à bout du kala-azar dans les années 1960, au point de l'oublier. Ce qui devait arriver arriva : il a surgi de nouveau et en plus fort, alors que la mémoire des premiers combats était perdue, et que les compétences pour le reconnaître et le juguler avaient disparu. Depuis, le mal se développe et fait de nouvelles victimes, par milliers, au Bangladesh, au Népal... On ignore jusqu'où il ira.

Pourquoi cette résurgence, alors que la science a progressé et que de nombreux organismes se préoccupent de la santé du Tiers Monde ? R. Desowitz répond à cette question. Il n'accuse pas seulement l'incurie et la gabegie, plaies des pays mal décolonisés ; il critique aussi ces miroirs aux alouettes qu'ont été certains programmes proposés par des savants de prétoire. Ils ont promis monts et merveilles aux instances internationales qui les consultaient : la décou-

verte de vaccins pour demain ou après-demain, qui, à moindre coût, permettraient de combattre le fléau, par exemple. Dans le même temps, toute l'énergie – des dollars par millions – étant mobilisée dans quelques laboratoires «de haute technologie», la surveillance sur le terrain a disparu, et avec elle les compétences qu'elle mobilisait : plus de dispensaires, plus d'infirmiers et de médecins de campagne aguerris, encore moins d'épidémiologistes, d'entomologistes, de vétérinaires, d'écologistes, tous familiers du milieu naturel et aptes à combattre les maux qui s'y développent.

Le bilan est lourd, et l'histoire exemplaire. Le cas du kala-azar ressemble à d'autres malaras, et bien d'autres contagions qui menacent les populations humaines toujours plus nombreuses, donc plus sensibles au développement d'épidémies, en milieu tropical ou dans nos gigantesques métropoles. Sans oublier les épizooties, néologisme qui a fait croire que certaines maladies étaient réservées aux animaux, alors que leurs agents sont prêts à s'attaquer à notre espèce. Les foules humaines et animales, en devenant plus denses, favorisent l'éclosion des micro-organismes pathogènes, virus, bactéries... Ces prédateurs minuscules trouvent un terrain où déployer leurs armées et décimer les populations humaines, jusqu'au point où leur action s'amoindrit, quand les victimes potentielles sont raréfiées.

L'humanité est ainsi frappée, depuis la nuit des temps, par des maladies variées : la tuberculose est l'une des plus anciennes, la peste ploya la courbe démographique de notre espèce il y a quelques centaines d'années ; puis ce fut la variole. Le dernier invité, chez nous, est le SIDA ; quant à nos animaux domestiques, les manchettes des quotidiens nous ont montré les bûchers expiatoires auxquels on les condamne, quand la fièvre frappe un membre du troupeau.

Le plus navrant est de constater, à l'aube du troisième millénaire, le regain de maladies que l'on a pourtant su combattre dans le passé. La négligence et des erreurs stratégiques patentées sont responsables de ces recrudescences. Le triste constat que fait R. Desowitz est recommandé à la lecture de tous les citoyens et des responsables politiques, si occupés à mondialiser la planète qu'ils en oublient qu'elle est peuplée d'êtres vivants faits de chair et de sang.

Jean-Louis HARTENBERGER,
Institut des sciences de l'évolution
de Montpellier

Archéologie

Pour une archéologie du geste

Sophie A. de Beaune.
Éditions CNRS, 2000 (280 pages,
195 francs).

Sophie de Beaune a l'habitude de nous présenter de belles surprises scientifiques. Son analyse technologique des lampes et godets paléolithiques était l'un des ouvrages les plus originaux de ces 20 dernières années (*Lampes et godets paléolithiques*, Éditions CNRS, 1987). Il fut suivi par un autre, non moins tranchant (*Les galets utilisés au Paléolithique supérieur*, Éditions CNRS, 1997). Ces deux livres, très rigoureux et méticuleux, constituent l'aboutissement de milliers d'heures de travail.

