

POUR LA
SCIENCE

Janvier 1997

édition française de
SCIENTIFIC

STALACTITES ET CLIMATS

**LES REQUINS ET L'ORIGINE
DE L'IMMUNITÉ DES VERTÉBRÉS**

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

**MÉCANIQUE QUANTIQUE
ET VISION OBSCURE**

L'IMMUNITÉ DES INVERTÉBRÉS

LA DYSLEXIE

**LES GROTTES ORNÉES
D'AFRIQUE DU SUD**

SCIENTIFIC

LES CLIMATS SUR MARS

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

Jeu-concours

Casse-tête de chef de gare
par Pierre Tougne

Point de vue

Évaluer, c'est choisir
par Philippe Lazar

Les inattendus de la science

Les inattendus de la double hélice
par Jean Rossier

Science et gastronomie

Éloge de la graisse



Présence de l'histoire

Le dépistage de la syphilis
par Ilana Löwy

Perspectives scientifiques :

Cyanobactéries et riziculture

Le fer à cheval

Couronnes de feuilles

De Fermat à abc

Le blé, polluant marin

La desmine

Pasteur dans un plan

Nutrition et CFA

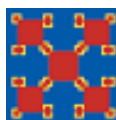
Explosion d'octobre

Lune glacée



L'expérience du mois

Le pinceau du peintre
par François Perego



Visions mathématiques

Le Monopoly revisité
par Ian Stewart



Logique et calcul

Obsession de π
par Jean-Paul Delahaye



Analyses de livres

– *Pierre Curie*, par Marie Curie
– *Dieu de l'Univers, Science et foi*, par Jean-Marie Pelt

– *Voyage dans le Système solaire*, par Serge Brunier

– *Calendriers et chronologie*, par J.-P. Parisot et F. Suagher

Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes

par Paul Dubois
et Bertrand Grellet

Dans les grottes, les variations du climat et les séismes se traduisent par des modifications de structure des concrétions, identifiables et datables.



Les changements climatiques sur Mars

par Jeffrey Kargel
et Robert Strom

Mars, planète aujourd'hui sèche et gelée, aurait autrefois été couverte de rivières, d'océans et de glaciers. A-t-elle abrité la vie?



Le système immunitaire des invertébrés

par Gregory Beck
et Gail Habicht

Le système immunitaire de l'homme et celui des autres mammifères ont évolué pendant plusieurs centaines de millions d'années pour acquérir leur complexité.



Les requins et l'origine de l'immunité des vertébrés

par Gary Litman

Les requins, qui existent depuis plus de 450 millions d'années, nous renseignent sur l'évolution du système immunitaire.



Les véhicules électriques

58

par Daniel Sperling

L'énergie des véhicules électriques

64

par Cord-Henrich Dustmann

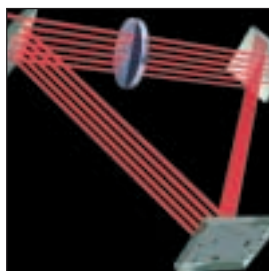
Les véhicules électriques sont aujourd'hui aussi performants que les véhicules à essence. Les consommateurs les adopteront-ils?

**Voir sans regarder**

68

par Paul Kwiat,
Harald Weinfurter
et Anton Zeilinger

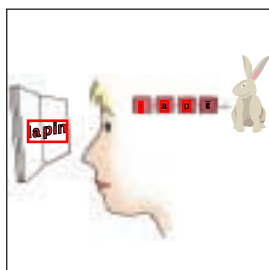
L'optique quantique détecte des objets sans interagir avec eux, même par de la lumière.

**La dyslexie**

76

par Sally Shaywitz

Cette difficulté de lecture semble résulter d'une défaillance du système de traitement du langage plutôt que d'une anomalie visuelle.

**L'art rupestre d'Afrique australe**

84

par Anne Solomon

Des peintures et des gravures réalisées par les ancêtres des tribus san retracent l'histoire et la culture d'une société vieille de plusieurs millénaires.

**Le temps au cours du temps**

La France est riche en grottes, sanctuaires préservés de l'érosion. La récente découverte des peintures de la grotte Chauvet, datées de quelque 30 000 ans, livre un message culturel : les peintres des cavernes maîtrisaient un art naturaliste plus ancien et plus précis qu'on ne le croyait. Intérêt confirmé par les peintures des grottes d'Afrique du Sud (voir *L'art rupestre d'Afrique australe*, page 84).

Les grottes recèlent d'autres informations. Stalagmites et stalactites ont longtemps été ces curiosités fragiles que les touristes admiraient lors de leurs pérégrinations touristico-culturelles estivales dans les grottes du Sud de la France «pour voir les beautés de la Nature». L'œil du géologue, aidé par les datations fondées sur la radioactivité, a enrichi le point de vue. Les concrétions calcaires sont des témoins du passé, du temps qu'il faisait au cours du temps passé (voir *Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes*, par Paul Dubois et Bertrand Grellet, page 28). La reconstitution des climats anciens enregistrés par les concrétions contribuera, avec les témoignages délivrés par les carottes glaciaires, à distinguer des fluctuations naturelles les effets de l'homme sur le climat.

Le calcul des décimales de π , est une gymnastique pratiquée par les mathématiciens et les informaticiens. Les chiffres de π fascinent : leur répartition est statistiquement régulière, il y a autant de 2 que de 3 en moyenne, et pourtant ils sont parfaitement déterminés par le calcul du rapport du périmètre du cercle par son diamètre. Les plus fins mathématiciens étaient persuadés que le calcul des chiffres de π devait procéder selon leur ordre d'apparition. Il n'en est rien : on peut déterminer ces chiffres sans connaître les précédents. Malheureusement dans le système binaire... Mais les travaux progressent, et les calculateurs pourront, grâce à des séries perfectionnées par l'intuition et l'aide informatique, les extraire en base 10. Comme l'affirme Jean-Paul Delahaye (voir *Obsession de π* , page 104), les facilités apportées par l'ordinateur ne rendent pas idiots ses praticiens.

Philippe BOULANGER

Le mot juste

Cette historiette toute simple a de quoi faire méditer les amateurs de logique. Elle est racontée par Paul Gauthier (*The Mathematical Intelligencer*, vol. 18, n° 1, 1996).

Sa fille aînée rentre un jour de l'école en déclarant : «Il y a une nouvelle fille dans la classe, qui ne comprend pas un mot de français.» Après un moment de réflexion, la cadette demande : «Quel mot?»

Léotardement

Critiquant un projet de loi, M. François Léotard vient de demander au gouvernement de renoncer à une loi «qui se retournera éventuellement, et probablement certainement, contre ceux qui la promulguent» (*Le Monde*, 18 octobre 1996). Loin de moi l'idée de reprocher à M. Léotard quelque inélégance de style. Ancien ministre des Armées, il est dans son rôle lorsqu'il emploie du matériel lourd : armement, surarmement, bombardement et tout le tremblement. Derrière l'accumulation d'adverbes en -ment, sachons plutôt apprécier la subtilité. M. Léotard n'a pas dit «probablement» ; il a dit «proba-

blement certainement». «Ces deux adverbes joints font admirablement!», disait Philaminte. F. Léotard témoigne d'une puissance de pensée qui force l'enthousiasme. Jamais je n'avais songé à la nuance entre le probable et le probablement certain. De beaux sujets d'études en perspective pour la théorie des probabilités.

Peut-être y a-t-il moyen de renchérir encore sur la subtilité. Oui, si j'avais la chance de rencontrer M. Léotard, je n'hésiterais pas, je lui demanderais : «Doit-on opérer une distinction, Monsieur le Ministre, – si oui, laquelle? – entre un événement certainement probable, et un événement probablement certain?»

La clef des mensonges

Le Monde des poches du 5 octobre 1996 se fâche contre un éditeur coupable d'avoir réédité un livre en prétendant que l'auteur est un moine italien du XVI^e siècle, alors qu'en réalité c'est un compilateur actuel. Celui-ci a déjà protesté contre une première édition le déposant du fruit de son travail. Le procédé de l'éditeur paraît en effet déplaisant, mais un détail change tout : le livre en question est un *Dictionnaire du mensonge* (éditions

Allia, 1996). Les gens qui se complaisent à ce genre de lecture n'ont que ce qu'ils méritent, n'est-ce pas, s'ils achètent l'ouvrage sans se rendre compte que le nom de l'auteur est un exemple de ce qu'ils recherchent. L'autoréférence est un paradoxe, pas une faute contre la morale.

Le Monde des poches affirme que le livre est «drôle et remarquable». Je l'ai acheté : il m'a tellement ennuyé, que c'est tout juste si j'ai pu en lire deux ou trois pages. Y a-t-il un second menteur quelque part?

Et un demi en terrasse

Quoique élémentaire, l'opération de division par 2 se prête à des extensions remarquables, et qui lui sont propres. Par exemple, on peut diviser un échec par 2 : on obtient un demi-échec ; mais diviser un échec par 3 ou par 4 ne se conçoit pas. Quant au tiers monde, il n'est pas n'est pas les deux tiers du demi-monde.

Le demi-échec, nous dit le *Grand Robert*, est un «échec presque total». *Robert* ajoute une remarque : «ce mot est un quasi-synonyme de demi-succès, mais les connotations sont inverses». Tiens ! Deux synonymes qui veulent dire le contraire l'un de l'autre ? C'est étrange, mais soit : les phénomènes de langue sont subtils. Ne nous laissons pas rebuter, et allons voir à demi-succès : «succès incertain, peu satisfaisant». Là, notre étonnement se mue en désaccord. Si les termes «demi-échec» et «demi-succès» avaient des connotations inverses, ils ne pourraient pas l'un et l'autre désigner une expérience déplaisante à vivre. Or le premier signifie «échec presque total» et le second, «succès peu satisfaisant». Conclusion : *Robert* s'est trompé en effectuant sa division par 2.

Continuons alors par nos propres moyens. Deux demi-succès sont parfois équivalents à un échec ; deux demi-échecs, à un succès. Multiplions par deux, faisons tout passer du même côté et – fidèles à l'enseignement de notre maître à tous, le savant Cosinus – écrivons au bout : égale zéro. Tous calculs faits, nous trouvons : succès égale échec.

Rien de nouveau, direz-vous : depuis longtemps les moralistes ont disserté sur la part d'échec inhérente à tout succès. Vrai, mais n'en déduisez pas que le calcul ci-dessus soit inutile. Asseoir sur des bases mathématiques solides un résultat empirique est toujours un grand progrès.

Ma Thématique, selon C.- P. Bruter

Où doit-on postuler pour obtenir la prime spéciale offerte aux champions en matière de prétention ? J'espère y avoir droit. Vu les risques insensés pris par certains qui, visiblement, aspirent aussi à recevoir la prime, je subodore qu'elle est d'un montant substantiel.

Comprendre les mathématiques. Si cette promesse mirifique était le titre d'un ouvrage proposé, par un marchand sans scrupules, aux parents désarmés devant les exercices que leurs enfants doivent faire à l'école, on dirait : il s'agit de commerce, tous les titres sont bons pourvu qu'ils fassent vendre. Tel n'est pas le cas. L'ouvrage est d'assez haut niveau, et son auteur mathématicien professionnel (Claude-Paul Bruter, *Comprendre les mathématiques*, éditions Odile Jacob, 1996). Les mathématiciens – Bruter comme les autres – sont payés pour savoir qu'une vie entière d'efforts permet de comprendre «des» mathématiques, mais que personne jamais ne comprend «les» mathématiques, infiniment vastes. Avec un titre pareil, Bruter peut espérer flamber auprès des gogos. Ses collègues, il risque surtout de les indisposer. Croyait-il échapper à leur regard sourcilieux ?

Toutefois, encore incertain, semble-t-il, de décrocher la prime à la prétention, Bruter en rajoute, avec ce sous-titre : «Les 10 notions fondamentales». Comme il est géomètre, il ne propose au lecteur que des notions issues de la géométrie. Du coup, il fait plus qu'indisposer ses chers collègues : il sombre dans le ridicule. Parce qu'un mathématicien qui prétend décrire «les» 10 notions fondamentales des mathématiques, et qui ne songe même pas à y faire figurer la notion de nombre, est ridicule !

Le plus haïssable des «moi» n'est pas celui qui ose dire «je». Bruter aurait-il sous-titré son livre «Mes 10 notions préférées», il n'y avait rien à objecter. Le pire des «moi», le plus prétentieux, est celui qui, sans dire «je», tente de donner valeur absolue et universelle à ce qui n'est qu'un goût personnel.

Faïlles en géologie

La sixième édition de la *Carte géologique de la France au millionième* présente sous forme graphique une synthèse de données géologiques, géochimiques et géophysiques dont Maurice Mattauer a fait une analyse critique, le plus souvent pertinente, en soulignant les qualités et les faiblesses inhérentes à ce type d'ouvrage (voir *Pour la Science*, octobre 1996). Mais au cours de cet exercice, l'auteur accuse les auteurs de carte de s'être «laissés influencer par un concept déjà dépassé» et d'avoir «imaginé et dessiné des failles qui n'existent pas». L'accusation met en cause non seulement les auteurs de la carte, mais aussi leur employeur éditeur de la carte, et finalement le «Comité de la Carte», groupe d'experts qui valide le projet avant publication. Je souhaite corriger cette mise en cause de la compétence des professionnels de la cartographie géologique qui ont, avec tous les contrôles nécessaires, réalisé un état de l'art en matière de cartographie géologique de la France.

Ces failles dites de détachement existent-elles ? Il n'y a aucun doute. Les plus importantes d'entre elles ont été reconnues simultanément et indépendamment par des analystes différents. Elles se traduisent sur le terrain par l'existence de zones de mylonites (roches extrêmement déformées) dont l'analyse cinématique indique leur nature de failles normales. Elles juxtaposent des sédiments déposés pendant le fonctionnement de la faille et des roches métamorphiques remontées le long de la faille, de plus de 20 kilomètres de profondeur. La géochronologie isotopique montre que la remontée des roches profondes est contemporaine du dépôt des sédiments. D'autres arguments venant de la pétrologie métamorphique, de la sédimentologie ou du paléomagnétisme ne font que renforcer les précédents. Tout ceci est publié dans plus d'une vingtaine d'articles dans des revues nationales et internationales, a été constaté sur le terrain par plus d'une centaine de géologues français et étrangers, et discuté dans plusieurs réunions scientifiques en France et à l'étranger.

Si l'existence même de ces failles n'est plus contestable, leur interprétation reste encore, il est vrai, matière à discussion. L'extension des chaînes de montagnes est sans doute la découverte la plus importante faite en géodynamique dans les années 1980. Ses conséquences sont énormes quant aux changements qu'elle implique depuis l'analyse de terrain jusqu'à la modélisation mécanique de la lithosphère. Dans presque toutes les chaînes

de montagnes du monde, les géologues ont identifié ces failles de détachement, et la chaîne hercynienne française n'y a pas échappé. Dans la mesure où cette découverte invoque des processus nouveaux remettant évidemment en cause les interprétations et modèles antérieurs, certains chercheurs la contestent, comme par exemple lorsque que M. Mattauer écrit : «On a multiplié les failles normales dites de détachement dans la croûte ductile en adoptant l'hypothèse fautive qu'il existe de nombreuses failles normales dues à l'écoulement sous leur propre poids des reliefs des chaînes et notamment de la Chaîne hercynienne». Si les auteurs de la carte ont reporté le fait (les failles), ils n'ont en aucune façon invoqué de théorie (l'extension/écoulement des chaînes de montagnes). La relation de causalité que dénonce M. Mattauer n'est certainement pas reprochable aux auteurs de la carte.

Jean-Pierre BRUN, Rennes

Réponse de Maurice Mattauer

La réaction de J.-P. Brun nous permet d'engager une discussion générale sur le rôle des géologues dans les Sciences de la Terre. Depuis une dizaine d'années, la géologie n'a pas échappé au courant de pensée qui privilégie systématiquement les modèles et la théorie, en s'écartant de plus en plus de la réalité. En schématisant à peine, les géologues sont aujourd'hui tiraillés entre deux tendances : ceux, qui s'étant adaptés à la «science moderne», considèrent que la théorie crée le fait ; ceux qui considèrent que c'est avec des faits que l'on élabore des théories.

Les faits, dans notre débat, sont, pour l'essentiel, le résultat d'observations géologiques faites sur le «terrain». La vérité se trouve donc sur le terrain. Pour la rétablir, allons dans la région de Saint-Étienne et servons-nous du tronçon de carte publié dans mon analyse. C'est là que se trouverait, pour les partisans du modèle extensif défendu par J.-P. Brun, l'exemple type d'une «faille de détachement» au contact entre le Carbonifère et les micaschistes. Cette faille a été clairement figurée sur la carte de France, avec son symbolisme de faille de détachement, sur 50 kilomètres de long.

Cette faille normale, ou de détachement, n'existe pas : on observe en réalité une faille de décrochement verticale, à rejet dextre, le long de laquelle s'est produit un grand coulisage (prouvé par des stries subhorizontales) qui a déplacé le compartiment Sud vers le Sud-Ouest. Ce décrochement traverse le quartier Sud de la ville de Saint-Étienne, passe sous le bâtiment de Géomécanique de l'Institut universitaire de

technologie de Saint-Étienne, et se prolonge dans le talus d'une route, à 500 mètres au Nord du pont de Saint Romain en Gier.

Les deux types de failles dont nous discutons (faille de détachement et de décrochement) ont une signification mécanique différente. Ne pas les distinguer reviendrait, pour un zoologiste, à confondre un sanglier avec une girafe. Le «détachement» qui borderait le bassin de Saint-Étienne au Sud-Est est donc un pur produit de l'imagination, créé pour la beauté du modèle, et repris en toute bonne foi par les concepteurs de la carte, qui ont fait confiance au contenu d'une publication «internationale».

De la même façon, il n'existe pas de «détachement» majeur d'âge Stéphanien, lié à une extension Nord-Sud dans la zone axiale de la Montagne Noire. En ce qui concerne le Massif central, on sait depuis le siècle dernier que les bassins stéphanien sont liés à des décrochements et qu'ils ont souvent été fortement comprimés.

Enfin, sur un plan général, je m'étonne que J.-P. Brun célèbre encore une mode simpliste et naïve qui se lésarde. Ignore-t-il donc que la faille de «détachement» la plus connue au monde, qui passe au Nord de l'Everest, 8 846 mètres dans l'Himalaya, et qui se suit sur plus de 1 000 kilomètres, s'est formée pendant la compression due à l'avancée de l'Inde ? Elle n'a rien à voir avec l'extension comme cela a été montré, grâce à l'action combinée d'une modélisation physique d'A. Chemenda et d'études sur le terrain.

Avec certains problèmes géologiques complexes, il ne faut pas hésiter à innover en lançant de nouvelles idées, mais une tendance intellectualiste a pris le pouvoir en géologie. On a d'abord décidé de ne plus publier, dans les grandes revues, les trop longues observations de terrain qui sont à la base de toutes les interprétations et de privilégier systématiquement les considérations théoriques «modernes». La géologie de terrain est ainsi devenue une activité obsolète non rentable, car il faut souvent plusieurs années pour étudier et cartographier une région. Quelle différence avec la publication d'une simple idée seulement discutée sur le plan théorique ! Parfois, il est vrai, on remplace le terrain par des résultats fournis par la modélisation expérimentale analogique, mais sans se rendre compte que les expériences ne sont pas «physiquement» à l'échelle et qu'elles ne peuvent donc pas être utilisées sans un retour critique sur le terrain.

À la suite de cette évolution, nous sommes dans une situation catastrophique. Les étudiants sont formés avec le même esprit qui privilégie de façon tout à fait excessive les concepts, le théorique, le virtuel, en insinuant perfidement

que l'observation est dépassée ; et on commence au lycée. Si nous continuons, nos étudiants ne manqueront pas d'avoir des débouchés... virtuels, alors qu'apparaît un immense besoin de géologues capables de se «débrouiller» sur tous les terrains, d'observer, de sélectionner les observations significatives, de les dessiner et de les présenter au non-spécialiste en utilisant un langage compréhensible. Alors qu'une multitude de travaux sont entrepris en France et dans le monde, les grands organismes et les entreprises ont beaucoup de difficultés à trouver des géologues capables de se lancer dans des réalisations concrètes.

Rappelons, pour conclure, une pensée de Fontenelle, vieille de trois siècles : «Assurons-nous bien du fait avant que de nous inquiéter de la cause. Il est vrai que cette méthode est bien lente pour la plupart des gens, qui courent naturellement à la cause et passent par-dessus la vérité du fait ; mais enfin nous éviterons le ridicule d'avoir trouvé la cause de ce qui n'est point.»

Modèles

L'objectif d'un modèle (voir *Les modèles en biologie et en médecine*, par Daniel Schwartz, *Pour La Science*, septembre 1996) est-il d'expliquer un phénomène ou simplement de le décrire ? La courbe de la distribution des poids de nouveau-nés est proche de la courbe de la loi «normale», que suit une variable régie par de petites causes indépendantes dont les effets s'additionnent. D. Schwartz conclut : «Ne peut-on supposer que ce poids se constitue... par addition de multiples effets indépendants ?», mais il ne met pas en garde contre le danger de ce retournement. De la même façon, constatant que la distribution de durées de vie s'ajuste à la courbe normale en fonction du logarithme de la différence entre la durée de vie et une valeur limite L , l'auteur écrit : «Les individus recevraient à la naissance un capital de L années, auquel les aléas de la vie opéreraient un retrait distribué de manière log-normale. [...] Le modèle fait penser que «ce qui compte» dans le vieillissement, c'est, non le nombre total d'années, mais la diminution du temps restant, et cela en pourcentage, puisqu'il s'agit de son logarithme. [...] Une année d'âge compterait beaucoup plus pour un sujet âgé que pour un sujet jeune (pour le vieillissement).» L'auteur ne précise pas quel était son objectif lorsqu'il a ajusté la répartition des durées de vie, mais la démarche de recherche aurait été tout autre pour étudier le phénomène de vieillissement.

La question est celle de la nature du modèle comme antécédent ou conséquent. L'auteur nous précise : «Le modèle nous a conduits bien loin. Nous n'ignorons pas son côté hypothétique, mais, du fait qu'il décrit bien les données, tout se passe comme s'il avait une certaine réalité». Ce raccourci méthodologique est bien hasardeux ! Le lecteur se trouve dans la position de celui qui disposerait d'un modèle théorique «en soi», mais dont le rôle explicatif n'est pas acquis.

Le modèle pose la question du mode de connaissance qui nous le livre. Sa formation requiert, à partir des données de l'expérience, un mécanisme d'abstraction. La saisie de principes ou de relations abstraites appelle soit une formalisation dont le critère de validité est une cohérence logique et mathématique, soit une ou des applications concrètes, en particulier chez le vivant. Dans les deux cas, il existe au départ un effort d'abstraction et une aspiration à l'universel tout en restant relatif aux données du problème. Cependant, il ne faudrait pas opposer les deux démarches. Il existe dans la communauté scientifique une hiérarchisation tacite des modèles, avec le modèle mathématique au sommet. Dans cette démarche de conjonction entre les mathématiques et la biologie, il faut rappeler les conditions de validité et le degré d'universalité du «modèle», ainsi que la distance établie entre le modèle et la réalité.

E. GRENIER, O. PERRU, C. ROUZAUD
DANIS-BONVALET, O. SCHEURER, Beauvais

Daniel Schwartz explique la progression vers la mort en considérant une fonction logarithme du nombre d'années qui sépare l'individu d'un âge limite. De ce point de vue, ce qui compte dans le vieillissement c'est la diminution du temps restant encore à vivre : une année d'âge compte plus pour un sujet d'âge mûr que pour un individu jeune. Ce raisonnement reste valable à l'approche de l'âge limite quel que soit celui-ci.

On peut aussi exprimer l'évolution du temps en fonction des âges de la vie en calculant la part que représente une année dans une vie, pour chaque âge : c'est l'inverse de l'âge. Pour un enfant d'un an, une année de vie représente 1, alors que pour un enfant de 10 ans elle compte pour 0,1. La représentation que nous avons d'une année décroît rapidement avec l'âge au début de la vie et atteint une valeur limite proche de zéro. La représentation que nous nous faisons d'une année change peu entre 40 et 70 ans par exemple.

Nous obtenons l'inverse de ce qui a été exprimé précédemment : une année d'âge compte bien moins pour un sujet d'âge mûr

que pour un individu jeune. Vers 18 ans, l'homme a vécu presque la moitié de sa vie psychologique, la durée de 0 à 18 ans étant égale à la durée de 18 à 70 ans (en vieillissement psychologique). Cela exprime peut-être le fait que notre enfance et notre adolescence sont remplies des rêves les plus intenses que nous ne revivrons jamais plus !

J.F. GUÉGAN et S. MORAND, Perpignan

Réponse de Daniel Schwartz

Je me contente en effet de poser la question de la distribution des poids des nouveau-nés : se constituerait-il par une simple addition d'effets, alors que la cholestérolémie se constituerait par addition d'effets proportionnels aux valeurs existantes ? Et si oui, pourquoi ? L'explication pour les salaires est bien démonstrative. J'ajoute que la distribution log-normale des salaires, si constamment vérifiée par Gibrat dans de nombreuses populations, me conduit à penser qu'on est fondé, dans beaucoup de problèmes, à utiliser le logarithme du salaire. C'est ce que je traduis par «ce qui compte, c'est le logarithme» et, pour passer à l'exemple de la mort, c'est ce que j'entends par «ce qui compte pourrait bien être le logarithme de $(L-D)$ », mais je mets cette phrase au conditionnel.

J.F. Guégan et S. Morand exposent une contradiction dont j'étais bien conscient. Quand je suggère qu'une année d'âge compterait plus pour un sujet âgé que pour un sujet jeune, je sais bien que pour la perception du temps qui s'écoule, c'est l'inverse qui a lieu. C'est pourquoi j'ai précisé «compterait plus pour le vieillissement». Cet antagonisme entre vieillissement physiologique et perception du temps qui passe est frappant.

Pour la cicatrisation des blessures, Lecomte de Nouy a évoqué un temps physiologique, qui serait le logarithme du temps. Cette formule se rapproche de celle de J.F. Guégan et S. Morand, puisque alors le temps écoulé compte plus pour une durée courte que pour une longue, mais elle en est différente.

J'insiste sur le fait que mon modèle est de toute manière simpliste et n'a pas plus d'importance qu'une image hypothétique destinée à susciter des discussions. Il semble que j'aie réussi.

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 : 101641.3525@compuserve.com. Indiquez *Tribune des lecteurs* dans la rubrique objet.

France Culture et Pour la Science

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

**les
Inattendus
de la
Science**

**Samedi 11 janvier
à 15h**

Les surprises du gène

avec Pierre Douzou
professeur au
Muséum National
d'Histoire Naturelle
membre de l'Académie
des Sciences

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

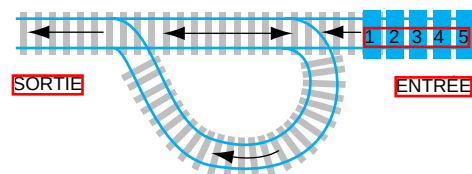


**Palais de la découverte
SCIENCE**

JEU-CONCOURS N°31

CASSE-TÊTE DE CHEF DE GARE

Un chef de gare dispose sur une voie de garage de cinq locomotives numérotées de 1 à 5 dans cet ordre. Cette voie de garage conduit à un échangeur montré sur la figure ci-contre dans lequel sur la voie principale, on peut se déplacer dans les deux sens et y stationner. En revanche, sur la bretelle du dessous, on ne peut stationner et l'on ne se déplace que dans le sens de la flèche. Par exemple, s'il doit former un train des cinq locomotives dans l'ordre 23154, le chef de gare entrera d'abord 1 et 2 sur la voie principale, sortira 2 par la droite puis rentrera 3 qu'il ressortira par la droite puis 1 à droite (ou à gauche), enfin il entrera 4 et 5 et sortira 5 à droite puis 4. Il pourrait y avoir ainsi $5! = 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120$ trains différents. Cependant tous ne sont pas possibles et le chef de gare en connaît même le nombre : 30 sont impossibles. Pourriez-vous l'aider à trouver ces 30

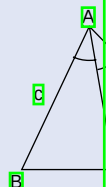


impossibilités ? Afin que la liste tienne sur une carte postale, je vous suggère une notation compacte comme par exemple 3(124)5 qui symbolise les six permutations possibles de 1, 2, 4 entre 3 et 5 (cet exemple n'est pas une solution!).

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

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°29

Dans le triangle ABC , tel que $\hat{A} = 2\hat{C}$, on trace la bissectrice AI de l'angle $\hat{A}$ (voir la figure). Les triangles ABC et IBA sont semblables, donc $AB/IB = BC/AB = AC/IA$. De plus, le triangle AIC est isocèle, donc $IA = IC$. De ces relations, on déduit que $IB = c^2/a^2$, $IC = bc/a$ (avec $a = BC$, $b = AC$, $c = AB$) et l'égalité $a = IB + IC$ nous conduit à l'équation (1) $a^2 = c(b + c)$. On aurait pu utiliser les relations trigonométriques du triangle pour parvenir à cette équation, relations utiles pour démontrer la réciproque. Cette équation doit être résolue en nombres entiers avec la condition que a, b, c soient les côtés d'un triangle, c'est-à-dire $|b - c| < a < b + c$ (les triangles dégénérés étant exclus) qui conduit aux inégalités $c < a < 2c$. D'autre part, b et c sont premiers entre eux : d'après l'équation (1) s'ils avaient un facteur commun, a



serait divisible par celui-ci et le triangle ne serait pas primitif. De plus, le produit de c par $b + c$ (premiers entre eux) étant un carré, c et $b + c$ sont eux-mêmes des carrés soit respectivement m^2 et n^2 . En remplaçant dans l'équation (a), on a les solutions : $a = mn$, $b = n^2 - m^2$, $c = m^2$ avec m, n premiers entre eux et $1 < m < n < 2n$. Il est dès lors très facile de trouver les solutions en a, b, c inférieur à 20, soit (6, 5, 4), (12, 7, 9), (15, 16, 9) et (20, 9, 16).

M. Stambul me signale que si (a, b, c) est un triangle primitif, alors $(3a + b + 2c, 2a + 3c, 2a + b + c)$ en est un autre. Enfin M. Masurel et M. Lévy ont généralisé le problème pour $\hat{A} = k\hat{C}$. Ainsi pour $k = 3$, l'équation diophantienne à résoudre est $b^2c = (a^2 - c^2)(a - c)$ dont une solution est $a = n(m^2 - n^2)$, $b = m(m^2 - 2n^2)$, $c = n^3$ avec m, n premiers entre eux et $n\sqrt{2} < m < 2n$.

Évaluer, c'est choisir

PHILIPPE LAZAR

Gouverner, c'est choisir, disait Pierre Mendès-France : la transposition de ce précepte à l'évaluation scientifique indique que les évaluateurs cherchent moins une photographie « objective » de la compétence d'un homme, d'une équipe ou d'un laboratoire qu'un élément utile en vue d'un processus décisionnel.

Toute une série de conséquences résultent de ce principe fondateur. La première – qui règle la question : « Faut-il évaluer les évaluateurs ? » – est que l'existence même d'un processus évaluatif engage pleinement la responsabilité de l'institution qui le commande. Cette institution doit avoir une vision claire de ses objectifs stratégiques pour définir des règles auxquelles ses chercheurs doivent se conformer. Encore doit-elle prendre garde à ne pas céder aux tentations de la mode – qui existe évidemment dans les sciences comme ailleurs – et qu'elle sache prendre acte de l'imprévisibilité essentielle du devenir à long terme de la connaissance scientifique... Bref, qu'elle sache fixer des objectifs qui ne soient pas abusivement spécifiques et, par là même, arbitraires. Il y va de sa crédibilité.

Ainsi peut-on se demander s'il est vraiment raisonnable que des instances gouvernementales définissent elles-mêmes les orientations scientifiques majeures des institutions de recherche ou d'un pays, et les constituent en priorités. Reconnaître que l'on ne peut tout faire et qu'il est donc indispensable de définir des choix n'implique pas en soi – on l'oublie presque toujours ! – que ces choix soient systématiquement d'ordre thématique : ils pourraient tout aussi bien, et sans doute beaucoup plus valablement, être fondés sur des principes d'originalité et de qualité scientifique intrinsèque des projets. Et les règles d'évaluation adoptées devraient évidemment découler directement de cette remarque...

L'Union européenne détient une sorte de record négatif en la matière. Elle se croit obligée de définir minutieusement, ligne à ligne, plusieurs années à l'avance, les recherches qu'elle entend financer

dans ses futurs programmes-cadres... Cependant le décalage entre le moment où ces programmes sont officiellement arrêtés et celui où l'argent arrive effectivement dans les laboratoires suffit à donner à cet exercice un caractère de jeu gratuit (si l'on peut dire), qui n'accroît guère la légitimité de l'institution.

Par ailleurs, il est tout à fait irréaliste d'imaginer des procédures d'évaluation scientifique qui feraient abstraction des hommes : une institution vit, se développe, évolue au travers de l'action quotidienne des individus qui en font partie. Évaluer, c'est-à-dire se mettre en situation de modeler le devenir d'une institution, impose d'établir les règles du jeu correspondantes dans la plus grande transparence et, tout autant, d'associer fondamentalement les acteurs concernés aux procédures mises en œuvre. C'est la seule manière d'éviter que le « système » en place ne secrète immédiatement toute une série de parades permettant de « résister » à ce qui serait alors vécu comme une tentative abusive de déstabilisation. Une évaluation doit être, par nature, un élément de dynamisation institutionnelle, et ne doit pas être perçue comme une procédure d'ordre administratif, intrinsèquement entachée d'arbitraire. Ainsi les évaluations purement « hiérarchiques » ont-elles tout lieu d'être la source de multiples biais et d'être inopérantes vis-à-vis des objectifs poursuivis.

UNE LIBERTÉ LIBERTAIRE OU LIBÉRALE ?

La pensée scientifique se développe par une déstabilisation permanente des savoirs acquis, rétro-contrôlée par la décantation collective que constituent les processus de communication et de jugement au sein du monde scientifique (publications, colloques, rencontres informelles, etc.). Toute véritable découverte, dit fort justement François Jacob, laisse la communauté scientifique un temps incrédule, voire réservée ou hostile, avant de s'imposer comme un nouveau pas en avant et d'entraîner l'adhésion un moment refusée. La difficulté essentielle, dans les

procédures d'évaluation, est d'accepter ce que les canonnières, pendant la Première Guerre mondiale, nommaient le « temps mort de manœuvre » ! Sa méconnaissance peut conduire à la contre-sélection des pistes les plus fructueuses.

S'il faut se méfier des capacités de jugement instantané des scientifiques, on ne peut pas non plus se passer d'eux et les frustrer du temps qui leur est nécessaire pour porter des jugements sereins. En d'autres termes, gardons-nous comme de la peste des évaluations à l'emporte-pièce qui, à un moment donné, risquent de mobiliser de façon abusive les forces disponibles dans les secteurs qui semblent immédiatement « rentables », au détriment de choix plus souples, faisant confiance à l'originalité et au non-conformisme ! Sachons également garder nos distances vis-à-vis des « grands programmes », certes utiles en termes de « développement » (au sens qu'a ce mot dans l'expression « recherche et développement »), mais qui peuvent aussi renvoyer naïvement et tristement à l'aphorisme du sacrifice de la poule aux œufs d'or si on cherche à les étendre abusivement à des champs exploratoires auxquels ils ne sont pas adaptés.

On parle souvent de la liberté de la recherche, et ceux qui en parlent en ayant le pouvoir d'en gérer les moyens matériels le font fréquemment en prenant leurs distances par rapport à elle. Ils ont quelque tendance à se la représenter comme d'ordre « libertaire », alors qu'elle est à l'évidence, aujourd'hui, de nature « libérale ». L'équivalent du « marché » est simple : il s'agit de l'accès, particulièrement difficile et disputé, chacun le sait, aux grandes revues scientifiques internationales. Ne « survivent » à moyen terme – même si l'on ne donne pas à cette expression le sens presque physique que lui confère la dominance Nord-américaine au travers du trop célèbre *publish or perish* – que les laboratoires ou individus qui réussissent à s'imposer dans cette âpre compétition.

C'est, à mon sens, bien suffisant – et même, par certains aspects, trop limitant – pour qu'on n'en « rajoute » pas, comme par plaisir, par rapport à cette contrainte déjà très lourde. Il est sage d'aborder avec prudence et modestie le jeu dangereux de l'orientation du devenir à long terme de la science.

Philippe LAZAR a été le directeur général de l'INSERM de 1982 à 1996. Il est l'auteur de deux essais : *Les explorateurs de la santé* (éditions Odile Jacob) et *L'éthique biomédicale en question* (éditions Liana Lévi).

Les inattendus de la double hélice

JEAN ROSSIER

Nul ne pouvait prévoir, ni l'extraordinaire pouvoir explicatif de la découverte de l'ADN, ni l'étendue de ses applications théoriques et pratiques.

Francis Crick et James Watson ont précisé, en 1953, la structure de l'ADN : le prix Nobel de médecine et de physiologie a couronné leurs travaux en 1962, un délai normal entre la publication et l'attribution du prix.

Il n'y a pas d'article en biologie moderne plus important que celui de l'ADN : son immense impact est un premier inattendu. Dans leur plus folle mégalomanie, et même si la modestie n'était pas leur qualité première, J. Watson et F. Crick n'imaginaient pas l'impact et les prolongements de leur découverte en biologie.

On peut imaginer les mathématiques actuelles sans démonstration du théorème de Fermat. On peut penser que la physique continue à se développer sans que les quatre forces (l'électromagnétisme, la gravitation, les interactions faibles et fortes) soient unifiées en une seule et même loi. On peut étudier les propriétés des étoiles sans connaître les détails du Big Bang, mais on ne peut pas imaginer la biologie actuelle sans l'ADN. Toute la biologie est fondée sur le processus qui transforme les informations du génome en protéines, les éléments des organes qui nous constituent.

LA MIRACULEUSE STRUCTURE DE L'ADN

La structure de la double hélice est merveilleusement adaptée à la reproduction de l'information qu'elle renferme. Ses deux brins s'enroulent l'un autour de l'autre, et si l'on tire un brin d'un côté et l'autre brin de l'autre, en ouvrant la double hélice comme une fermeture éclair, on obtient deux brins, et ces deux brins sont copiés dans l'organisme pour donner deux fois deux brins ; ce processus se répète des milliards de fois.

Les deux brins d'ADN sont constitués de bases empiilées : l'adénine (A), la thymine (T), la cytosine (C) et la guanine (G). Ces bases sont appariées dans

les deux brins complémentaires : en face d'une adénine (A) d'un brin est associée une thymine (T) de l'autre brin, en face d'une guanine (G) se trouve une cytosine (C). Cette complémentarité explique la bonne duplication de la double hélice.

Autour du mécanisme de copiage, un grand nombre de systèmes s'assurent que la copie est «conforme», et qu'elle conserve intacte l'information.

LE CHEMINEMENT VERS LA DÉCOUVERTE

Le véhicule transmettant l'information était baptisé gène, mais les biologistes ignoraient sa structure. Ils savaient, depuis Mendel, que certains caractères passaient d'une génération à l'autre, que si les parents avaient les yeux bleus, les enfants avaient une meilleure chance d'avoir les yeux bleus. Au début des années 1920, les biologistes pensaient que ces gènes étaient des protéines, qui, par recopie de leurs formes, induisaient des protéines filles ressemblantes.

Dans les années 1940, une idée apparaissait : les acides désoxyribonucléiques (en abrégé, ADN) constituent l'échafaudage portant les gènes. Un microbiologiste américain, Avery, qui travaille à l'Université Rockefeller, observe que lorsque l'on injecte à des souris un pneumocoque (la bactérie qui provoque une pneumonie), celui-ci tue toutes les souris ainsi infectées. Quand il injecte un autre type de pneumocoque, bénin, les souris sont un peu malades, mais ne meurent pas. Quand il tue par chauffage le pneumocoque virulent et le réinjecte à des souris, elles ne sont pas affectées. Le pneumocoque virulent est bien détruit par la chaleur.

Dans un second temps, Avery mélange les pneumocoques bénins vivants aux pneumocoques toxiques tués. À sa grande surprise, le mélange est dangereux. Quel facteur est-il passé du pneumocoque virulent au pneumocoque

bénin ? Après de multiples purifications chimiques, Avery conclut que l'acide désoxyribonucléique, est le responsable : l'ADN passe d'un pneumocoque à l'autre. C'est la première démonstration, en 1944, que l'ADN contient une information qui, transférée, rend dangereux le pneumocoque bénin.

Les travaux d'Avery n'ont pas un très grand retentissement, d'abord parce qu'il n'y croit pas tellement lui-même et de plus, parce que, dans sa préparation d'ADN, il subsiste des protéines qui peuvent, pense-t-on, transférer l'infection.

Quelques dix ans plus tard, un groupe, dirigé par deux physiciens, Max Delbruck et Salvador Luria, étudie ce qu'on appelle le phage. Le phage est un virus, et comme tout virus, incapable de se développer tout seul : il doit, pour vivre et se reproduire, infecter une cellule hôte, une bactérie par exemple. Les bactéries infectées par les phages meurent et les phages se reproduisent. La question est posée : où réside l'information qui permet au virus de se reproduire et de tuer une bactérie ? Est-ce la coque du virus (formée de protéines) ou est-ce cet acide désoxyribonucléique, situé à l'intérieur du virus, dans la capsule ? En utilisant des produits marqués, les biologistes suivent l'ADN à la trace et montrent, en 1952, que l'acide désoxyribonucléique est responsable de la transformation des bactéries. On est alors sûr que, comme le pressentait Avery, c'est l'ADN qui porte l'information.

Dès lors, le monde biologique traque le support de l'information génétique. À Cambridge, le physicien Lawrence Bragg, au Laboratoire Cavendish, pense à utiliser la cristallographie pour avoir la structure à trois dimensions des molécules biologiques. Dans ce laboratoire de physiciens, travaille un jeune Anglais, arrogant, brillant, buveur, parleur, coureur : Francis Crick. Lawrence Bragg, exaspéré par ce comportement, pense que F. Crick parle trop, et songe à s'en débarrasser. À 36 ans, il aurait dû avoir fini sa thèse depuis plusieurs années.

F. Crick s'intéresse plus aux protéines qu'à l'ADN. Dans ce laboratoire, Max Perutz et John Kendrew ont été les premiers à déterminer la structure tridimensionnelle de deux protéines vitales, l'hémoglobine et la myoglobine. L'hémoglobine, la protéine de nos globules rouges et la myoglobine, celle qui constitue nos fibres musculaires. F. Crick travaille avec M. Perutz sur la structure de l'hémoglobine, mais ce n'est pas un expérimentateur assidu, et il préfère discuter. Dans ce microcosme, arrive James Watson, jeune postdoc américain envoyé par Delbruck et Luria, ambitieux, excentrique, et plus mauvais expérimentateur que F. Crick, si c'est possible. À Cambridge,

il se persuade de l'importance biologique du transfert de l'information génétique et se lie d'amitié avec F. Crick. J. Watson a toujours besoin de discuter et F. Crick, de parler. Les premières images aux rayons X de l'ADN ont été faites par Rosalind Franklin et Maurice Wilkins, à Londres. Nos deux bravados se les procurent, cherchent à les interpréter, et pensent que ce doit être une hélice. Durant deux ans, ils s'évertuent à en imaginer la structure.

L'hélice est une structure biologique connue, en particulier par Linus Pauling, car elle s'accommode des liaisons faibles qui sont la règle en biologie. De nombreuses protéines ont cette structure. Il est étonnant que Pauling n'ait pas découvert la structure de l'ADN. Les raisons sont, pour une part politiques. Pauling ne peut communiquer avec la communauté biologique européenne parce qu'il est cloîtré aux États-Unis : en plein maccarthysme, Linus Pauling, contre la guerre froide et la course aux armements, subit les foudres du FBI, et son passeport lui est confisqué.

On pense alors que l'ADN est une sorte de polymère, analogue au nylon, avec les bases A, T, C, G, qui se répètent de façon monotone, sans qu'information spécifique à l'individu soit contenue dans la répétition. J. Watson et F. Crick cherchent «à tâtons» la bonne structure et réussissent : ils placent les deux hélices l'une en face de l'autre, avec, au contraire de Pauling, les phosphates à l'extérieur (les phosphates, chargés, peuvent interagir avec l'eau, avec les sels, ce qui neutralise leur répulsion) et les bases, qui elles ne sont pas chargées, sont appariées, A en face de T et C en face de G. Après de multiples discussions dans les bars de Cambridge et des essais avec des boîtes de cornflakes et des fils de fer, nos comparses sont certains, à juste titre, d'avoir la bonne configuration.