Le présent livre est d'apparence modeste, mais il est assez bien illustré, grâce à des planches en couleurs. Dans un tel sujet, on pourrait imaginer se perdre dans une pléthore de termes techniques

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines :
01-55-42-84-05

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulenc, François Savatier, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier, Xavier Muller, René Cuillierier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Pierre Saminadin. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Floryse Grimaud, assistée de Isabelle Huet. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Roger Cayrel, Michel Feugère, Philippe Fluzin, Évelyne Host-Platret, Michel Lance, Laïla Nehmé, Christophe Pichon, Daniel Tacquenot, Pascale Thiollier-Dumartin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Griesebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté d'Irène Limon
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RESEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Illustration de Sophie de Beaune



Ces deux outils, retrouvés dans le Grand Abri de Laussel en Dordogne, ont servi à piler les fruits, il y a environ 25 000 ans. Le plus large est en calcaire, sa base aplatie est due à l'usure. Le plus fin, en grès, porte des traces d'impact et de poli.

et typologiques. En fait, malgré la complexité du sujet, les termes sont bien définis, qu'il s'agisse de gestes particuliers, de différents types d'ustensiles ou de stigmates techniques.

Sophie de Beaune est loin d'être une simple technicienne. Cette paléo-ethnologue de mérite fait partie d'une jeune génération qui a pris le relais d'André Leroi-Gourhan. Reprenant les questions du *Geste et la parole*, et équipée d'une trousse à outils issus de l'ethno-archéologie et de l'archéologie expérimentale, elle fait la lumière sur des questions importantes comme les mécanismes d'innovation technique dans l'évolution de la culture humaine.

Ce livre montre aussi une certaine libération par rapport à la méfiance de Leroi-Gourhan. Dans une archéologie moderne, l'origine d'une hypothèse n'a que peu d'importance, à condition qu'elle puisse être confrontée aux vestiges archéologiques.

On remarque aussi, chez certains des héritiers de Leroi-Gourhan, une avancée épistémologique, subtile mais importante. Ils ne recherchent pas seulement des faits purs et durs, objectifs et vus de l'extérieur, mais aussi l'expérience subjective de l'acteur préhistorique. Retrouver les gestes préhistoriques, se mettre à la place de l'homme (ou de la femme) préhistorique est devenu un objectif légitime. Mieux comprendre le rapport complexe entre la culture, l'individu et le milieu (matériel et social) nous amène à une connaissance plus profonde et plus humaine qu'autrefois.

Avec *Pour une archéologie du geste*, Sophie de Beaune nous a montré, une

fois de plus, que le champ de l'industrie lithique en préhistoire reste fertile à condition qu'on s'échappe de l'obsession des outils en silex dans les systèmes techniques paléolithiques, et que les analyses soient fondées sur des questions théoriques plus larges, en ce qui concerne l'évolution de la société et le comportement humain. Là se trouve la belle surprise de ce livre.

Les objets eux-mêmes, souvent de simples morceaux de pierre portant des stigmates d'une utilisation quelconque, ne sont pas impressionnants. Ce qui nous frappe dans ce livre, c'est la démarche scientifique et intellectuelle, qui part de ces simples cicatrices et nous amène à une meilleure compréhension de l'évolution du comportement de nos ancêtres. On se sent proche de ces ancêtres et on comprend mieux la souplesse et le dynamisme des solutions techniques qu'ils apportaient aux problèmes quotidiens matériels.

En feuilletant les publications de la préhistoire moderne, on a souvent l'impression que les archéologues ont beaucoup de connaissances, mais sur peu de choses seulement. Des analyses méticuleuses d'une catégorie d'objets ou d'une autre, se déroulent parfois sans qu'aucune question soit posée au-delà des objets eux-mêmes. Ceux qui pensent, dans notre discipline aussi bien qu'en dehors, qu'il n'y a rien de nouveau dans l'étude des cailloux, vont trouver un livre où non seulement les objets sont inhabituels, mais les idées aussi.

Randall WHITE,
Département d'anthropologie
de l'Université de New York