Les travaux de Chargaff ont aussi inspiré nos deux héros. Chargaff, chimiste sérieux (pléonasme) avait remarqué que le rapport AT/CG, donc l'ensemble A + T divisé par l'ensemble C + G, était varié suivant les espèces, mais que les concentrations en adénine et en thymine, comme celles de cytosine et de guanine, étaient toujours égales. Le modèle de J. Watson et F. Crick explique ces proportions.

J. Watson décrit alors, par lettre, à Delbruck et Luria, ce qu'il a découvert en une nuit et proclame à ses conquêtes féminines : «Je vais avoir le prix Nobel.» L'article sur la structure de l'ADN est écrit et envoyé à *Nature* en avril 1953, avec un article de M. Wilkins expliquant les structures, et un de R. Franklin qui décrit les images aux rayons X. Il est inattendu, de publier un article sans une seule



Francis Crick, à gauche, et James Watson sourient d'aise devant leur montage de l'ADN.

expérience, les seules expériences étant prises dans les deux articles qui suivent... J. Watson n'en est pas à une incongruité près.

Le grand mérite de J. Watson et F. Crick est d'avoir dissocié la molécule d'ADN portant l'information, des molécules produits de l'information, les protéines. Cette idée d'une dissociation de la nature des molécules portant et produisant l'information avait déjà été émise, en 1942, par un autre physicien, Schrödinger. On trouve ici un autre inattendu : ce ne sont pas toujours les biologistes qui font les découvertes en biologie, ce sont souvent des scientifiques d'une autre discipline qui apportent de nouvelles idées. Les biologistes n'ont pas toujours un recul suffisant pour découvrir le fondement des choses. Cette découverte montre aussi l'importance des techniques physiques pour étudier le vivant. Le siècle prochain sera certainement le siècle de la biologie, et les biologistes continueront à tirer profit des approches physiques.

LA CRÉATION DE L'ADN

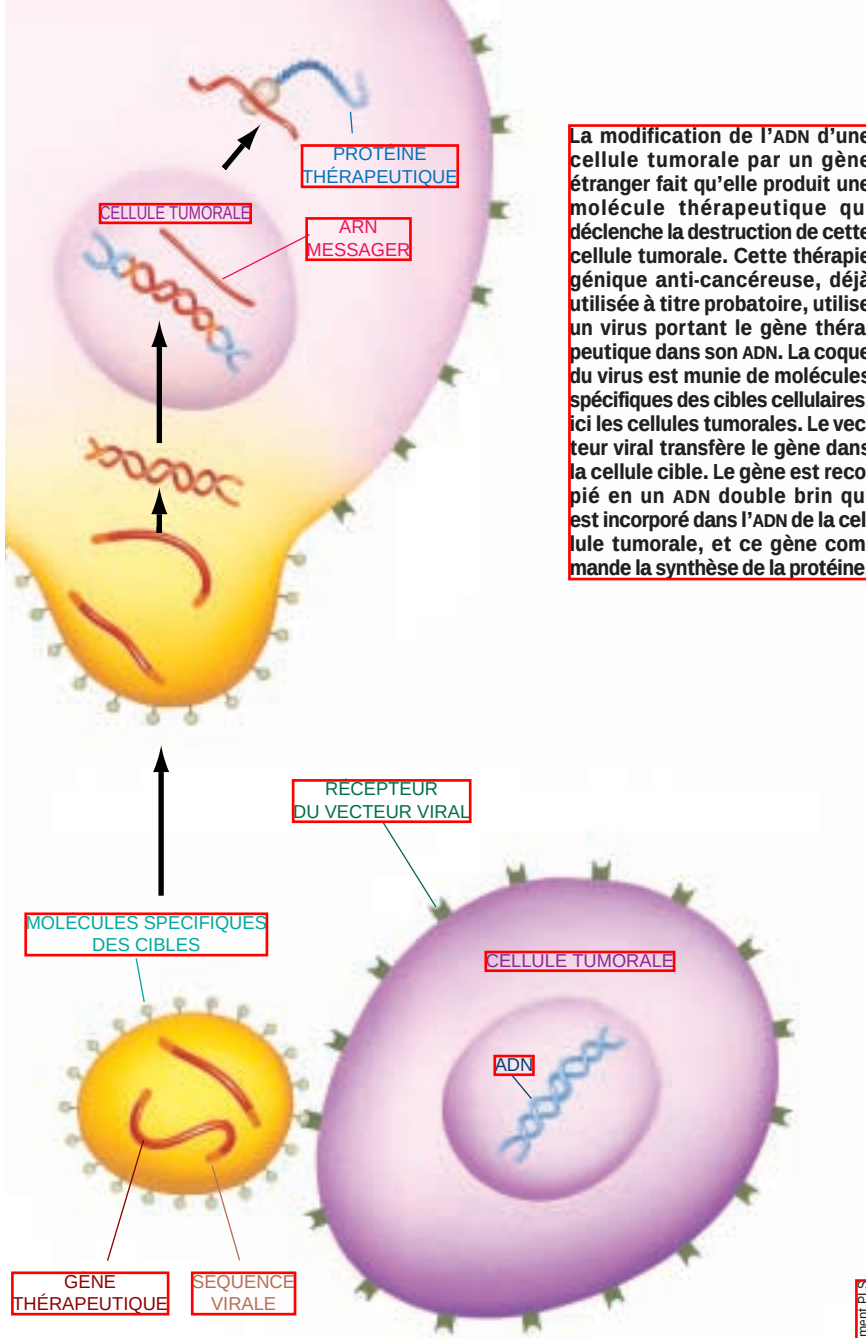
Le mystère de la vie n'en reste pas moins entier. Connaissant la première molécule d'ADN, il serait possible d'imaginer tout l'ensemble de la vie ; le problème est de savoir comment est apparue cette molécule. La Terre s'est constituée il y a quatre milliards et demi d'années : elle est alors trop chaude pour permettre la vie. Elle se refroidit et, il y a trois milliards et demi d'années, apparaît la vie. Au départ, pense-t-on, il y a des protéines, des acides ribonucléiques qui se sont associés pour élaborer la première molécule d'ADN. Comme celle-ci peut se recopier auto-

matiquement et sans erreurs, la vie peut évoluer. Sans la molécule d'ADN, il n'y a pas d'évolution possible, pas de vie. L'astrophysicien Fred Hoyle et F. Crick prétendent, faute d'un mécanisme de génération endogène, que l'ADN est issu d'une autre planète, voire d'un autre Système solaire. La question reste ouverte, et elle est importante.

Après F. Crick et J. Watson, F. Jacob, J. Monod et A. Lwoff, à l'Institut Pasteur, élucident, vers 1960, le «grand passage» de l'information génique au produit du gène. L'ADN utilise, pour transmettre son information, l'ARN messager, et la traduction de cet ARN messager donne les protéines. Pour cette découverte, le prix Nobel leur est décerné en 1965. C'est un grand moment pour la France qui est dans une situation scientifique désastreuse : entre les deux guerres, la recherche a été étouffée par le conventionnalisme.

LES PROLONGEMENTS INATTENDUS

F. Crick et J. Watson ont pressenti l'apport de la découverte de l'ADN au mécanisme de l'évolution darwinienne. Il était clair que le produit de l'information, les protéines, ne pouvait modifier le support de l'information, le génome. Cette vision lamarckienne dévoyée, le lissenkisme stalinien contre lequel s'est courageusement battu Jacques Monod n'a été éradiquée que grâce aux apports de la biologie moléculaire. Ce n'est pas la fonction qui crée l'organe, c'est la sélection d'un petit avantage qui est apparu avec de nouveaux gènes où une, deux ou trois bases ont été changées.



La modification de l'ADN d'une cellule tumorale par un gène étranger fait qu'elle produit une molécule thérapeutique qui déclenche la destruction de cette cellule tumorale. Cette thérapie génique anti-cancéreuse, déjà utilisée à titre probatoire, utilise un virus portant le gène thérapeutique dans son ADN. La coque du virus est munie de molécules spécifiques des cibles cellulaires, ici les cellules tumorales. Le vecteur viral transfère le gène dans la cellule cible. Le gène est récopié en un ADN double brin qui est incorporé dans l'ADN de la cellule tumorale, et ce gène commande la synthèse de la protéine.

Un avantage minime a des répercussions notables, une population de bactéries double sa population toutes les 20 minutes. Si une bactérie mutante se divise en moyenne toutes les 19 minutes 59 secondes, l'avantage est une seconde sur 20 minutes, ce qui ne semble pas beaucoup, mais cette bactérie va devenir prépondérante et l'autre va disparaître. L'inattendu est que des différences minimes l'emportent vite.

Pour cette raison, la découverte de l'ADN est la plus grande découverte de ce siècle. Elle explique à la fois le recopiage parfait de l'information et le brassage génétique : notre appartenance à une espèce est identifiable et nous sommes tous différents.

L'étonnant est que plus qu'un constat explicatif, la connaissance permet l'action : qui aurait pensé, en 1953, que la découverte de la structure de l'ADN et la

lecture du génome permettraient aux biologistes d'écrire la vie ? On sait fabriquer des animaux transgéniques, modifier le soja, on sait, par la mécano-génétique, transformer le génome pour, par exemple, faire fabriquer des médicaments à des animaux. On pourrait, dans une certaine mesure, modifier l'espèce.

BIOLOGISTES PYGMALIONS

Des espèces disparaissent par les processus de sélection naturelle, d'autres se créent. Les disparitions sont-elles une menace pour l'équilibre du monde vivant ? Si l'homme fait disparaître des espèces, il est aussi capable de créer autant d'espèces qu'il veut. La domestication des animaux et l'agriculture ont fait évoluer les espèces vivantes. Darwin avait noté qu'on pouvait sélectionner des animaux

pour choisir ceux qui se reproduisaient mieux que les autres, et cela l'avait troublé. C'est grâce à l'enseignement de cette sélection pratiquée depuis toujours, que Darwin a précisé sa théorie de la sélection naturelle des espèces.

L'homme saura-t-il maîtriser la technique qu'il apporte ? Oui. L'homme est assez malin pour résister à des tentations ridicules. Dans les années 1970, peu de temps après la découverte de ces enzymes qui permettent de manipuler l'ADN, les scientifiques se sont inquiétés : allait-on créer des bactéries résistantes à tout et qui détruiraient l'humanité ? Pendant trois ans, les expériences de génie génétique n'ont porté que sur la préparation de souches de bactéries qui, en dehors des conditions particulières de laboratoire, étaient incapables de pousser ailleurs. Les conditions de sécurité ont été contrôlées par les scientifiques eux-mêmes, qui ne voulaient exposer, ni eux-mêmes, ni leur semblables, à des risques inutiles résultant d'un effet inattendu.

Le but de la recherche, c'est la quête de l'inattendu, mais le dangereux doit être maîtrisé et l'intolérable aboli. On ne doit ainsi pas transformer les cellules germinales humaines qui modifieraient les générations futures. Nous avons bien sûr des maladies génétiques que nous pouvons transmettre à nos enfants, et nous espérons corriger ces maladies par une thérapie, mais la loi naturelle nous interdit de toucher aux cellules germinales et, partant, de modifier l'espèce humaine. D'autant que, paradoxalement, certaines mutations, qui paraissent défavorables, se révèlent bénéfiques. La malaria tue parce que le plasmodium pénètre dans les globules rouges, dévore l'hémoglobine et se reproduit. Les individus qui ont une forme d'hémoglobine mutée, qu'on appelle l'hémoglobine falciforme, ne sont pas atteints car le plasmodium est incapable de consommer leur hémoglobine : aussi, une légère anémie protège de la malaria. Garder ce qu'on peut appeler une tare héréditaire protège la population de la malaria.

Il est ainsi encore très difficile de séparer le bon grain de l'ivraie génétique, mais que de chemins parcourus !

Jean ROSSIER est professeur de biologie à l'École Supérieure de Physique et Chimie de Paris et Directeur de recherches au CNRS. Ce texte est une transcription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 8 janvier 1997, à 9h05.

Éloge de la graisse

Bien que décriée, elle s'impose en cuisine.

On crie haro sur la graisse, on l'accuse de boucher les artères, on ne supporte plus les rondeurs qu'on lui impute et, en conséquence, on la chasse de nos casseroles. Pourtant la graisse est l'alliée indispensable du cuisinier ; examinons pourquoi.

Dans les fritures, tout d'abord, les températures atteintes, 200 degrés ou plus, confèrent leur croustillant aux frites ou aux beignets... L'eau ne supportant pas ces températures sans bouillir, la surface des pièces frites est séchée, sans que l'eau de l'intérieur des aliments ait le temps de diffuser vers l'extérieur ; la croûte formée bloque la migration de l'eau interne, limitant ainsi la perte ultérieure du croustillant. Ne pourrait-on éviter le bain d'huile en plaçant les pièces à frire dans un four fortement chauffé ? Le résultat serait différent : des chimistes de Bristol et de Nantes ont démontré que les graisses participent aux réactions dites de Maillard, entre les sucres et les acides aminés ; les produits formés sont différents en présence ou en l'absence de matière grasse, et le bon goût des parties brunies, en surface des aliments frits, est précisément imputable aux graisses. Ainsi se justifie la pratique qui consiste à barder des cailles que l'on rôtit.

Restons au rôissage : ce serait une erreur d'arroser la viande avec le jus aqueux qui a coulé dans la lèchefrite : l'eau qui fait l'essentiel du jus amolirait le croustillant (nous l'avons vu, celui-ci est de la peau dont l'eau a été évaporée), ce qui serait contraire au but visé. Conclusion : la graisse s'impose encore (l'idéal est la lèchefrite décanter, qui permet de récupérer la graisse fondue, en éliminant l'eau).

DU RÔTI À L'ÉMULSION

Huile ou beurre, la graisse est également inévitable dans toutes les émulsions : mayonnaise, béarnaise, hollandaise, beurre blanc ou autres sauces formées d'un fond monté au beurre

ou à la crème. Ces émulsions ne sont presque que

matière grasse : la « liaison » résulte de l'en-tassement de gouttelettes de matière grasse dans de l'eau ; c'est seulement quand les gouttelettes sont suffisamment serrées les unes contre les autres qu'elles n'ont plus la place de bouger, et que la sauce s'écoule difficilement. Pourrait-on, néanmoins, augmenter la proportion d'eau,

au détriment de la proportion de graisse ? On peut employer un batteur électrique plutôt qu'une fourchette, afin de diviser la matière grasse en gouttelettes plus petites, donc plus nombreuses, mais le gain est limité. On peut aussi utiliser des subterfuges, tels que l'emploi d'épaississants ou de gélifiants, mais on repro-

duit difficilement le comportement d'écoulement d'une émulsion à l'aide d'une suspension (de grains d'amidon gonflés, par exemple) ou d'une solution concentrée (quand on dissout dans l'eau des hydrocolloïdes).

molécules qui s'entourent de nombreuses molécules d'eau.

LA SÉPARATION DES ARÔMES

A partir d'une observation, transformons finalement un petit mal en un grand bien. Pourquoi le beurre prend-il les mauvaises odeurs, au réfrigérateur ? Parce que de nombreuses molécules aromatiques sont solubles dans les graisses. Les parfumeurs utilisent cette solubilité, afin d'extraire les parfums des fleurs les plus fragiles : ils laissent reposer les fleurs

fraîchement cueillies sur de la graisse neutre, pendant quelques heures ; puis ils jettent les fleurs, et fondent la graisse, afin d'y récupérer les molécules aromatiques qui s'y sont dissoutes : c'est le procédé d'enfleurage. Dans un réfrigérateur, le beurre fait office de matière grasse d'enfleurage, tout comme le chocolat, composé de beurre de cacao, ou comme la crème.

Cette propriété pourrait être plus systématiquement employée en cuisine. Enveloppons les fromages dans des plantes aromatiques, par exemple, afin que les principes aromatiques se dissolvent lentement dans la matière grasse du fromage. Ou bien reprenons le principe de cette fameuse recette de beurre à la sauge, préconisée en Italie pour accompagner des pâtes : quand on fait cuire des feuilles de sauge dans du beurre, la chaleur fait éclater les cellules de sauge, qui libèrent leurs molécules aromatiques, lesquelles se dissolvent dans le beurre fondu.

Comme toutes les molécules aromatiques ne sont pas solubles dans les graisses, existe-t-il un moyen de faire le meilleur usage des produits aromatiques de la cuisine ? Je vous propose de reprendre le principe de l'ampoule à décanter, utilisée par les chimistes pour séparer des mélanges. Dans une ampoule à décanter, plaçons de l'huile et de l'eau, puis un aliment aromatique, tels des morceaux de cèpes. En agitant l'ampoule, les molécules aromatiques hydrophobes se dissolvent dans l'huile, tandis que les molécules aromatiques hydrophiles se dissolvent dans l'eau. On crée ainsi deux goûts à partir d'un seul, puisque les molécules aromatiques sont différentes dans les deux solvants. Et si nous n'avons pas d'ampoule à décanter, utilisons simplement un bocal qui ferme hermétiquement : nous y mettrons, de même, huile et eau, et quand les molécules aromatiques auront été dissoutes, nous verserons lentement la phase supérieure huileuse dans un autre récipient, en conservant au fond la solution aqueuse.

Que faire de ces solutions parfumées ? Si vous avez préparé de l'eau parfumée aux cèpes en utilisant du blanc d'œuf en guise d'eau, vous pourrez y ajouter l'huile parfumée aux cèpes en la fouettant : les protéines de l'œuf seront alors les molécules tensioactives, qui vous procureront... une mayonnaise aux cèpes.

Hervé THIS

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

Le dépistage de la syphilis

ILANA LOWY

Déclarées syphilitiques par un test présumé fiable, de nombreuses personnes saines ont été traitées inutilement par le mercure ou l'arsenic.

Enfin, le corps médical disposait d'un test de dépistage de la syphilis... fiable. La propagation de la maladie allait être enrayée grâce aux traitements disponibles dans les années 1930 : des dérivés – toxiques – du mercure et de l'arsenic. Le test a été pratiqué à grande échelle sur la population générale. On a alors constaté que le test de Wassermann n'avait pas la fiabilité escomptée : une proportion notable de la population qui n'était pas infectée a subi inutilement un traitement toxique.

Le 10 mai 1906, le bactériologiste allemand August von Wassermann publie un article décrivant un test sanguin qui permet de diagnostiquer la syphilis. Depuis les années 1890, les bactériologistes sont persuadés qu'au cours d'une infection microbienne, des anticorps spécifiques dirigés contre l'agent infectieux apparaissent dans le sang. Wassermann et ses collègues tentent de mettre en évidence des anticorps dirigés contre la bactérie *Treponema pallidum* dans le sang des malades (ces anticorps sont détectés par une réaction mise au point par Jules Bordet en 1901, à l'Institut Pasteur, de sorte que le test de dépistage de la syphilis se nomme, en France, test de Bordet-Wassermann). Toutefois, les tréponèmes étant très difficiles à cultiver, Wassermann utilise, à leur place, un extrait de tissu d'un animal syphilitique, supposé riche en bactéries. Les premiers résultats sont encourageants : tandis que le sérum de certains malades réagit en présence d'un extrait de tissu d'animal syphilitique, celui d'individus sains ne réagit pas.

Les résultats du groupe de Wassermann sont confirmés dans les années 1906-1908 par d'autres équipes. Toutefois, certains chercheurs font une expérience trou-

plante : ayant mélangé du sang de patients à des extraits de tissu d'un animal syphilitique, mais aussi à des extraits de tissu d'un animal non infecté, ils observent que le sang des malades atteints de syphilis réagit aussi à l'extrait de tissu sain !

Les biologistes ne comprennent pas pourquoi les extraits de tissus normaux sont aussi efficaces que ceux de tissus syphilitiques, mais ils décident d'utiliser, pour les tests, les tissus les plus faciles à obtenir : les tissus sains. Ainsi ce test



Convaincus de la spécificité du test de Wassermann, les services de santé ont encouragé, dans les années 1930, le dépistage systématique de la syphilis pour éradiquer cette maladie, que l'on qualifiait encore d'«héréditaire».

supposé très spécifique devient-il opérationnel avec un réactif qui ne l'est pas. La réaction de Wassermann ne mesure pas la présence d'anticorps spécifiques, mais une «modification du sang syphilitique» de nature inconnue.

Beaucoup de «sérologues» s'intéressent à ce sujet, puisqu'entre 1906 et 1934, plus de 10 000 articles sont publiés sur la syphilis. Ils ne cherchent pas à expliquer la réaction observée au cours d'un test de Wassermann. Un de leurs seuls objectifs est de le rendre pratique, aussi fiable que possible. On calibre la réaction, mais l'ignorance de sa nature rend la standardisation difficile.

UNE CONFIANCE AVEUGLE DANS LE TEST

Pourquoi les sérologues font-ils tant d'efforts pour améliorer la technique d'une réaction dont ils ne comprennent pas le principe ?

En raison de l'importance sociale de la syphilis, grave problème de santé publique et symbole de la dégradation des mœurs, les pouvoirs publics encouragent et financent la mise au point d'un test de dépistage de la syphilis. Pour assurer le transfert du test vers la clinique, on forme des experts et on crée des laboratoires spécialisés. Dans les années 1920 et 1930, la précision technique de la sérologie compense son indigence théorique.

On ignore le mécanisme du test de Wassermann, mais on est convaincu qu'un résultat positif à un test, réalisé dans des conditions appropriées par des professionnels compétents, signifie presque toujours que le patient est infecté par *Treponema pallidum*.

On définit deux critères pour ce test : la sensibilité, c'est-à-dire la proportion de personnes déclarées positives par le test et qui sont réellement infectées, et la spécificité, c'est-à-dire la proportion des personnes qui ne sont pas infectées et qui sont déclarées négatives. Les meilleurs tests diagnostiques devraient être à la fois très sensibles (il y a très peu de faux-négatifs, des personnes infectées déclarées saines) et très spécifiques (très peu de faux-positifs, de personnes saines déclarées malades). Dans la pratique, les deux qualités sont rarement réunies.

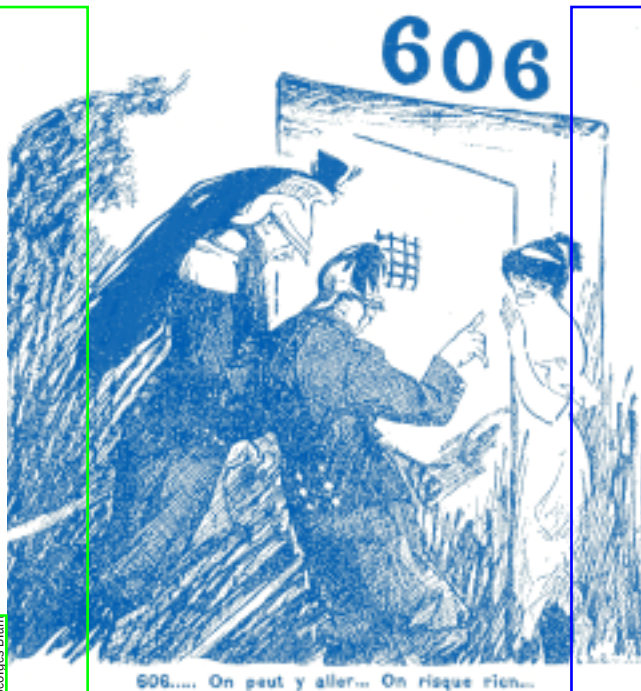
Le test de Wassermann a seulement une sensibilité moyenne (certains syphilitiques, notamment dans la phase silencieuse de la maladie, ont des tests négatifs), mais une très bonne spécificité (une personne

saine a exceptionnellement un test positif). Quand un résultat positif est obtenu par un test réalisé correctement, «on peut affirmer sans hésitation aucune que le malade souffre de syphilis soit acquise, soit héréditaire». Quand, au cours des années 1908-1910, la première période de la diffusion du test, certains médecins prétendent que la réaction n'est pas très spécifique, on leur rétorque que le test a été mal réalisé et qu'il doit être confié à des spécialistes.

La certitude que, dans de bonnes conditions d'exécution, un résultat positif de la réaction de Wassermann signifie toujours la présence d'une infection syphilitique est renforcée par la conviction que la maladie sévit dans les quartiers populaires des grandes villes. La maladie est tenue pour très fréquente chez les Noirs des États-Unis. Selon un médecin, «La séro-réaction de Wassermann permet de dépister les syphilis inavouées ou ignorées. [...] On doit appliquer la séro-réaction à tout individu présentant des symptômes de nature douteuse, même dans les cas où la syphilis semble improbable.» Le médecin ne doit accorder aucune valeur à l'affirmation d'un malade qui prétend ne pas avoir la syphilis et doit se fier entièrement au résultat du test de Wassermann. «Tout malade dont la réaction est positive doit être traité jusqu'à la disparition, et la disparition définitive, de la réaction de Wassermann.»

UNE ERREUR SOLIDEMENT ÉTAYÉE

Pendant les années 1920-1930, les efforts de standardisation du test se poursuivent. On distribue à des spécialistes et à des laboratoires de référence des échantillons de sérums positifs et négatifs, sans qu'ils en connaissent l'origine ; ils doivent déterminer si les sujets sont syphilitiques ou non. La méthode donne entre 10 et 30 pour cent de faux-négatifs, mais moins de un pour cent de faux-positifs. Au contraire, les laboratoires non spécialisés obtiennent près de 50 pour cent de faux-négatifs, mais surtout près de 9 pour cent de faux-positifs. On en conclut que les petits laboratoires non spécialisés doivent être étroitement contrôlés par les pouvoirs publics. La conviction que toute personne ayant un test de Wassermann positif est syphilitique reste profondément ancrée.



Ce dessin humoristique a été publié dans le journal *Les hommes du jour* du 24 septembre 1910. Des soldats s'apprêtent à entrer dans une maison close sise au n° 606. Le «606» était en fait un médicament, le salvarsan, un dérivé de l'arsenic qui a été mis au point par le médecin allemand Paul Ehrlich en 1909. Moins toxique que les dérivés du mercure, le 606 avait cependant des effets secondaires notables.

Un réseau de cliniques traitant les maladies vénériennes se constitue, et de vastes campagnes de dépistage de la maladie sont menées dans les années 1930. Entre 1937 et 1940, une campagne visant à l'éradication de la syphilis a lieu à Chicago. Ainsi, 31 pour cent de la population sont testés ; 56 000 personnes sont déclarées positives et reçoivent un traitement. On encourage toute la population à subir un test. Aux États-Unis, on adopte un texte de loi assurant le financement public des campagnes d'éradication de la syphilis ; des tests sont imposés aux futurs mariés et aux soldats (ils seront instaurés en France après la guerre).

Entre 1938 et 1948, le test de Wassermann devient un examen de routine aux États-Unis et en Europe. Les statistiques s'accumulent au fil des ans et finissent par semer le doute. Les tests réalisés sur un nombre croissant d'individus sains, tels les futurs mariés et les conscrits, révèlent une disparité entre la fréquence de la syphilis observée par les cliniciens et par les épidémiologistes, et les résultats du test de Wassermann. De plus en plus de personnes dont le test est positif affirment n'avoir jamais eu la syphilis et ne compter aucun antécédent familial. Les protestations ont d'autant plus de poids qu'elles proviennent de personnes des classes aisées. La spécificité du test est mise en cause.

En 1949, le premier test capable de détecter la présence d'anticorps spécifiques du tréponème est mis au point. Pour la première fois, le test de la syphilis est fondé sur un savoir immunologique incontesté. Les médecins s'interrogent : que mesure le test de Wassermann ? Il mesure bien des modifications du sang syphilitique, mais elles ne sont pas spécifiques de la syphilis. Un nombre élevé de personnes qui ont un test Wassermann positif n'ont pas d'anticorps anti-tréponème : elles ne sont pas et n'ont jamais été infectées par la bactérie. Les faux-positifs techniques avaient été notablement réduits par l'amélioration du savoir-faire des laboratoires qualifiés, mais quelle était la proportion des faux-positifs biologiques, c'est-à-dire des personnes saines qui avaient un test positif ? Combien parmi les 56 000 personnes dont le test de Wassermann était positif, dénoncées comme syphilitiques et traitées à Chicago entre 1937 et 1940, étaient en

fait des faux-positifs biologiques traitées à tort ? On l'ignore, mais d'après divers tests effectués dans les années 1960 la proportion des faux-positifs biologiques dans les populations saines oscillait alors entre 30 et 70 pour cent.

Ultérieurement, les biologistes ont montré qu'une réaction de Wassermann positive persistante apparaît dans de nombreux états pathologiques ou non, qui déclenchent des «modifications dans le sang». C'est le cas des grossesses, de diverses maladies auto-immunes, de maladies de foie, de maladies vasculaires ou de rhumatismes (on sait aujourd'hui que l'antigène reconnu n'est pas une protéine propre à la bactérie, mais un lipide peu spécifique).

Avant la Seconde Guerre mondiale, les concepts de race et les préjugés de classe des médecins les ont conduits à la conviction que la syphilis était partout, ce qui a renforcé la croyance en la spécificité de la réaction de Wassermann. Après la guerre, les nouvelles méthodes de dépistage ont modifié l'interprétation de cet examen biologique, et l'avènement des antibiotiques a bouleversé le traitement et le statut de la syphilis.

Ilana Löwy étudie l'histoire de la médecine à l'unité INSERM U 158, à l'Hôpital Necker- Enfants malades.

Cyanobactéries et riziculture

L'enfouissement des engrais chimiques favorise la prolifération de ces organismes microscopiques, qui servent d'engrais naturel.

Le riz est la nourriture de base de près de la moitié des habitants de la planète. Pour continuer à assurer ce rôle, la production mondiale devra augmenter de 300 millions de tonnes (60 pour cent de la production actuelle), d'ici l'an 2020. La majorité des écosystèmes favorables à la riziculture étant déjà cultivés, les riziculteurs devront accroître les rendements, sans augmenter l'utilisation des engrais et pesticides, coûteux et polluants. En étudiant les cyanobactéries des rizières, des microbiologistes de l'ORSTOM, l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, et de l'IRRI, l'Institut international de recherche sur le riz, ont trouvé comment réduire notablement la consommation des engrais azotés en riziculture.

Les cyanobactéries sont des micro-organismes photosynthétiques, qui ressemblent à des algues microscopiques et vivent notamment dans les eaux douces et à la surface des sols. Certaines de ces bactéries assimilent l'azote de l'air. À leur mort, l'azote incorporé est libéré dans le sol sous une forme assimilable par les plantes. Les cyanobactéries des rizières accumulent entre 10 et 30 kilogrammes d'azote par hectare et par cycle de culture (entre 100 et 120 jours). À titre de comparaison, les riziculteurs asiatiques épandent entre 30 et 90 kilogrammes d'azote sous forme d'engrais chimique par hectare de rizière et par cycle cultural. Outre leur apport d'azote, les cyanobactéries solubilisent le phosphore et améliorent sa biodisponibilité pour le riz. Ces biofertilisants semblaient être une alternative ou un complément peu coûteux aux engrais chimiques. Dans les années 1980, des agronomes de l'Inde, d'Égypte et du Myanmar (l'ancienne Birmanie) ont tenté d'accroître la production du riz en introduisant dans les rizières des cyanobactéries fixatrices d'azote sélectionnées en laboratoire. Or, les résultats en champs ont été décevants, car les souches introduites ne se développaient pas.

Au cours d'études menées dans une dizaine de pays rizicoles, les chercheurs ont observé que les cyanobactéries fixa-



Cyanobactéries isolées d'une rizière des Philippines.

trices d'azote sont naturellement présentes dans toutes les rizières et que l'introduction de souches étrangères est généralement inutile. Ils ont identifié les principaux facteurs qui limitent le développement des cyanobactéries : l'acidité du sol et sa carence en phosphore, la prédation par des invertébrés aquatiques et l'épandage d'engrais azotés dans l'eau de la rizière. Diverses expériences *in situ* ont confirmé que le chaulage des sols acides, l'apport de phosphore, l'élimination des prédateurs avec des insecticides et l'absence de fertilisation azotée (ou l'enfouissement de l'engrais azoté dans le sol) favorisent la prolifération des cyanobactéries autochtones fixatrices d'azote dans la quasi-totalité des rizières. Toutefois, le coût total de ces pratiques culturales est supérieur au bénéfice obtenu et seul l'enfouissement de l'engrais azoté est une mesure économiquement rentable.

Pourquoi l'épandage d'engrais azotés dans l'eau de la rizière inhibe-t-il la prolifération des cyanobactéries fertilisantes ? L'épandage aboutit rapidement à la formation dans l'eau d'ions ammonium (NH_4^+) qui empêchent la fixation de l'azote atmosphérique par les cyanobactéries de la rizière et favorisent la multiplication des algues vertes unicellulaires ;

ces dernières entrent en compétition avec les cyanobactéries, les privant des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance. Simultanément, les algues vertes consomment le dioxyde de carbone dissous, ce qui rend l'eau de la rizière basique. Quand le pH augmente, de l'ammoniac gazeux se dégage et est entraîné par le vent : la moitié de l'azote épandu est ainsi perdue.

Puis, la prolifération des algues vertes unicellulaires déclenche celle des invertébrés, telles les larves de moustiques, qui consomment ces algues et inhibent le développement des cyanobactéries.

Peut-on à la fois stimuler la prolifération des cyanobactéries autochtones et réduire la quantité d'engrais chimiques utilisés ? Oui, en enfouissant l'engrais azoté dans le sol au lieu de l'épandre à la volée dans l'eau de la rizière, comme c'est souvent le cas en Asie. Cet enfouissement a trois avantages : les cyanobactéries autochtones fixatrices d'azote se multiplient, ce qui représente un apport gratuit d'azote, les pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac diminuent notablement et les larves de moustiques, vecteurs du paludisme et des encéphalites, ne prolifèrent plus dans l'eau des rizières.

Pierre ROGER – ORSTOM

Le fer à cheval

Une semelle sous le fer amortit les chocs.

Certains objets sont si anciens qu'on les croit immuables : le fer à cheval, par exemple, perdrait-il du même coup ses propriétés protectrices du sabot et porte-bonheur s'il était différent de celui que nous connaissons ? La question est financièrement importante, car, aux États-Unis seulement, les pertes annuelles dues aux

boiteries des chevaux de courses atteignent 500 millions de dollars. Des fers mieux conçus éviteraient-ils certaines maladies des membres ? Un capteur d'accélération adaptable au sabot permet de tester les nouvelles ferrures régulièrement proposées.

Le sabot du cheval est très sollicité : en raison de sa faible surface d'appui et de la masse importante des chevaux, les pieds doivent supporter une force qui atteint deux à quatre fois le poids du cheval (environ 500 kilogrammes). De surcroît, à chaque poser d'un pied, le sabot doit amortir le choc : cet amortissement commence

BRÈVES

Insuline de poisson

Des cellules de pancréas d'un poisson qui vit dans les eaux chaudes et peu oxygénées, le *Tilapia*, ont été enrobées d'un gel qui les protège contre le système immunitaire, et greffées sur des souris diabétiques : ces cellules encapsulées résistent au manque d'oxygène dû à l'encapsulation et libèrent de l'insuline, mais l'insuline du poisson diffère de celle des mammifères. Les chercheurs vont injecter le gène de l'insuline humaine dans des œufs de *Tilapia*, afin que les cellules pancréatiques du poisson adulte produisent l'insuline humaine. *Tilapia* évitera peut-être aux diabétiques le désagrément des injections quotidiennes d'insuline.



Hommes, femmes, douleur

Les femmes se plaignent de douleurs plus longues et plus fortes que les hommes. Est-ce en raison de facteurs socio-culturels ou de facteurs biologiques? Une expérience a montré que la physiologie de la douleur dépend du sexe. Après anesthésie, on a administré un antalgique morphinique à une cinquantaine de personnes à qui l'on avait arraché une dent de sagesse. Les femmes souffraient davantage après l'opération, mais elles ont été plus rapidement soulagées par l'antalgique que les hommes et l'effet calmant a duré plus longtemps (*Nature medicine*, vol.2, n° 11). Les voies de la douleur seraient ainsi modulées par les hormones.

Combien de Néandertaliens?

Les Néandertaliens furent 500 millions en Europe, pendant 85 000 ans de présence. Jean-Noël Biraben, de l'INED, a calculé ce nombre en se fondant sur les densités de populations de niveaux culturels proches qui vivaient, sous des climats semblables, aux XVII^e et XVIII^e siècles. Il y a entre 120 000 et 70 000 ans, 250 000 Néandertaliens vivaient sous un climat tempéré. Il y a 70 000 ans, l'Europe, réduite à huit millions de kilomètres carrés habitables par l'avancée des glaces, avait un climat proche de celui de l'Alaska actuel : 50 000 à 70 000 individus y habitaient.

Suite page 22

lors de la collision du talon avec le sol, et il se prolonge jusqu'à la première moitié de la phase d'appui du pied. L'énergie est absorbée par la rapide déformation des structures du pied (déformation de la corne du sabot, compression du circuit veineux et du coussinet plantaire). Puis des contractions musculaires assurent un amortissement actif. Enfin le pied bascule, avant de repartir pour une phase de lever.

Ainsi une pince (l'avant du sabot) trop longue pénalise le cheval, parce qu'elle gêne le basculement du pied et augmente le couple qu'il doit exercer pour avancer : plus sollicités, les muscles et tendons fatiguent.

A quoi sert le fer? Le fer classique protège la corne de l'usure et modifie les caractéristiques du choc du sabot sur le sol. À la Station INRA de Jouy-en-Josas, Éric Barrey et ses collègues ont mis au point des accéléromètres adaptables aux pieds des chevaux, afin de mesurer les accélérations ressenties en divers points du sabot : quelle que soit la ferrure, une phase de forte décélération est suivie d'un régime de vibrations. Le fer modifie à la fois le choc initial et les vibrations.

À l'aide de leurs capteurs, les chercheurs ont d'abord montré l'importance des pistes sur les chocs du pied contre le sol : on limite plus les chocs en modifiant la nature des pistes qu'en transformant la ferrure. Puis ils ont comparé plusieurs des ferrures qui ont été proposées ces dernières années pour supplanter le classique fer à cheval :

associations de plaques métalliques à des fers classiques, fers en matériaux moins rigides ou plus légers que l'acier (polyuréthane ou aluminium)...

Les mesures ont montré que le choc initial est réduit de 17 à 30 pour cent pour les associations d'une plaque en caoutchouc visco-élastique et d'un fer classique, et jusqu'à 56 pour cent pour les fers dont la semelle est en polyuréthane : plus le matériau de la ferrure est dur et lourd, plus le choc est fort. On estime les capacités d'amortissement du fer lors du poser des pieds en frappant le fer avec un marteau : si le marteau rebondit, le fer n'absorbe pas bien le choc initial.

Comment modifier le matériau des ferrures? Le test du marteau montre que des fers en cuir seraient idéaux... si les chocs répétés ne les rendaient pas, progressivement, incompressibles. Des polymères semblent plus appropriés. Et des changements de la forme des fers permettraient-ils d'améliorer l'amortissement du pied? Oui : il suffit d'augmenter la surface d'appui postérieure du pied, par exemple dans les fers en forme d'œuf, utilisés dans les maladies de l'os naviculaire (un petit os à l'arrière du pied, qui fait partie du système amortisseur du pied). Une autre solution est l'injection d'un polymère moulé sur le pied : le matériau amortit le choc initial, et la charge est bien répartie sur toute la surface du pied. Un tel fer s'use en quelques semaines, mais c'est la preuve qu'il a été utile!



1. Un nouveau modèle de fer à cheval, avec une semelle en polymère moulé sur la sole.



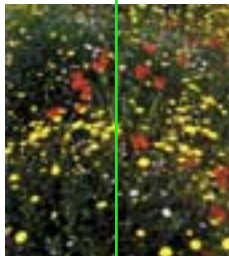
2. Ces capteurs fixés sur le pied d'un cheval mesurent l'accélération perçue par le pied.

Plus grand nombre premier

Les plus grands nombres premiers sont les nombres de Mersenne, de la forme $2^n + 1$, où n est un nombre lui-même premier. Le 13 novembre 1996, Joël Armengaud, après un long calcul effectué sur 18 *pentiums* en parallèle, a montré que le 35^e nombre de Mersenne, où n est égal à 1 398 269, est premier. Ce nombre comporte 400 chiffres en écriture décimale. Le site *Internet* sur lequel on trouve tout ce qu'on voulait savoir sur les nombres de Mersenne sans l'avoir demandé est <http://www.utm.edu/research/primes>.

Qu'elle était verte ma prairie

Selon l'Institut français de l'environnement, la surface des prairies, qui représentent encore un cinquième du territoire français, a diminué de 25 pour cent depuis 1970. L'intensification de l'agriculture, les quotas laitiers et l'élevage en batterie sont les causes de cette disparition. On méconnaît trop souvent le rôle écologique des prairies : habitat de nombreuses espèces animales, elles contribuent aussi à réduire l'érosion des sols et les inondations. Des mesures récentes tentant d'empêcher leur transformation en culture semblent insuffisantes.



La vie, plus vieille que prévu

Dans des sédiments trouvés au Sud-Ouest du Groenland, les géologues ont trouvé la trace d'un océan disparu, âgé de 3,85 milliards d'années. On croyait que cette eau avait précédé l'apparition de la vie, mais S. Mojzsis et ses collègues de l'Institut de La Jolla ont refait les analyses du carbone organique présent dans les sédiments ; l'abondance des carbones 12 et 13 révèle la présence de vie dans cet océan.

Pair, impair et molécules

Parmi les sept millions de molécules organiques (contenant du carbone) connues, il y en a quatre pour cent de plus avec un nombre pair d'atomes de carbone qu'avec un nombre impair de ces atomes. Cette découverte, obtenue par des chimistes suisses et indiens, a surpris plus d'un chercheur : aucune explication n'est proposée pour l'instant. Ces chimistes auraient-ils mis le doigt sur une dissymétrie cachée de la matière?

Suite page 24

Couronnes de feuilles

La composition des couronnes végétales romaines.

Dans l'iconographie populaire, le général romain vainqueur est ceint d'une couronne de laurier : à Rome, les personnages de marque étaient honorés avec des couronnes de fleurs ou de feuillage. Faute de vestiges réels, les archéologues connaissent surtout ces ornements par des textes et des représentations artistiques : portraits sur pierre ou en bronze, monnaies et peintures murales. Pour préciser ses études des peintures murales de tombeaux du Bas-empire romain, qui montrent des couronnes de roses, Alix Barbet, du CNRS, a fait analyser des couronnes végétales découvertes il y a une vingtaine d'années dans une tombe romaine : la plante utilisée était la mélitte à feuilles de mélisse (*Melittis melissophyllum*), plante ornementale et médicinale.

La tombe des Couronnes est située dans la nécropole de Mangalia, ville fondée par les Grecs sur la rive Ouest de la mer Noire, au VI^e siècle avant notre ère, sous le nom de Callatis et passée sous domination romaine à la fin du I^{er} siècle de notre ère. Un sarcophage contenait le corps partiellement conservé d'une femme d'une quarantaine d'années qui portait un diadème d'or et des vêtements brodés. Elle était aussi entourée d'objets familiers : plusieurs paires de chaussures, un miroir, des boîtes de fard ou d'onguents et des vases de verre intacts. La typologie de ces vases indique que l'inhumation a eu lieu au II^e siècle.

Des dizaines de couronnes végétales, petites et rondes, ou plus volumineuses et pliées en deux avaient aussi été déposées aux côtés de la défunte. Elles se présentent aujourd'hui comme des agglomérats serrés d'éléments végétaux desséchés,

de couleur brunâtre. Ce n'était pas des couronnes de fleurs, mais de feuilles : les fragments présentent des innervations, un contour parfois denté, des traces de pétiole (la «queue» d'une feuille), et l'ensemble est uniformément couvert de poils glabres, non urticants, à trois ou quatre segments. Selon ces caractéristiques, déterminées par P.O. Combelles, du Muséum national d'histoire naturelle, ces feuilles sont celles d'une plante de la famille des labiées (comme la menthe, le thym ou l'origan).

Pour préciser l'identité de cette plante, un texte de Plinius l'Ancien a été déterminant. Dans son *Histoire naturelle*, il décrit les plantes utilisées pour fabriquer des couronnes (Livre XXI, 29) : «On employa donc pour les couronnes de feuillage la bryone, le troène, l'origan, le créorum, qu'Hygin appelle casia, la conyza, qu'il appelle cunilago, le melissophyllum, qu'il appelle apiastrium...» Le melissophyllum, ou mélitte à feuilles de mélisse, est une labiée aux feuilles couvertes de poils qui pousse dans toute l'Europe tempérée. La comparaison des feuilles de la guirlande avec des échantillons de cette plante provenant de Roumanie confirme qu'il s'agit de la même espèce.

Selon l'analyse des pollens contenus dans un échantillon de couronne, réalisée par l'équipe de Michel Girard (CRA, CNRS), la mélitte n'était pas en fleur : l'enterrement aurait eu lieu en hiver ou au tout début du printemps. En revanche, des fleurs d'une plante de la famille des borraginées (celle du myosotis et de l'héliotrope) étaient probablement intercalées avec les feuilles : on en retrouve de nombreux grains de pollen. Les grains de céréales retrouvés sur le même échantillon de couronne indiquent aussi que de la paille intervenait dans sa confection.

La mélitte à feuilles de mélisse, plante d'ornement, a des propriétés apéritives, diurétiques, dépuratives et antispasmodiques. Un dicton provençal conseille aux femmes d'en avoir toujours à portée de main, pour soigner les règles douloureuses et des troubles liés à la ménopause. Son utilisation pour fabriquer les guirlandes déposées dans la tombe d'une femme était-elle associée à ses vertus médicinales?



La mélitte à feuilles de mélisse, qui compose les couronnes végétales retrouvées dans cette tombe romaine, a été identifiée grâce aux poils (cartouche) qui couvrent ses feuilles.



De Fermat à abc

**On généralise
le théorème de Fermat.**

En démontrant le théorème de Fermat, en 1994, Andrew Wiles et ses collègues parachevaient l'édifice construit depuis trois siècles. Cette démonstration n'a cependant pas mis un terme aux recherches dans ce domaine. Henri Darmon, de l'Université McGill, et Loïc Merel, de l'Institut de mathématiques de Paris 6, ont prolongé le théorème de Fermat.

L'étude des équations diophantiennes, équations polynomiales dont les constantes et les solutions sont des entiers, est centrale en théorie des nombres. Depuis le XVII^e siècle, les mathématiciens ont accumulé les résultats sur des équations diophantiennes particulières : ainsi l'on sait qu'il n'y a pas d'entiers qui vérifient $x^4 + y^4 = z^2$ (Fermat, XVII^e siècle), $x^3 + y^3 = z^3$ et $x^4 + y^4 = 2z^2$ (Euler, XVIII^e siècle).

TRIPLETS (abc)

$$\begin{aligned} 1 + 2^3 &= 3^2 \\ 2^5 + 7^2 &= 3^4 \\ 13^2 + 7^3 &= 2^9 \\ 17^3 + 2^7 &= 71^2 \\ 3^5 + 11^4 &= 122^2 \\ 17^7 + 76\,271^3 &= 21\,063\,928^2 \\ 1\,414^3 + 2\,213\,459^2 &= 65^7 \\ 9\,262^3 + 15\,312\,283^2 &= 113^7 \\ 43^8 + 96\,222^3 &= 30\,042\,907^2 \\ 33^8 + 1\,549\,034^2 &= 15\,613^3 \end{aligned}$$

La conjecture abc prédit qu'il n'y a qu'un nombre fini de triplets (abc) de la forme $x^r + y^s = z^t$ avec $1/r + 1/s + 1/t < 1$. Seuls les dix triplets ci-dessus ont été découverts.

Un triplet (abc) désigne trois entiers non nuls a, b, c sans facteur commun et vérifiant $a + b = c$ (ainsi, dans l'égalité $1 + 2^3 = 3^2$, $a = 1$, $b = 8$ et $c = 9$). On sait aujourd'hui, outre l'absence de solution de l'équation de Fermat $x^n + y^n = z^n$ pour n supérieur à 2, que, pour n grand, il n'y a qu'un nombre fini de triplets (abc) de la forme $x^n + y^n = \lambda z^n$, où λ est une puissance d'un nombre premier qui n'est ni 2, ni de la forme $2^k + 1$ ou $2^k - 1$. Le

cas où λ est égal à 2 est aujourd'hui résolu : Loïc Merel et Henri Darmon ont démontré que le seul triplet d'entiers premiers entre eux vérifiant $x^n + y^n = 2z^n$, avec n supérieur à 2, est (1,1,1).

La conjecture de Fermat-Catalan généralisée a été proposée : pour u, v et w entiers fixés, il n'y a qu'un nombre fini de triplets (abc) de la forme $ux^r + vy^s = wz^t$ avec $1/r + 1/s + 1/t < 1$.

On démontrerait facilement ce résultat si une conjecture encore plus forte, formulée en 1984 par David Masser et Joseph Oesterle, la conjecture abc, était vraie. Son énoncé affirme que pour tout triplet (abc), c ne peut être « trop grand » comparé au produit des nombres premiers divisant abc (noté $p(abc)$). À titre d'illustration, on n'a trouvé aucun triplet (abc) avec $c > p(abc)^2$.

Malgré sa jeunesse, la conjecture abc suscite un intérêt considérable. Si on savait la démontrer, elle entraînerait bien d'autres conjectures et théorèmes difficiles. On en déduit notamment, le théorème général sur la conjecture de Mordell, dont la démonstration a valu au mathématicien allemand Gerd Faltings la médaille Fields en 1984.

Le blé, polluant marin

Entre Corse et Sardaigne s'étend la réserve naturelle des Lavezzi, où flore et faune sont préservées sur 5 000 hectares. L'écosystème y est protégé, la pêche au harpon et à la ligne y sont interdites. Le 25 septembre 1996, un cargo chargé de blé, en provenance de Port-La-Nouvelle, près de Narbonne et en route pour l'Albanie, s'est échoué. Les 2 500 tonnes de blé qu'il transportait se sont répandues sur



Le blé répandu au fond de la mer (à gauche) asphyxie les herbiers de posidonie (à droite).



fleurs sous-marines), privées de leur apport en oxygène, meurent.

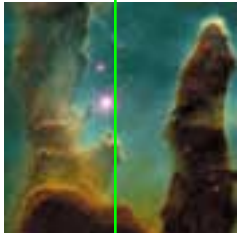
Selon Alexandre Meinesz, du Laboratoire Environnement marin littoral, à Nice, les pétroliers qui se sont échoués de par le monde, libérant de leur soute des centaines de milliers de tonnes de pétrole ont eu un impact désastreux sur la faune et sur la flore des régions exposées, mais quelques années plus tard, faune et flore s'étaient reconstituées naturellement. Au contraire, étant donné la faible vitesse de croissance de certaines espèces détruites par le blé, il faudra plusieurs siècles pour que les herbiers de posidonie recolonisent les surfaces « brûlées » par le blé en décomposition. En effet, les posidonies progressent par leur rhizome, une tige rampante d'où partent racines et feuilles. Or ce rhizome ne pousse que de quelques centimètres par an. Le blé – polluant inattendu – a commencé à être pompé au début du mois de décembre, afin que l'impact écologique de cet échouage soit limité.

le fond. Juste après le naufrage, la surface recouverte était de l'ordre d'un hectare. Pourtant, comme la masse de blé se déplace au gré des courants et des tempêtes, certaines zones recouvertes après le naufrage sont aujourd'hui découvertes, tandis que de nouvelles zones sont enfouies.

Or, tout ce qui est enfoui sous le blé périt : que ce soit la faune fixée ou la flore. De surcroît, le blé se décompose, libère de l'amidon sous forme d'une pellicule blanche qui recouvre l'eau, ou de filaments qui s'agglutinent sur les algues. Toutes les algues et les massifs de posidonie (des plantes à

Le chaînon manquant

À l'exception de l'hydrogène moléculaire, H_2 , la quasi-totalité des centaines de molécules du milieu interstellaire sont produites par des réactions chimiques mettant en jeu l'ion H_3^+ , le plus simple des ions polyatomiques stables. Après 15 années de recherche, les astronomes américains T. Geballe et T. Oka ont enfin détecté cet ion dans des nuages du milieu interstellaire. Grâce à la mesure de l'abondance de H_3^+ , on pourra calculer directement le taux d'ionisation du milieu interstellaire, paramètre fondamental de la chimie interstellaire et de la formation des étoiles.

**Pression et cuisson**

On stérilise généralement en chauffant, mais on peut aussi stériliser en comprimant. Pourquoi? Parce que des pressions de plusieurs milliers d'atmosphères rompent des liaisons chimiques faibles, sans dégrader les molécules : les vitamines sont préservées, les glucides ne sont pas chimiquement modifiés, les lipides sont liquéfiés, les protéines sont dénaturées, ce qui conduit à des modifications de texture caractéristiques d'une cuisson. Ce traitement détruit les micro-organismes. Il a été nommé pascalisation, en l'honneur de Blaise Pascal, dont le nom a été donné à l'unité internationale de pression, et sort aujourd'hui des laboratoires : un centre de transfert technique, équipé de pilotes industriels, s'ouvre aujourd'hui à Bar-le-Duc.

Une dent parmi les diamants

Les grands singes d'Afrique occupaient un territoire notablement plus vaste que ne l'admettaient les paléontologues, comme en témoigne la molaire découverte parmi des diamants extraits d'une mine, en Afrique du Sud. Jusqu'à présent on pensait que ces primates hominoïdes avaient vécu dans les régions équatoriales. Selon Brigitte Senut, du Muséum national d'histoire naturelle, et Martin Pickford, du Collège de France, l'animal avait une taille intermédiaire entre celle d'un chimpanzé et celle d'un gorille actuels ; il aurait vécu il y a environ 18 millions d'années. C'est peut-être un ancêtre du kenyapithèque, considéré comme l'ancêtre des grands singes et de l'homme.

La desmine

Les souris dépourvues de cette protéine ont un cœur et des muscles défaillants.

L'armature des cellules maintient leur forme et assure leurs déplacements. Ce cytosquelette est constitué de diverses protéines. L'équipe de Denise Paulin, à l'Institut Pasteur, a montré que l'une de ces protéines, la desmine, assure la cohésion et la résistance du tissu musculaire. Aujourd'hui, on découvre que diverses maladies qui touchent le tissu musculaire, et dont on ignorait la cause, résulteraient de mutations du gène codant la desmine.

Tous les constituants du cytosquelette participent à la morphogenèse et au mouvement des cellules. Chacun a une tâche bien précise : les tubulines, à l'intérieur des cellules, assurent les mouvements des constituants intracellulaires ; la mobilité de la membrane cellulaire dépend des microfilaments d'actine qui donnent sa forme au corps cellulaire ; les filaments intermédiaires, qui forment l'armature proprement dite, confèrent leurs propriétés élastiques aux tissus. Grâce à ces divers éléments, les cellules résistent aux contraintes qu'elles ont à subir.

Il existe plusieurs classes de filaments intermédiaires. Dans le tissu musculaire, ces filaments sont constitués de desmine. Les molécules de desmine, assemblées en réseau tridimensionnel, assurent la jonction entre les sous-unités contractiles, ou sarcomères, des fibres musculaires. Ces sarcomères assurent la contraction musculaire, et les assemblages de desmine agissent comme des amortisseurs. En ce qui concerne les muscles lisses, tels les vaisseaux sanguins et les parois des viscères, les fila-

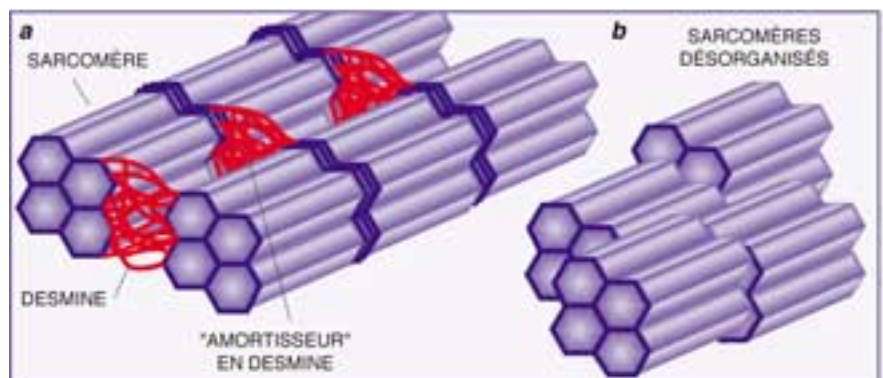
ments de desmine, situés à l'intérieur des cellules, leur permettent de résister aux différences de pression qui règnent de part et d'autre des parois.

Les molécules de desmine de l'homme et de la souris sont très semblables, de sorte que les anomalies observées chez des souris qui en sont dépourvues renseignent les généticiens sur le rôle exact de cette protéine. L'équipe de D. Paulin a obtenu des souris sans desmine en substituant au gène codant la desmine, un gène muté qui interdit la fabrication de l'ARN messager et, par conséquent, de la protéine.

En l'absence de desmine, les cellules ne sont plus jointives, le tissu musculaire présente des déchirures microscopiques, et les souris ont de graves malformations cardiaques. La cohésion cellulaire n'est plus assurée, et le cœur est criblé de petits trous. Le tissu cardiaque est anormalement blanchâtre, sans doute en raison d'une fuite d'ions calcium. Les souriceaux survivent parfois pendant une année, mais sont très faibles. Ils sont beaucoup moins endurants que les souriceaux normaux.

Chez l'homme, certaines maladies résulteraient d'anomalies des filaments intermédiaires. La phosphorylation des protéines (le nombre de groupes phosphate qu'elles portent) serait anormale, ce qui interdirait la formation des réseaux protéiques assurant la cohésion des tissus. Ainsi, l'épidermolyse bulleuse, une maladie où la peau se décolle, résulterait d'anomalies des filaments intermédiaires de la peau ; certaines myopathies familiales atteignant les muscles des membres ou le muscle cardiaque seraient dues à des anomalies de la desmine. Les molécules, trop phosphorylées, ne se lieraient plus les unes aux autres, ni aux tissus qu'elles soutiennent. L'origine inconnue de diverses myopathies semble se préciser.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Les sarcomères, les sous-unités des fibres musculaires, sont reliés par des «amortisseurs» en desmine. En l'absence de cette protéine (à droite), les sarcomères sont désorganisés, aucune protéine ne les reliant ; les animaux ont alors une résistance à l'effort très inférieure à celle des animaux sains.

Pasteur dans un plan

Séparation spontanée de cristaux à la surface de l'eau.

En 1848, à l'âge de 26 ans, Louis Pasteur a son premier succès scientifique en séparant les deux types de molécules (les énantiomères) qui composent le tartre du vin : il observe que ces molécules sont chirales, c'est-à-dire non superposables à leur image dans un miroir. À l'Institut Curie, un groupe de physiciens obtient aujourd'hui une séparation analogue en plaçant des molécules chirales à la surface de l'eau.

La séparation d'énantiomères est devenue une préoccupation en optique, en agro-alimentaire ou en pharmacie : seul l'énantiomère gauche de l'aspartame est un bon édulcorant (la forme droite est amère), et seul un des deux énantiomères de la thalidomide a des propriétés sédatives (l'autre est tératogène). Pour les séparer, les chimistes modernes recourent à des réactions de reconnaissance moléculaire, mais les résultats ne sont pas à la hauteur des efforts déployés : moins de dix pour cent des 12 000 composés chiraux répertoriés à ce jour ont été séparés.

Pourrait-on trouver de nouvelles méthodes de séparation ? En 1982, le chimiste américain E. Arnett imagine de confiner les molécules dans un plan, afin d'amplifier les mécanismes de reconnaissance spécifique entre deux énantiomères. Son idée n'est pas testée, car D. Andelman, de l'Université de Tel-Aviv, et Pierre-Gilles de Gennes calculent théoriquement que la ségrégation chirale à deux dimensions ne se produit pas si seules les interactions à longue distance (forces électrostatiques, forces de dispersion...) s'exercent entre les molécules.

Toutefois la simplicité de l'expérience tente Francis Rondelez et ses collègues du Laboratoire de physico-chimie de l'Institut Curie. Ils commencent par sélectionner une molécule qui, en raison de sa constitution chimique, s'étale facilement à la surface de l'eau : la myristoyl-alanine, comportant une partie insoluble dans l'eau, et une tête soluble et chirale, dérivée d'un acide aminé, l'alanine. La molécule forme spontanément une couche stable à la surface de l'eau, parce que l'alanine plonge dans l'eau, tandis que la partie insoluble pointe vers l'air.

Quand on comprime le film moléculaire ainsi formé à l'aide d'une barrière qui flotte à la surface de l'eau, on fait passer le film d'un état dilué, de nature liquide, à un état condensé, assimilable à un cris-



F. Rondelez

Domaines spontanément formés à la surface de l'eau par des molécules chirales : chaque zone noire n'est composée que de molécules identiques.

tal. Des mesures de la pression de surface révèlent tout d'abord que les molécules de chiralités différentes s'associent plus difficilement que les molécules de même chiralité. De surcroît, le microscope optique montre qu'une compression de la monocouche racémique engendre des zones cristallines circulaires de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre dans un milieu continu, plus fluide. À ce stade, les zones cristallines sont encore composées de deux énantiomères. Toutefois, des zones plus sombres, qui ont la forme de petites aiguilles courbes, croissent lentement à l'intérieur de ces îlots. Ces aiguilles sont des micro-cristaux d'énantiomères purs, droits ou gauches.

Pourquoi cette ségrégation chirale ? Les calculs confirment que les forces à

longue portée sont généralement inefficaces, mais ils ne prennent pas en compte les forces à courte portée. Or, dans le cas de la myristoyl-alanine, comme dans celui d'autres composés organiques, de telles forces (liaisons hydrogène) sont suffisamment fortes pour imposer la structure d'équilibre. La méthode topochimique proposée par le groupe de l'Institut Curie devrait être applicable aux autres composés organiques entre lesquels s'exercent des liaisons hydrogène fortes. Les cristaux obtenus sont encore très petits, et la ségrégation est lente (il faut environ une heure pour que les domaines composés d'un seul énantiomère se constituent), mais combien de temps a-t-il fallu à Pasteur pour faire son tri à la main ?

Nutrition et CFA

La dévaluation dégrade l'alimentation des enfants.

Le 12 janvier 1994, le franc CFA, monnaie des 14 pays africains de la zone franc, a été dévalué de 50 pour cent. Destinée à restaurer les équilibres macro-économiques de ces pays, cette dévaluation était exceptionnelle, en raison de son ampleur, et de son application à des pays fortement dépendants de l'extérieur et marqués par la crise économique et les restrictions budgétaires. En diminuant le pouvoir d'achat d'une partie de la population, notamment celui des citadins, la dévaluation a dégradé l'alimentation des enfants, en quantité et en qualité.

Dans les pays de la zone franc, la malnutrition est chronique et ses conséquences dramatiques : elle augmente le risque de mortalité, la sensibilité aux infections, et elle diminue les capacités d'ap-



E. Maire/Gaston

Les bouillies d'importation, de meilleure qualité nutritionnelle, sont aujourd'hui moins utilisées.

prentissage et la productivité. La malnutrition est même transmise : une femme mal nourrie dans son enfance a plus de risques de mettre au monde des enfants de faible poids, plus fragiles et qui auraient besoin d'être mieux nourris.

La malnutrition apparaît au cours de la première année de la vie, au moment où la diversification de l'alimentation fait encourir d'importants risques infectieux et nutritionnels aux enfants. Avec des partenaires africains, nous avons évalué l'évolution de l'alimentation de ces jeunes enfants, en milieu urbain, au Congo et au Sénégal. Les pratiques en matière d'allaitement au sein ont peu changé ; l'âge du sevrage n'a pas été retardé. Ces actes alimentaires restent avant tout culturels : le poids de la tradition l'a emporté sur les considérations économiques.

En revanche, le nombre d'enfants recevant des bouillies ou des plats adaptés à leur âge a diminué, ainsi que la qualité des aliments utilisés en complément du lait maternel. À Brazzaville, l'utilisation de bouillies préparées à partir de farines commerciales importées a baissé de 45 pour cent en moyenne, de 70 pour cent dans les familles aux revenus les plus bas : depuis la dévaluation, le prix de revient des bouillies importées a augmenté de 90 pour cent, et celui des bouillies locales de 25 pour cent. Les mères qui enrichissaient ces bouillies, de qualité nutritionnelle plus faible, avec du lait ou du sucre, ajoutent moins souvent du lait.

Dans la grande banlieue de Dakar, la qualité des bouillies s'est aussi dégradée. Plus de mères donnent uniquement des préparations à base de mil avec du sucre, sans ajouter de lait ni de corps gras. La nature des plats familiaux a également évolué : la quantité de riz reste inchangée, mais les apports d'huile, de légumes et de poisson frais se réduisent. Or l'importance de ce plat a augmenté dans l'alimentation des enfants depuis la dévaluation.

La diminution de la consommation de produits importés était une conséquence prévue de la dévaluation. Plus inattendue est la remise en cause, par les mères, des séances d'éducation nutritionnelle dans les centres de santé. Les conseils qui y sont dispensés, tels l'ajout de lait et de corps gras, ne leur semblent plus adaptés au nouveau contexte : parmi les produits alimentaires, les farines commerciales, le lait en poudre et l'huile ont subi les augmentations de prix les plus fortes.

Même si l'économie de certains pays se rétablit, l'état nutritionnel des populations reste inquiétant. Les messages d'éducation devront être adaptés au nouveau contexte économique. La situation nécessite en outre la production locale d'aliments de complément améliorés, accessibles aux plus pauvres, ou l'apprentissage par les mères de leur préparation.

Francis DELPEUCH, ORSTOM, Montpellier



Stefan Hanson - Sygma

Un volcan, qui s'est réveillé sous le glacier Vatnajökull, a projeté des cendres à plus de trois kilomètres de hauteur et a fait fondre l'épaisse couche de glace qui le recouvrait.

Explosion d'octobre

Un volcan sous un glacier.

Le 30 septembre 1996, un volcan s'est réveillé sous un glacier d'Islande. Cette île, sur la frontière séparant la plaque tectonique Nord-américaine et la plaque Eurasienne, aurait émergé il y a quelque 20 à 15 millions d'années et, à la fin de la dernière période glaciaire, il y a 12 000 ans, elle était presque entièrement recouverte de glace.

Le glacier Vatnajökull, qui avec une surface de 8 300 kilomètres carrés est le plus grand d'Europe, est un vestige de cette époque. À l'Ouest, il recouvre la dorsale médio-océanique où sont présents deux volcans, le Baroarbunga et le Grimsvötn. Avec une éruption tous les dix ans en moyenne, le Grimsvötn est un des volcans subglaciaires les plus actifs du monde.

L'éruption d'octobre 1996 est le dernier acte d'une série de secousses sismiques et d'éruptions magmatiques :

l'amplitude des secousses sismiques qui l'ont précédée n'a pas dépassé 5,4 sur l'échelle de Richter. De telles secousses ont été fréquemment enregistrées au cours des 20 dernières années, mais aucune n'avait déclenché d'éruption. Cette fois, l'activité sismique a duré toute la journée du 29 septembre et, le 30 septembre, les sismographes ont enregistré un début d'activité volcanique (les vibrations engendrées dans le sol par un volcan diffèrent de celles d'un tremblement de terre). Le 1^{er} octobre, la glace s'est effondrée en deux endroits, là où son épaisseur était comprise entre 400 et 600 mètres ; les éruptions ont suivi. Le 2 octobre, un nuage de cendres a été projeté à plus de trois kilomètres dans le ciel. Le diamètre du cratère creusé dans la glace atteignait alors plusieurs centaines de mètres.

Quand un volcan subglaciaire émet un magma liquide et pauvre en gaz, le magma se fige au contact de la glace, de sorte qu'il n'y a pas émission de lave, mais éjection de scories, de bombes et de cendres. Au centre du cratère, l'activité géothermique intense fait fondre la

glace, de sorte qu'une mer subglaciaire se forme. Elle se vide tous les cinq à dix ans et se déverse en un puissant torrent dans l'océan Atlantique après avoir submergé des régions inhabitées au Sud de l'Islande. Un tel événement s'est produit au début de l'année 1996, de sorte que le niveau de l'eau dans le cratère, juste avant l'explosion d'octobre, était bas.

La mer subglaciaire se vide parfois avec une violence inaccoutumée ; ce fut le cas en 1598, en 1685, en 1716, en 1892 et en 1934. Cette année-là, le flot fut si violent qu'on l'entendait à 50 kilomètres à la ronde et que la couverture de glace vola en éclats. Le glacier rejeta quelque 50 000 mètres cubes d'eau par seconde pendant une semaine : sept mille milliards de litres d'eau de fonte se déversèrent avec un débit proche de celui du fleuve Congo, le deuxième fleuve du monde par son débit, après l'Amazone.

En raison de l'activité volcanique, les eaux de la mer subglaciaire avaient monté, dès le 2 octobre, d'une quinzaine de mètres ; on attendait que le torrent se déverse. Les hommes n'étaient pas menacés, mais les infrastructures l'étaient : les digues ont été renforcées, on a creusé des fossés pour que le flot attendu puisse se déverser sans trop endommager les routes et les ponts. La catastrophe se faisait toujours attendre quand une nouvelle éruption eut lieu le 13 octobre. L'eau de la mer subglaciaire a continué à monter. Les

vulcanologues avaient prévu que le flot subglaciaire s'écoulerait dès que le niveau de la mer souterraine aurait atteint 1 450 mètres au-dessus du niveau de la mer. On en était à 1 510 mètres, le 27 octobre. Comme l'activité volcanique faiblissait, on commençait à espérer que les trombes n'auraient pas lieu. Puis, après quelques petites secousses sismiques, le 4 novembre, le débit de la rivière qui s'échappe de la mer subglaciaire passa, en deux heures, de 70 à 6 000 mètres cubes par seconde. L'eau était noire de sédiments et sentait le soufre. Des icebergs de 200

tonnes ont été arrachés du glacier. Le débit maximal atteignit 45 000 mètres cubes par seconde. Le flot se calma en quelques jours. Trois mille milliards de litres d'eau de fonte ont ainsi été déversés. Des portions de route et des ponts ont été arrachés, ainsi que des lignes électriques et téléphoniques situées sur le passage des flots.

Cet événement serait le signe d'une activité croissante sur la frontière entre l'Europe et l'Amérique du Nord, et d'autres éruptions devraient suivre, où le feu et la glace se mêleront.

Christoph ROLOFF, Berlin

Lune, les zones froides comme la région polaire Sud ne sont pas directement visibles de la Terre, aussi, les astronomes ont utilisé une sonde lunaire.

La sonde *Clementine* ne possédant pas de radar, les planétologues américains ont détourné de sa fonction principale l'antenne de communication de la sonde. Au lieu d'envoyer le signal de communication directement vers la Terre, le signal était émis vers la Lune, diffusé par la surface lunaire, puis reçu sur Terre. Lors d'un survol de la dépression polaire Sud en avril 1994, les planétologues ont noté un pic dans le rapport entre deux ondes polarisées qu'ils interprètent comme une diffusion par une surface réfléchissante d'une centaine de kilomètres carrés. Cette surface pourrait être de la glace.

S'il s'agit effectivement d'eau, quelle est son origine ? Elle a vraisemblablement été apportée par des impacts cométaires. Il y a quatre milliards d'années, la Lune, récemment formée, se refroidit. Selon Yves Langevin, de l'Institut d'astrophysique spatiale, elle est constamment bombardée de météorites et de comètes qui contiennent beaucoup d'eau. Les molécules d'eau contenues dans ces corps qui tombent sur la Lune suivent des destins divers. Une partie rebondit tellement vite qu'elle échappe à l'attraction lunaire. D'autres molécules moins rapides, telles des millions de balles, rebondissent de cratère en cratère au gré de leur trajectoire balistique. En trois mois de rebondissements, nombres de molécules d'eau sont ionisées et emportées par le vent solaire. Si, au cours de ces trois mois, des molécules d'eau alunissent dans des zones froides, elles peuvent être adsorbées par la surface lunaire.

Au total, dans ces zones froides, on trouverait une succession de couches de glace et de régolite (la poussière lunaire accumulée après des impacts de météorites) dont l'épaisseur totale ne dépasserait pas une dizaine de mètres. Dans ces couches, quatre milliards d'années d'histoire de bombardement de la Lune par les comètes seraient préservés.

Cette découverte, qui doit être confirmée, suscite un intérêt scientifique considérable, non pour fournir de l'eau à d'éventuelles bases lunaires (la quantité serait insuffisante), mais surtout parce que les scientifiques auraient à « portée de fusée » un témoignage unique de l'histoire passée du Système solaire. À l'heure où des missions spatiales s'envolent pour Mars à la recherche de la vie, cette quête d'eau lunaire pourrait relancer l'intérêt de missions moins coûteuses vers le satellite de la Terre.

Lune glacée

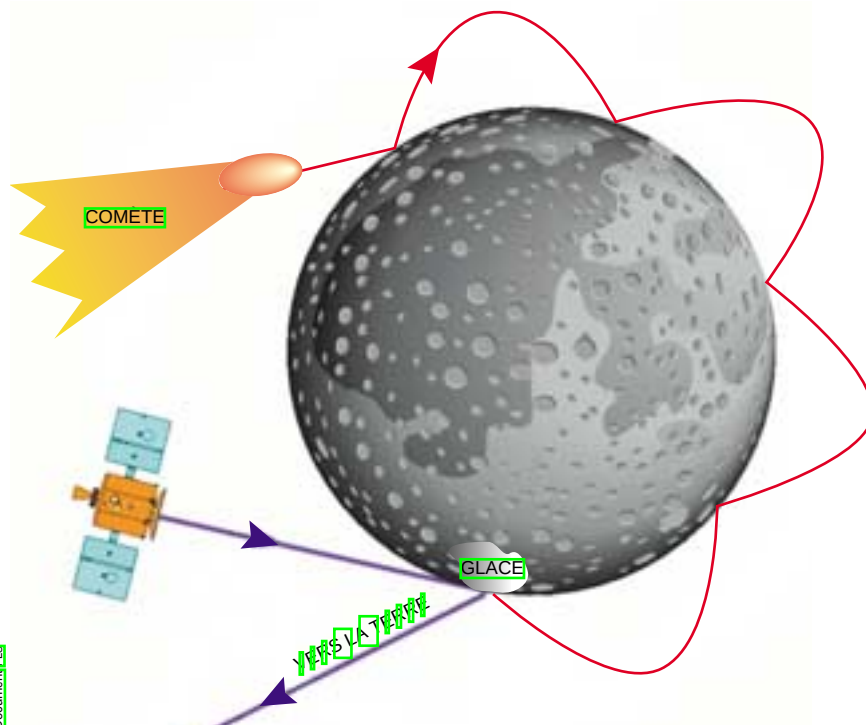
Un lac gelé sur la Lune?

Les glaces du Groenland recèlent l'histoire de l'atmosphère terrestre depuis quelques centaines de milliers d'années. La sonde *Clementine*, placée en orbite lunaire au printemps 1994, aurait détecté de la glace près du pôle Sud de la Lune : quatre milliards d'années d'histoire du Système solaire seraient conservés dans cette glace apportée par des comètes.

Dès les années 1960, les astronomes pensaient qu'il existait de l'eau sur la Lune. Les missions automatiques et habitées

qui s'y sont succédé n'ont rien trouvé, sans doute parce que les lieux d'alunissage n'étaient pas adéquats : les zones éclairées par le Soleil sont trop chaudes (130 °C) pour conserver la glace. La région du pôle Sud de la Lune, située dans une dépression, est le plus souvent à l'ombre. Des cratères jamais éclairés y existent : à une température de -173 °C ces « congélateurs » piègent la glace.

L'eau est commune dans le Système solaire : outre la Terre et les calottes polaires martiennes, toutes les planètes gazeuses contiennent de l'eau. Début 1994, à l'aide du radiotélescope d'Arecibo, les astronomes avaient décelé sur Mercure une zone réfléchissante, vraisemblablement de la glace. Sur la



La chute d'une comète sur la Lune libère des molécules d'eau dont certaines sont piégées, après plusieurs rebonds, dans des « congélateurs » (des régions toujours dans l'ombre du Soleil). La sonde *Clementine* aurait détecté une telle zone gelée près du pôle Sud lunaire.

Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes

PAUL DUBOIS • BERTRAND GRELLET

Dans les grottes, les variations du climat et les séismes se traduisent par des modifications de structure des concrétions, identifiables et datables.

Les concrétions calcaires des grottes, stalactites et stalagmites, enregistrent les caractéristiques de l'écoulement d'eau qui les a créées, et donc des événements qui ont

modifié la vitesse et la nature de leur formation.

Dans un milieu souterrain relativement protégé de l'érosion et des dégradations humaines, ces dépôts

sédimentaires, nouvellement désignés sous le nom de «spéléothèmes», sont datés par les moyens classiques de la datation géologique. Le décryptage de ces «archives géologiques» qui nous renseignent sur l'histoire climatique et géologique locale a beaucoup progressé ces dernières années.

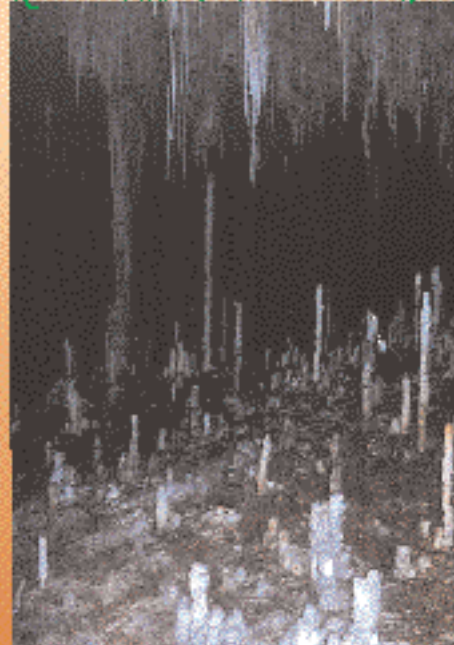
Les eaux des précipitations (pluie, neige) se chargent en gaz carbonique émis par la végétation. L'eau acidifiée dissout le calcaire (CaCO_3) des roches. La quantité dissoute de CaCO_3 dépend du climat extérieur : température, CO_2 , volume d'eau infiltrée, pH.



Les eaux qui s'infiltrent dans la roche calcaire continuent à se charger en calcaire dissout. La quantité dissoute et transportée dépend du CO_2 disponible et des propriétés de la roche.



Le calcaire dissout dans l'eau précipite sous forme de concrétions. La quantité déposée de calcaire et la structure des concrétions dépendent du débit de l'eau d'infiltration et du climat de la grotte : température, humidité relative, degré de confinement.



La vie de la grotte

Une grotte, comme tout système géologique, a une histoire : elle naît, vit et se développe, puis vieillit et disparaît lentement. La grotte apparaît et grandit quand un courant d'eau chargé de gaz carbonique creuse une roche calcaire. Les galeries de certains réseaux de grottes s'étendent sur des centaines de kilomètres (plus de 500 kilomètres à Mammoth Cave, aux États-Unis) et les dénivelés verticaux peuvent dépasser le kilomètre (1 602 mètres au gouffre Jean Bernard, en Savoie). Le vieillissement est lié au tarissement des courants et des eaux de creusement, et au comblement de la grotte par les sédiments et les concrétions.

Les dépôts détritiques des grottes résultent de l'accumulation des sédiments. Les dépôts endogènes, éboulements des parois et des plafonds, renseignent, quand on sait les dater, sur l'évolution de la grotte et, éventuellement, sur l'origine sismique de son comblement.

Les dépôts exogènes proviennent de l'extérieur de la grotte. L'agent de transport, le plus souvent l'eau, dépose des sédiments semblables à ceux trouvés dans les terrasses des rivières de surface. Leur étude met en évidence des séquences de dépôts liées à des crues avec conglomérats, grès et sables

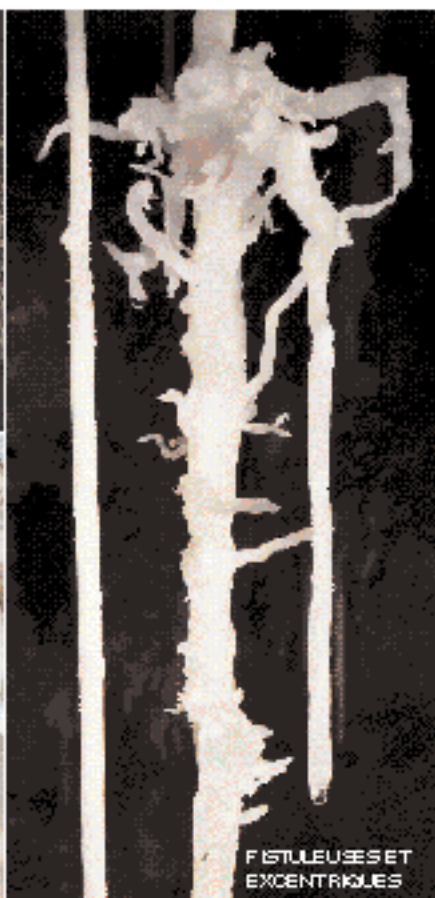
1. LES CONCRÉTIONS sont formées par précipitation du carbonate de calcium dissous dans l'eau qui transite de la surface jusqu'au vide de la grotte.



CONCRÉTIONS ÉTOILÉES



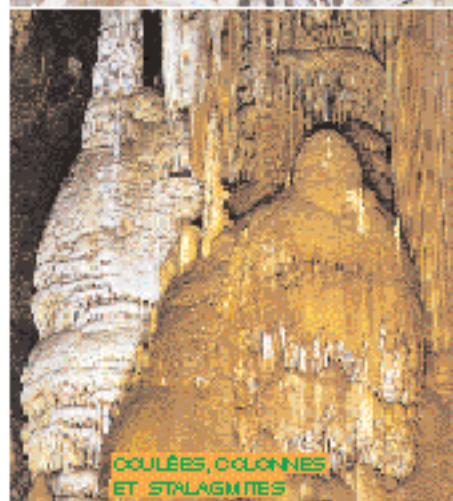
CRISTAUX D'ARAGONITES EN AIGUILLES



FISTULEUSES ET EXCENTRIQUES



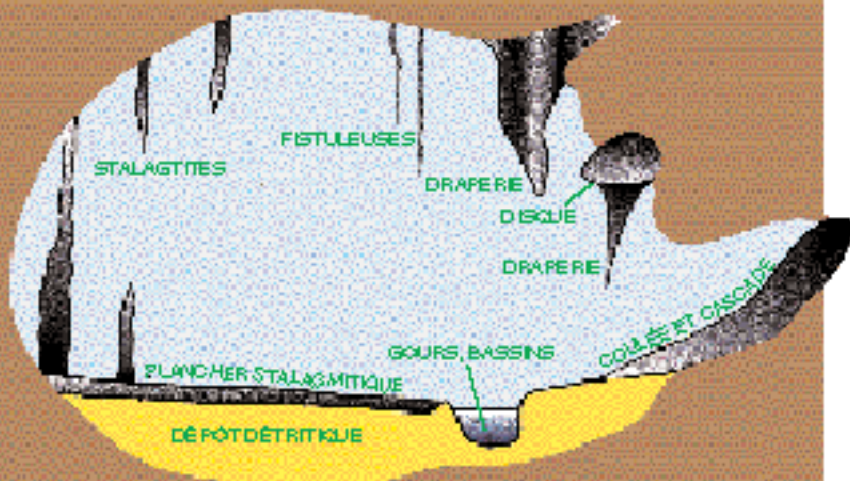
DISQUE ET DRAPERIE



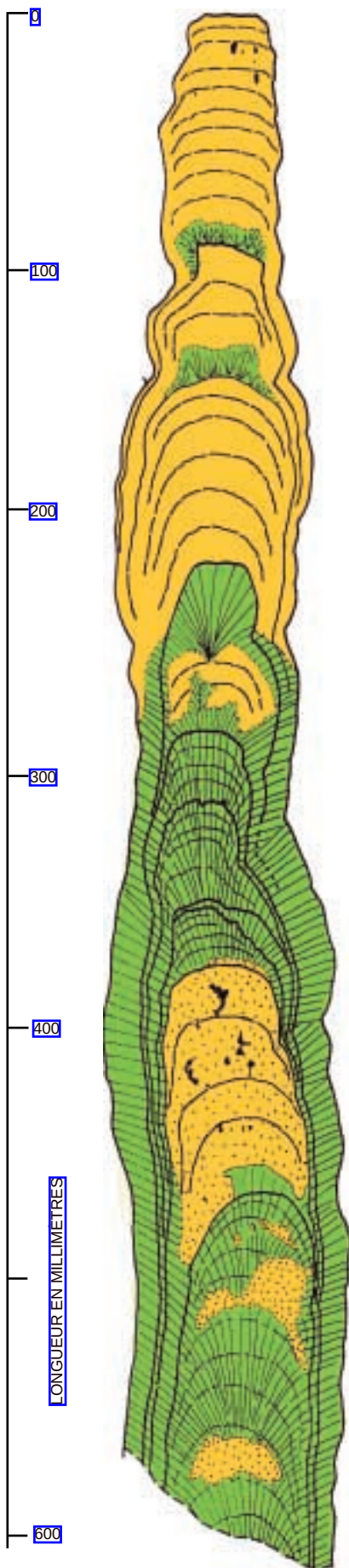
COULÉES, COLONNES ET STALAGMITES



CONCRÉTIONNEMENT DE BASSIN

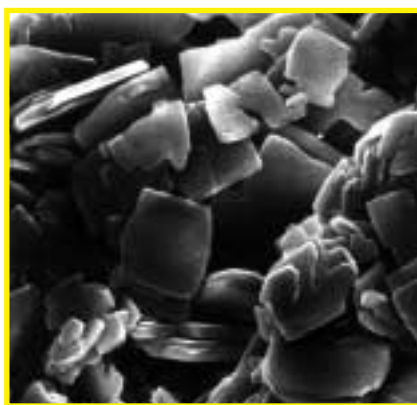


2. LA FORME ET L'IMPORTANCE des concrétions dépendent du débit d'eau qui les alimente : écoulement gravitaire ou écoulement capillaire. Le premier, soumis aux forces de gravité, met en place le concrétionnement «habituel» qui dépend du point de percolation de l'eau dans la grotte. L'écoulement capillaire, à très faible débit d'eau, entraîne un concrétionnement très limité en volume. Échappant à la gravité, le concrétionnement se ramifie dans toutes les directions, sous forme de cristaux isolés ou en touffes d'aiguilles, d'efflorescences, d'excentriques plus ou moins ramifiées. Son apparition dans une grotte est l'indice d'un «confinement», c'est-à-dire d'un faible renouvellement de l'air et de l'eau.

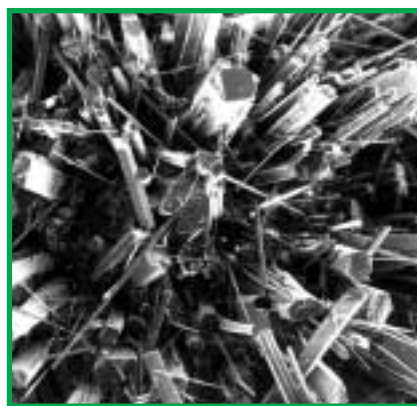


à la base, et argile fine au sommet. Le vent accumule aussi d'importants dépôts de sable fin et surtout de loess, indices d'un climat steppique lié à des phases climatiques froides péri-glaciaires ; ces dépôts détritiques exogènes renseignent sur l'environnement climatique externe à la grotte.

À partir des analyses de ces sédiments (granulométrie, morphoscopie, palynologie, etc.), on a reconstitué les diverses étapes, notamment climatiques et culturelles, qui se sont succédé au cours des derniers millions d'années. On a ainsi reconstitué, dans la grotte de Caune de l'Arago (Pyrénées-orientales), le cadre climatique



CALCITE



ARAGONITE

3. COUPE D'UNE STALAGMITE de la grotte de Clamouse, près de Montpellier : c'est un exemple rare et spectaculaire d'alternance de concrétionnements d'aragonite et de calcite. Dans la partie inférieure, essentiellement en aragonite, les plages de calcite apparaissent sur l'apex de la concrétion, partie qui reçoit la goutte d'eau et qui est la plus arrosée. Le passage aragonite-calcite dans la partie moyenne indique une variation climatique dont l'âge sera précisé par les études de datations (travaux de Silvia Frisia et Andréa Borsato, du Musée Trentin de sciences naturelles, Trente, Italie). Les deux photographies de calcite et d'aragonite ont été prises au microscope électronique à balayage.

et le mode de vie de l'Homme de l'Australopithecus, le plus vieux fossile humain européen, qui vivait il y a environ 450 000 ans.

De plus, une grande partie des objets et outils préhistoriques ont été découverts dans les fouilles de dépôts détritiques, fouilles qui ont précisé les alternances climatiques durant lesquelles s'est développée la lignée humaine.

Au Quaternaire, les dépôts détritiques des grottes ont été souvent perturbés par des éboulements, des coulées de boue et des glissements de terrains. Ces phénomènes ont été causés par les longues périodes de dégel qui ont succédé aux phases péri-glaciaires et glaciaires, où le sol était fixé par le gel. Ces processus ont particulièrement affecté les grottes du Sud de l'Europe, lors de la phase de dégel progressif qui a suivi la période glaciaire du Würm, entre -20 000 ans et -8000 à -6000 ans, suivant la position des sites.

Les écroulements de falaises et ces glissements de pente ont alors obturé des porches de grottes fréquentées par les hommes préhistoriques au cours de la dernière glaciation, et assuré leur conservation et leur intégrité. La découverte de la grotte Chauvet, dans l'Ardeche, illustre cette préservation.

Les concrétions

Les dépôts chimiques des grottes, les concrétions, sont spécifiques du milieu souterrain. Ces concrétions se forment en présence de trois composants : l'eau, le gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) et le calcaire. Quand l'eau de surface est acidifiée par la dissolution de gaz carbonique provenant des végétaux, le calcaire de la roche de surface est dissous sous forme de bicarbonate de calcium : cette dissolution du calcaire creuse les vides souterrains que sont les grottes. Le bicarbonate de calcium dissous est un composant en équilibre : quand la température de l'eau ou la pression partielle de gaz carbonique diminuent, l'équilibre chimique évolue dans le sens de la précipitation, avec dépôt de concrétions de carbonate de calcium.

Ainsi, en fonction des conditions du milieu, l'eau a une double action : soit elle creuse les conduits souterrains que sont les grottes, en dissolvant le calcaire, soit elle dépose le calcaire sous forme de concrétions et remplit les

vides qu'elle avait précédemment creusés sous terre.

Les variations de la température, la pression partielle du dioxyde de carbone, la solubilité de la roche, la teneur de la roche en carbonates, le débit de l'eau, déplacent l'équilibre dans le sens de la précipitation du calcaire, provoquant alors le dépôt de concrétions.

Les formes des concrétions

On est toujours surpris par la profusion et le polymorphisme des concrétions des grottes. Le concrétionnement n'est qu'une précipitation de carbonate de calcium, mais une précipitation au sein d'une eau circulante. Aussi le concrétionnement est-il un phénomène dynamique, et ses formes multiples sont contrôlées par un ensemble de facteurs : (1) la position dans la cavité souterraine du point de percolation de l'eau : plafond, sol, parois, bassins immergés, etc. ; (2) le débit de l'eau de concrétionnement : circulation capillaire en film d'eau, écoulement en goutte à goutte, ruissellement en cascade, etc. ; (3) les paramètres de porosité-perméabilité de la roche, qui influent sur les modes de circulation de l'eau de concrétionnement et sur la vitesse de percolation.

Parmi ces facteurs, le critère «débit et mode de circulation de l'eau» est majeur et sert de base à une première classification des concrétions. On distingue ainsi deux grands types de concrétionnements : (1) le concrétionnement à débit d'eau contrôlé par les forces de gravité, d'organisation essentiellement verticale, horizontale ou oblique, en fonction du profil des parois de la grotte. C'est le concrétionnement classique des grottes. La forme et l'importance des concrétions sont principalement déterminées par le débit d'eau qui les alimente (voir la figure 2).

Ainsi, un débit goutte à goutte lent favorise la formation de stalactites au plafond, un goutte à goutte rapide ne permettra que la formation de stalagmites au sol, avec un faible dépôt au plafond. Cette cinétique du concrétionnement détermine les formes des concrétions en écoulement : draperies, coulées et cascades stalagmitiques, planchers stalagmitiques, stalagmites, colonnes, disques, etc.

Le concrétionnement à débit d'eau très réduit, soumis à des forces capillaires et de tension superficielle, se

développe dans toutes les directions de l'espace. Ce type est désigné sous le terme général d'«excentrique», lequel traduit l'anormalité des concrétions. Il présente de très nombreuses formes cristallines, en général très belles : cristaux en aiguilles, coralloïdes, touffes, efflorescences, etc.

En climat humide, le concrétionnement de pesanteur à grand débit d'eau est favorisé, alors qu'en climat sec et confiné, le concrétionnement capillaire se développe. Les formes de concrétionnement sont ainsi une première approximation des alternances climatiques.

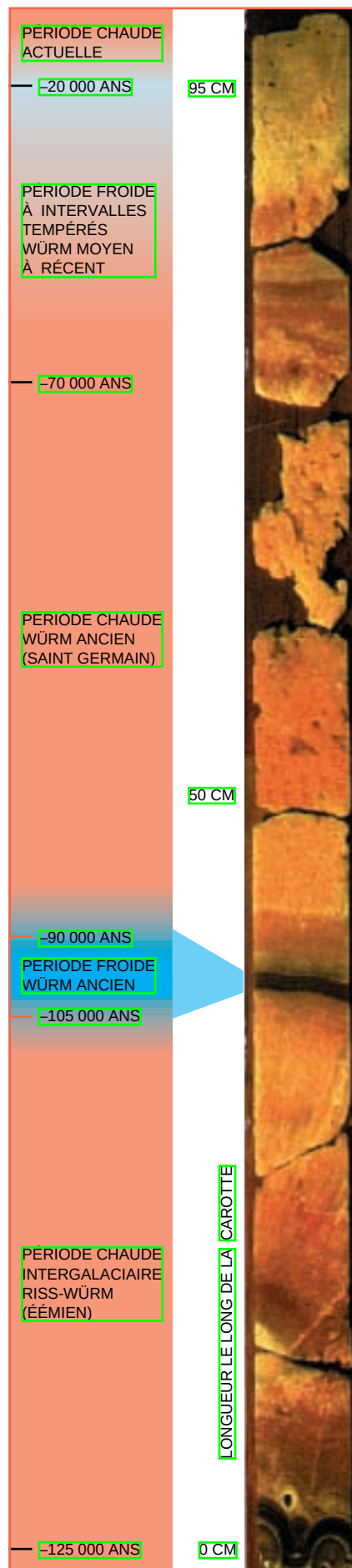
Concrétions et paléoclimats

La nature, la composition chimique et la texture de la roche calcaire d'un site ne changent guère avec le temps, mais tous les autres facteurs (température, débit de l'eau, CO₂, etc.) sont liés et dépendent du climat qui règne sur le massif calcaire où se situe la grotte. Aussi les structures des concrétions retracent-elles les variations climatiques et permettent-elles de les identifier.

Pendant une même phase climatique qui dure parfois plusieurs dizaines de milliers d'années, le concrétionnement reste continu, homogène, avec développement des mêmes types de concrétions. Lorsque les conditions climatiques sont telles que l'apport d'eau est réduit, la vitesse du concrétionnement diminue et le dépôt peut même s'arrêter complètement pendant de très longues périodes. Cet arrêt des dépôts se marque généralement dans les concrétions par des couches de coloration brune dues à des oxydations et à des corrosions de la surface des concrétions.

Les périodes de non-concrétionnement sont souvent plus longues que celles pendant lesquelles les concrétions se développent. Les arrêts de concrétionnement indiquent des dégradations climatiques (froid ou sèche-

4. TROIS PERIODES DE CONCRÉTIONNEMENT apparaissent sur cette carotte prélevée dans un plancher stalagmitique. Elles sont séparées par des arrêts de concrétionnement soulignés par de petits niveaux brunâtres. On repère ainsi la succession des alternances climatiques au cours des derniers 120 000 ans. Remarquons que le temps de non-concrétionnement est supérieur au temps de concrétionnement (grotte de Clamouse, travaux d'Yves Quinif, Faculté de Mons, Belgique).



resse). Pendant le Quaternaire, ils ont spécifiquement marqué les périodes froides ou glaciaires.

Le système cristallin reflète aussi les conditions du dépôt. Le carbonate de calcium cristallise selon deux systèmes minéralogiques : la calcite, forme la plus courante, et l'aragonite, beaucoup plus rare. L'aragonite se dépose préférentiellement lorsque l'alimentation en eau est réduite et en présence de magnésium existant dans certains types de roches carbonatées (dolomies, calcaires dolomitiques, calcaires minéralisés).

La présence d'aragonite est l'indice d'un confinement, par exemple une phase climatique sèche. Dans des cas favorables, on observe le passage aragonite-calcite plusieurs fois répété dans une même concrétion. Ces passages indiquent des fluctuations climatiques «humides-moins humides», intéressantes pour l'étude et l'identification des paléoclimats.

Les divers processus de formation des concrétions, leurs significations paléoclimatiques ainsi que l'interprétation des formes constituent une approche intéressante, mais qui ne permet d'aborder que la succession de diverses phases de concrétionnement ou de dépôts détritiques, c'est-à-dire une chronologie relative.

Les datations des concrétionnements

La datation absolue est obtenue par la mesure des concentrations en éléments radioactifs dont la demi-vie est connue. Dans les méthodes directes, on utilise la désintégration radioactive d'un élément dont on connaît par ailleurs la demi-vie. On mesure les concentrations de l'isotope radioactif et de ses produits de désintégration et on détermine ainsi la date de formation de la concrétion où l'isotope a été piégé. Le carbone 14 est utilisé jusqu'à 40 000 ans environ, l'uranium thorium jusqu'à 350 000 / 400 000 ans, l'oxygène 18 fournit essentiellement des datations concernant les paléotempératures.

Les méthodes indirectes mesurent des émissions par les objets étudiés après qu'ils ont été soit chauffés (thermoluminescence), soit soumis à un bombardement électromagnétique. Cette dernière méthode permet des datations dépassant largement les 500 000 ans, mais la fiabilité des résultats reste incertaine.

Les méthodes d'analyses naturelles mettent à profit les propriétés des sédiments. Ainsi la mesure de l'aimantation des particules de fer piégées dans les sédiments indique leur polarité magnétique lors de leur cristallisation, ce qui permet de les situer dans l'échelle paléomagnétique terrestre et d'approcher leur âge.

Une autre méthode est la datation par palynologie. L'eau de concrétionnement contient des spores et des pollens qui peuvent être piégés et conservés dans les concrétions. Leur détermination précise l'environnement climatique et l'âge du dépôt si l'on dispose d'une échelle palynologique calée pour la région étudiée. Cette méthode, développée par Bruno Bastin, est limitée par la difficulté d'extraction des pollens et par leur faible concentration dans les concrétions.

Dans certains types de concrétions (stalagmites, planchers stalagmitiques), on observe de fines lamines de dépôts successifs. Il se dépose deux

lamines par an, l'une au printemps et l'autre en automne ; elles se distinguent par la couleur qui caractérise la calcite formée : calcite compacte brune, calcite diffuse plus claire. Ces lamines, ainsi liées au cycle végétatif, rappellent les cercles de croissance des arbres. Le comptage des lamines apporte des datations précises sur les dernières centaines d'années, voire sur les derniers millénaires. Ces études, développées sous la direction de Dominique Genty (CNRS), complètent la panoplie analytique des moyens de datation.

Structure des concrétions et sismicité passée

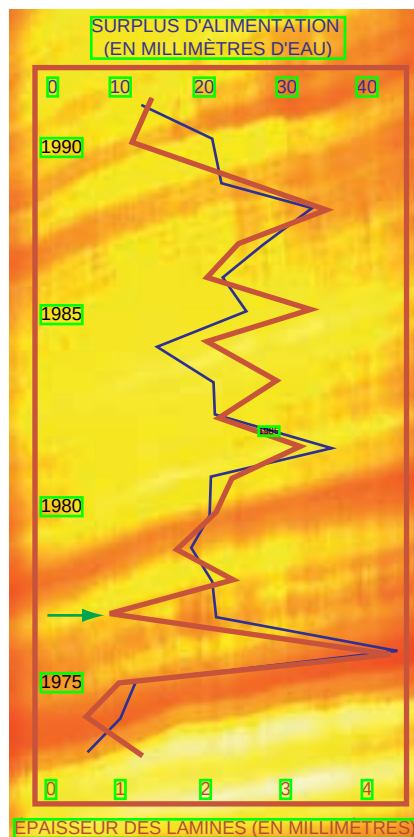
Les concrétions enregistrent, nous l'avons vu, les climats anciens, mais aussi les séismes passés.

Ces dernières années, les sismologues ont essentiellement utilisé les données de la sismicité historique ou instrumentale pour évaluer les dangers et la probabilité d'occurrence des tremblements de terre majeurs. Ils partent du principe que, d'une part, les séismes historiquement recensés dans une région sont représentatifs de son activité sismique au cours d'une période et que, d'autre part, les séismes majeurs surviennent là où ils se sont déjà produits.

Malheureusement pour les spécialistes des sciences de la Terre et heureusement pour les populations, dans les régions éloignées des limites des plaques tectoniques, les phénomènes géologiques sont lents. En Europe occidentale, la période couverte par les catalogues de sismicité historique (moins de 1 000 ans pour la France) ne constitue pas un laps de temps suffisamment représentatif de l'activité sismique d'une région. En effet, la mise en évidence récente de traces de paléoséismes majeurs ayant affecté l'Europe occidentale depuis moins de 100 000 ans montre que celle-ci n'est pas à l'abri de tremblements de terre, importants mais rares.

L'objectif des études de paléosismicité est d'identifier ces séismes majeurs et de quantifier leur magnitude et leur période de retour (récurrence). Pour ce faire, les géologues recherchent des évidences de mouvements récents le long des failles et les traces des effets de ces séismes sur le milieu naturel.

Protégées de l'érosion, les grottes sont des sanctuaires privilégiés qui



5. COMPARAISON DE L'ÉPAISSEUR des lamines et de l'excès d'alimentation en eau sur une stalagmite du tunnel de Godderville (Belgique). L'année de la sécheresse, 1976, apparaît clairement, et l'année précédente fut particulièrement pluvieuse. Sur 20 ans, la corrélation est bonne (mesures de Dominique Genty et Yves Quinif).

gardent la trace des déformations qui ont affecté une région. En effet, les anomalies dans le développement des spéléothèmes (draperies, coulées, planchers de calcite et surtout stalactites, stalagmites et colonnes) témoignent parfois d'événements tectoniques régionaux.

Toutefois, la difficulté de l'analyse provient du fait que les cavités endokarstiques et leurs spéléothèmes sont aussi soumis à des phénomènes uniquement liés à leur évolution naturelle (effondrements de galeries par sous-tirage, compaction des argiles, glissements de terrains...). De plus, les grottes ont souvent servi de refuge aux êtres vivants, dont l'homme, qui les ont modifiées. Tous ces paramètres doivent être pris en compte afin de décrypter avec certitude la lecture des effets uniquement liés aux phénomènes sismiques.

Effets d'un séisme sur les spéléothèmes

Les spéléothèmes, véritables sismographes naturels, sont sensibles aux ondes sismiques qui, en traversant le réseau karstique, provoquent des chutes de blocs et des bris de concrétions par ébranlement du substratum. Le processus continu de développement des spéléothèmes est quelquefois affecté de manière brutale. L'hypothèse de l'origine sismique des déformations observées n'est validée qu'à partir d'une analyse systématique des anomalies à l'échelle régionale. Les plus intéressants sont les stalactites, qui constituent naturellement des marqueurs de verticalité dont la croissance est gouvernée par la gravité, alors que les bordures des petits bassins (gours) indiquent l'horizontalité.

Les bris systématiques de concrétions dans les différentes cavités d'un même massif karstique peuvent être la conséquence d'un événement sismique.

Une étude récente menée par la Société GEOTER dans les grottes de la zone épicertrale du séisme destructeur de 1428 dans les Pyrénées-orientales a permis de répertorier un grand nombre de stalagmites sectionnées. Les segments brisés, tombés au sol, sont en partie reconcrétionnés dans le plancher stalagmitique, alors qu'une nouvelle stalagmite repousse au niveau de la cassure, sur la base restée en place.

SITUATION INITIALE

EFFET D'UN SEISME

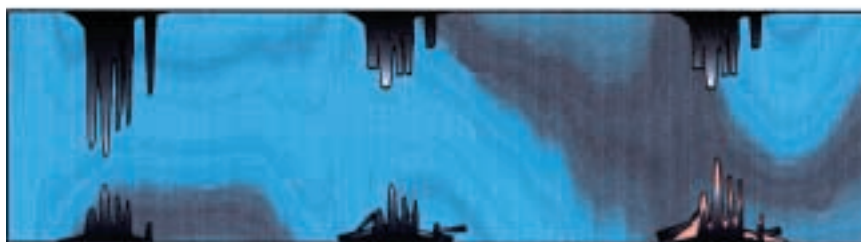
ANOMALIES OBSERVEES



6a. Reprise du concrétionnement sur les stalactites et les stalagmites brisées par un séisme.



6b. Reprise du concrétionnement au niveau de la cassure des stalactites.



6c. Nouveau concrétionnement sur les stalactites brisées.



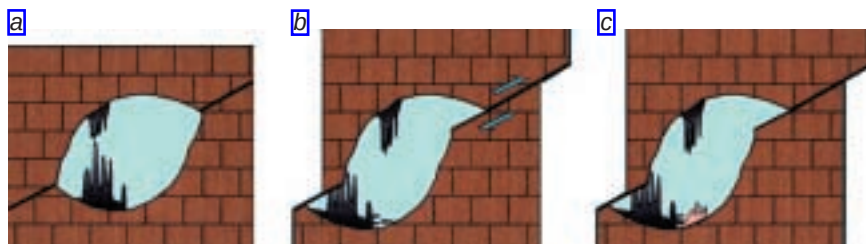
7a. Nouveau concrétionnement sur la partie brisée d'une stalagmite.



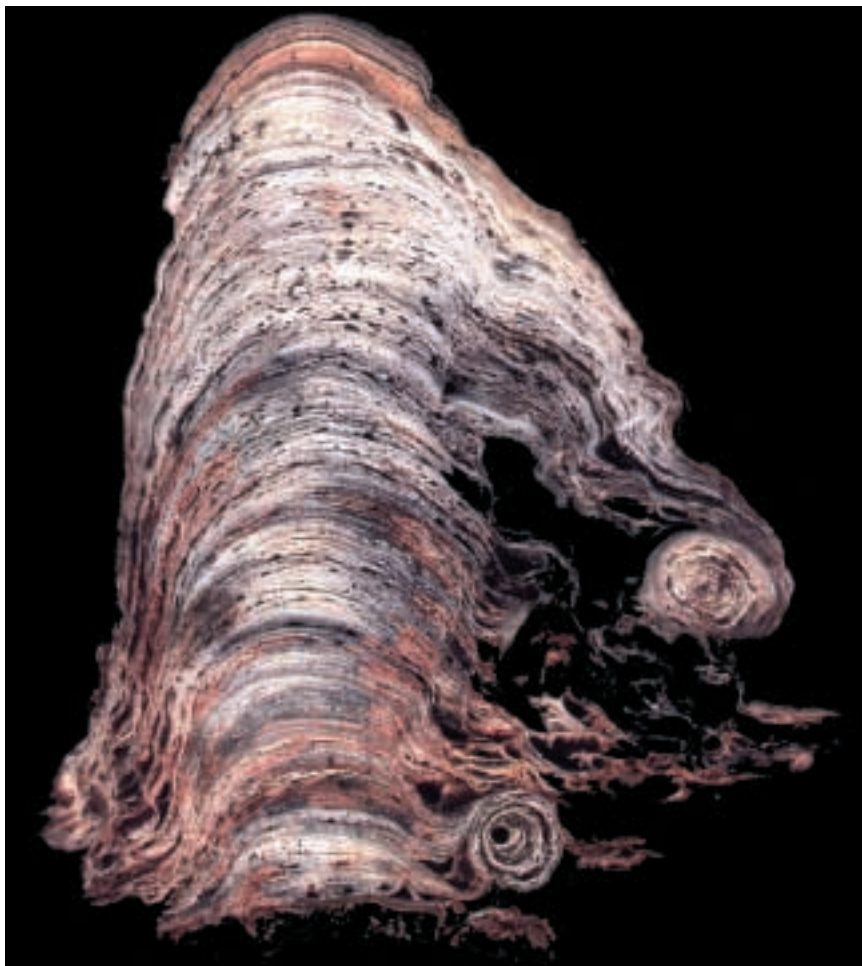
7b. Nouveau concrétionnement sur la base de la stalagmite.



7c. Nouveau concrétionnement sur un bloc éboulé.



8. STALACTITES ET STALAGMITES dans une galerie recoupant une faille (a). Rejeu de la faille, décalage de la galerie et cassure des stalagmites le long du plan de faille (b). Nouveau concrétionnement stalagmitique décalé par rapport au concrétionnement initial (c).



J. LAMBOURD - GEOTIER

9. STALAGMITE (190 millimètres) incluant deux stalactites fossilisées. La structure interne révèle le développement rythmé, sur 1 500 ans environ, des lamines superposées claires et sombres. Le comptage des lamines permet de dater les chutes des stalactites.



J. LAMBOURD - GEOTIER

10. STALACTITES DÉCAPITÉES avec deux niveaux de cassures successives, dans la petite salle de la grotte de Ribière (Rognes).

Dans la grotte du Père Noël, à Han-sur-Lesse, en Belgique, une colonne stalagmitique brisée, recimentée postérieurement à sa fracturation témoigne d'un séisme, ainsi que les nombreux spéléothèmes décapités sur lesquels repousse une concrétion plus petite dans la Grotta del Cervo, en Italie. Dans ce dernier cas, les géologues italiens P. Forti et D. Postpischl ont réalisé des datations au carbone 14 à la base de la nouvelle stalagmite. Les âges absolus obtenus correspondent au séisme dévastateur de décembre 1456, le plus fort recensé en Italie centrale.

Il arrive parfois qu'une stalagmite repousse sur la concrétion tombée à terre comme dans la Grotta del Frassinio, en Italie lombarde. De même, en Languedoc, sous des voûtes murées de l'aqueduc de Nîmes et à l'abri de toute intervention humaine, des fistuleuses et des stalactites sont tombées et ont été reconcrétionnées dans le plancher stalagmitique. Ces observations, associées aux preuves archéologiques

de destruction de l'édifice confortent l'hypothèse d'une origine sismique de ces chutes.

Les reprises de concrétionnement en terminaison de stalactites décapitées lors d'un séisme, cicatrisant les plans de cassures, correspondent à des anomalies aisément datables. Ces phénomènes, fréquents dans les cavités de la zone épacentrale du séisme de 1909, en Provence, ont été observés à Lambesc par P. Delange.

Quand un mouvement plus ou moins brutal des roches encaissantes déplace la stalagmite par rapport à la stalactite qui l'alimente, une nouvelle stalagmite se forme. Les exemples dans le réseau de Sieben Hengste, en Suisse et, en Italie, dans la Grotta del Cervo ou dans les grottes du Monte Campo del Fiori sont significatifs de mouvements sismiques qui ont modifié la morphologie des spéléothèmes. Une colonne statagmitique (stalactite et stalagmite soudées) peut également s'incliner ou se casser sous l'effet d'un mouvement tectonique.

Un séisme engendre parfois des variations de l'axe de croissance d'une stalagmite. L'exemple le plus spectaculaire se situe en Italie du Nord, dans la zone épacentrale du séisme de janvier 1117 qui a dévasté la région de Bologne. Les stalagmites analysées dans différentes cavités du secteur ont subi une brusque déviation de leur axe de croissance. L'âge de ce phénomène, daté par comptage de lamines, correspond exactement à la date du séisme.

Les colonnes joignant la voûte et le plancher d'une cavité peuvent se fracturer si leurs bords d'accroche sont soumis à des mouvements différentiels. Dans la grotte du Père Noël, Yves Quinif, de la Faculté polytechnique de Mons, en Belgique, a mis en évidence une compression à composante verticale sur des colonnes statagmitiques, qui se traduit par un écaillage de surface et des fractures verticales. Un décrochement peut aussi fracturer une croûte calcitique qui soude les parois d'un petit conduit.

Effets d'un séisme sur la morphologie des grottes

Le creusement du réseau de grottes s'effectue généralement selon des discontinuités sédimentaires (joints de stratification et hétérogénéités lithologiques) et des discontinuités tectoniques préexistantes (failles) par où s'écoulent les eaux.



11. REPRISE DU CONCRETIONNEMENT sur le plan de cassure d'une stalagmite de la grotte de Rialb. La grotte est située dans la zone épiscopale du séisme de 1428 en Catalogne. Les géologues tentent de dater l'âge de la cassure.

Les perturbations engendrées dans le karst par des événements sismiques affectent une structure à géométrie connue à un moment donné de l'évolution karstique. Le cas le plus favorable à ce type d'étude est une galerie fossile, horizontale, riches de dépôts divers, dont le concrétionnement est encore actif. Le rejeu brutal le long d'une faille recoupée par le réseau peut provoquer un décalage de la section de la galerie, comme dans la grotte de Tavel, en Languedoc.

En Lombardie, dans le réseau de Virginia Macchi, c'est un joint de stratification, remobilisé en faille inverse par un séisme postérieurement à la genèse de la conduite forcée, qui décale la galerie. Le rejet de la faille est visible dans le vide karstique, associé à un écaillage frais de la paroi. À Trieste, la «Grotta del guano» a enregistré des mouvements néotectoniques compressifs qui ont décalé la voûte de la galerie et les cupules de corrosion.

Le rejeu tectonique en décrochement à composante verticale peut décaler la discontinuité initialement empruntée par la karstification. Le rejet est alors

visible le long de la galerie. Ce type de mouvement a été signalé dans le massif karstique suisse de Sieben Hengste par P.-Y. Jeannin (Université de Neuchâtel) ou dans la grotte d'Arphilia, dans les Pyrénées-atlantiques (Pierre-Saint-Martin), où une faille recoupe postérieurement une galerie sèche sans respecter les orientations préalables des vides karstiques.

Les mouvements sismiques de failles et les ondes sismiques associées déplacent les masses au sein de la cavité. Dans la grotte du Père Noël, en Belgique, apparaissent des effondrements de blocs de la voûte, des chutes de colonnes stalagmitiques et de blocs en équilibre critique, des cônes d'éboulis frais non stabilisés et des écaillages sur les discontinuités tectoniques remobilisées.

La plupart de ces observations ont été réalisées dans des zones où se sont produits des séismes déjà connus et référencés dans les catalogues historiques. Les datations précises des anomalies ont validé la méthode. L'objectif des géologues est maintenant d'appliquer cette approche de la paléosismicité à des régions où aucun séisme historique n'est recensé.

Les concrétions des grottes sont un sujet d'analyse subtil : les découvertes de grottes, dont la fréquence est amplifiée par le développement de la spéléologie, amènent une matière nouvelle qu'il est passionnant – et utile d'étudier.

Paul DUBOIS est ingénieur géologue, ancien Directeur de l'Exploration à Elf-Aquitaine, membre associé du comité des applications de l'Académie des Sciences. Bertrand GRELLET est docteur en géologie, responsable du secteur Recherche et Développement de la Société GEOTER, à Montpellier. L'identification des paléoséismes à travers l'analyse des déformations en grottes est une des techniques développées au sein de cette société en collaboration avec le Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations nucléaires de l'IPSN et le Laboratoire des sciences géographiques et de l'aménagement de l'Université de Provence (J.-L. Guendon et P. Ambert).

L'essentiel des données et documents photographiques présentés dans cet article a été acquis à la grotte de Clamouse, près de Montpellier. Clamouse, qui présente une extraordinaire richesse et une diversité de concrétions de calcite et d'aragonite est actuellement la cavité souterraine de France la plus étudiée par carottage, datations et prélèvements automatiques d'eau de percolation. Sont associées à ces recherches des équipes de chercheurs français et étrangers, parmi lesquels Y. Quinif (Faculté polytechnique de Mons, Belgique), S. Frisia et A. Borsato (Musée Trentin de sciences naturelles, Trente, Italie), A. Bini (Département de sédimentologie, Fac. des sciences, Milan, Italie), F. McDermott (Univ. de Dublin), P. Audra (Département de géographie, Univ. de Nice), J.-J. Delannoy (Département de géographie, Univ. de Grenoble).

A. BINI, Y. QUINIF, O. SULES et A. UGGERI, *Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie)*, in *Karstologia*, n° 19, pp. 23-30, 1992.

P. DELANGE, *Étude de la néotectonique dans l'endokarst : exemple de la moyenne Durance*, DEA Univ. de Provence, 1995.

P. FORTI et D. POSTPISCHL, *Seismotectonics and Radiometric Dating of Karst Sediment*, in *Proceedings of the Workshop on Historical Seismicity of Central Eastern Mediterranean Region*, Enea Cre Casaccia, pp. 320-333, 1998.

D. GENTY, *Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites*, in *C.R. Acad. Sci.*, tome 317, série II, pp. 1229-1239, 1993, Paris.

A. LEVRET, Ph. COMBES et Th. GRANIER, *Sismicité et archéologie : une approche pluridisciplinaire*, Actes du colloque Génie parasismique et aspects vibratoires dans le génie civil, AFPS, pp. 19-27, 1996.

Y. QUINIF, D. GENTY et R. MAIRE, *Les spéléothèmes : un outil performant pour les études paléoclimatiques*, in *Soc. Géol.*, tome 165, n° 6, pp. 603-612, 1994, France.

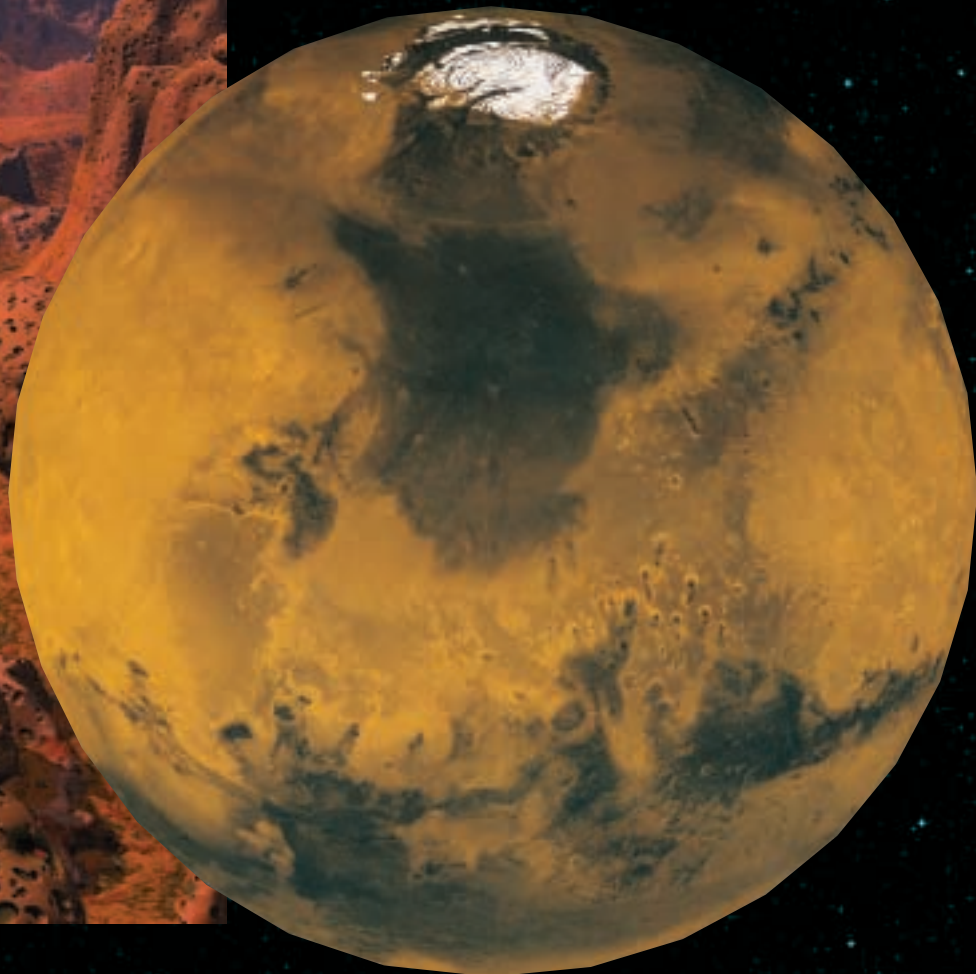
Les changements climatiques sur Mars

JEFFREY KARGEL • ROBERT STROM

Mars, planète aujourd'hui sèche et gelée, aurait autrefois été couverte de rivières, d'océans et de glaciers. A-t-elle abrité la vie ?



1. AUJOURD'HUI LA SURFACE DE MARS est sèche : la mosaïque d'images prises par des sondes spatiales en orbite (*ci-dessous*) révèle que la faible quantité d'eau contenue dans la mince atmosphère martienne se condense souvent en givre, particulièrement près du pôle Nord (*zone blanche*), où elle forme une calotte de glace permanente. La région polaire australe, où les températures sont inférieures, serait couverte en grande partie de dioxyde de carbone gelé. Un paysage martien typique (*à gauche*) ne présenterait donc aucune trace d'eau, sauf peut-être quelques plaques de givre ou des vallées creusées par des écoulements passés.



En août 1996, des planétologues de la NASA annoncent qu'une météorite originaire de Mars porte des traces de vie extraterrestre fossile. Le président des États-Unis célèbre la découverte, et la NASA envisage de modifier son programme d'exploration de Mars afin d'accélérer le retour sur Terre de roches martiennes. C'est ainsi une vieille histoire qui recommence : au début de ce siècle, l'astronome américain Percival Lowell avait vu sur Mars, au télescope, un vaste réseau de canaux bordés de végétation et avait convaincu le public de l'époque que les conditions climatiques à la surface de cette planète devaient ressembler à celles qui règnent sur Terre.

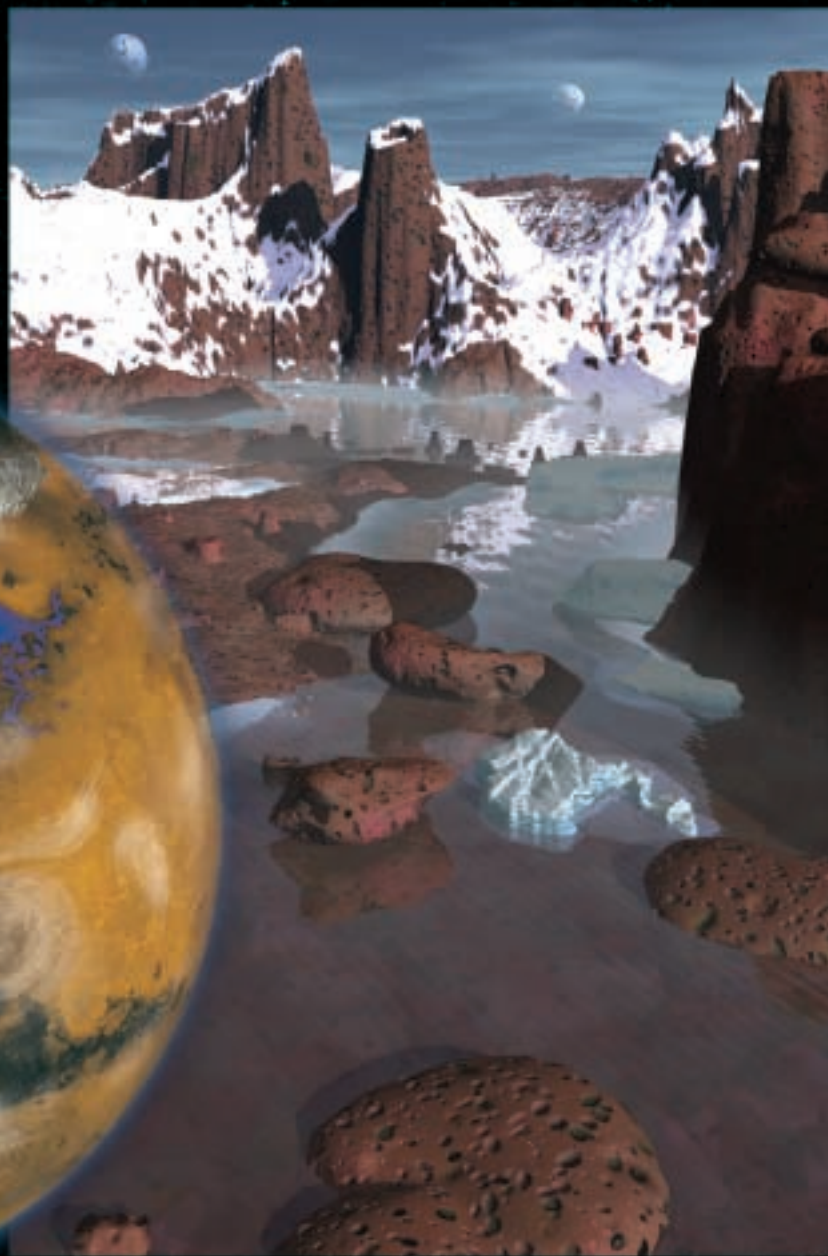
Le survol de Mars par les trois sondes *Mariner*, dans les années 1960, avait toutefois mis un terme à ces suppositions : l'environnement actuel de Mars est hostile à la vie.

Les quelques images floues qui avaient été retransmises par les sondes *Mariner* étaient beaucoup plus précises que les observations de Lowell. Elles ne montraient ni canaux, ni eau, ni végétation, mais une surface couverte de cratères. En outre, l'atmosphère de Mars est ténue : à la surface de la planète, la pression de ce voile gazeux, surtout composé de dioxyde de carbone, est inférieure à 1 000 pascals, soit 100 fois inférieure à la pression atmosphérique terrestre au niveau de la mer.

Son éloignement du Soleil (la distance entre Mars et le Soleil est 1,5 fois celle entre la Terre et le Soleil) et la minceur de son atmosphère font de Mars une planète glacée. En surface, la température moyenne est de -60°C à l'équateur et de -123°C près des pôles. Aux latitudes tropicales, sur les versants exposés au Sud, l'eau gelée atteint parfois 0°C à la mi-journée, en plein été, lorsque le rayonnement solaire l'a suffisamment chauffée, mais elle s'évapore alors rapidement, à cause de la faible pression atmosphérique, sans passer par l'état liquide.

Bien que l'atmosphère contienne ainsi une petite quantité d'eau, et que des nuages de glace d'eau se forment

2. DANS LE PASSE, MARS a été temporairement entourée d'une épaisse atmosphère qui a réchauffé la planète par effet de serre et a créé des conditions propices à la fonte du sol gelé. De l'eau se serait alors écoulée en surface et accumulée dans des lacs et dans des mers (*ci-dessous*). Certaines de ces étendues d'eau auraient été couvertes par une banquise (*zones blanches*) ou assombries par des sédiments en suspension (*panaches rouges*). Le paysage de la page précédente aurait été bien différent (*à droite*) si de l'eau liquide avait été présente à la surface de la planète.



parfois, les principaux phénomènes météorologiques martiens sont des tempêtes de poussières ou de dioxyde de carbone. L'hiver, un blizzard de dioxyde de carbone gelé balaie le pôle : quelques mètres de cette neige sèche s'y accumulent, tandis que le dioxyde de carbone gelé de la calotte polaire de l'autre hémisphère s'évapore dans l'atmosphère.

Le climat de Mars n'a pas toujours été aussi froid et sec. Les nombreuses données obtenues par les missions *Mariner* et *Viking* (dans les années 1970) indiquent que l'histoire climatique de la planète a été ponctuée d'épisodes relativement chauds ; à certaines époques, d'énormes volumes d'eau se sont librement écoulés en surface.

Des coulées de boue

La plupart des cratères anciens sont érodés, contrairement aux cratères lunaires. En revanche, les grands cratères jeunes sont généralement ceints de structures analogues à des coulées de boue : on suppose que la chute d'astéroïdes ou de comètes a fondu une partie du pergélisol (sol gelé saturé

d'eau), et que le cratère ainsi formé aurait atteint une nappe phréatique d'eau liquide.

Toutefois, les cratères martiens ne sont pas tous entourés de coulées boueuses. Les plus petits ressemblent à leurs cousins lunaires, avec de simples traînées de matière sèche éparpillées autour d'eux. Seuls les cratères d'un diamètre supérieur à quatre kilomètres environ près de l'équateur et supérieur à un kilomètre près des pôles ont une couronne de coulées boueuses fossiles. Pourquoi cette différence ? Parce que la couche de surface sans glace est plus épaisse près de l'équateur (elle atteint 800 mètres) que près des pôles : sous les tropiques martiens, la chaleur abaisse le niveau qui sépare l'eau gelée de l'eau liquide, dans le sous-sol. Ainsi, près de l'équateur, seul un corps très gros peut former un cratère assez grand qui creuse la couche supérieure sèche, réchauffer le pergélisol sous-jacent et libérer un torrent de boue.

Les planétologues ont trouvé plusieurs confirmations de l'existence d'eau gelée dans le sol. Notamment, ils ont observé que des paysages de Mars ressemblent à des paysages ter-

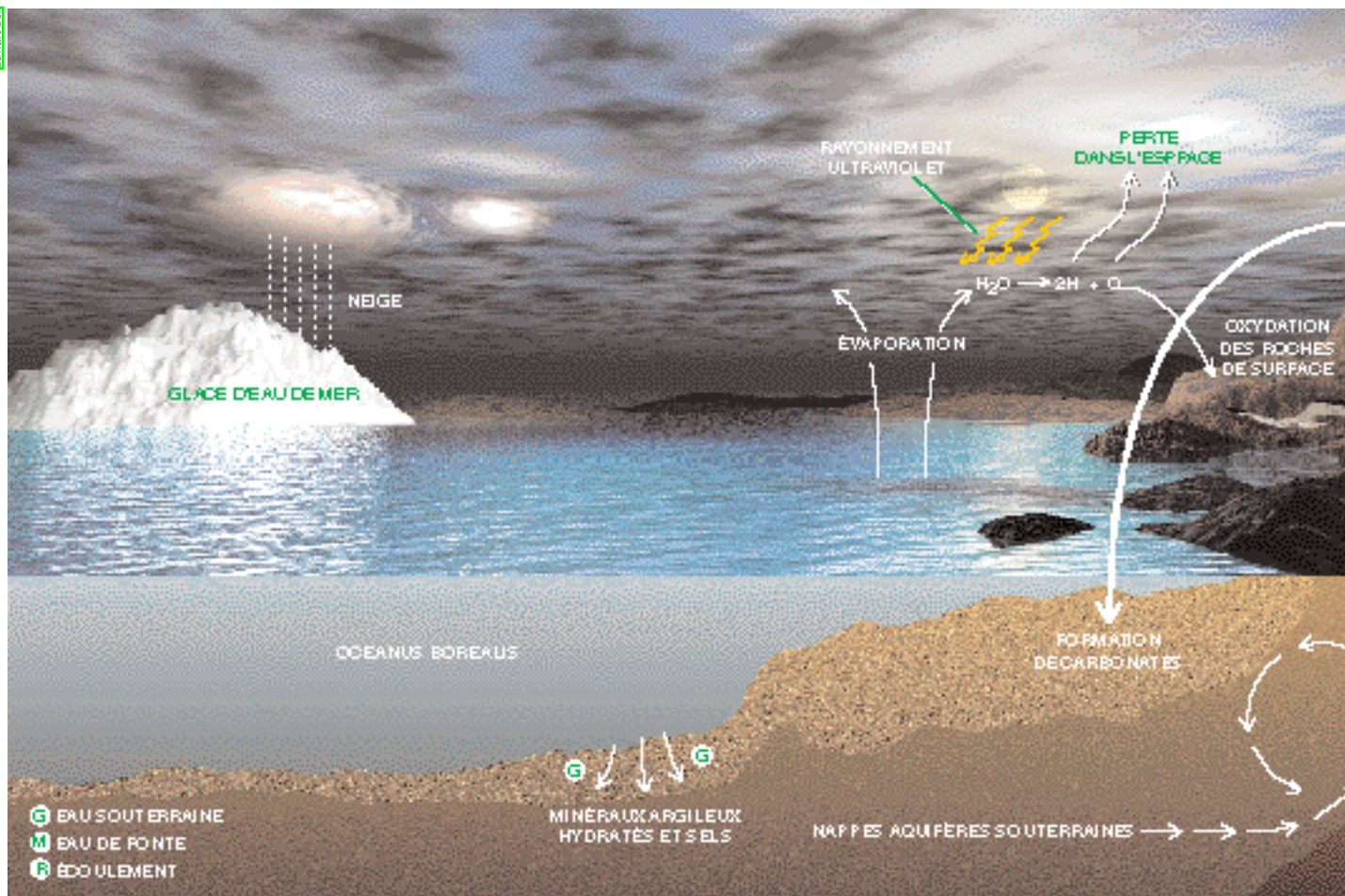
restres façonnés par les glaciers, avec des moraines déposées à la lisière de fonte des glaciers et des eskers, lignes sinueuses de sable et de gravier déposées par des cours d'eau circulant sous les glaciers (voir la figure 6). Des terrains grêlés ressemblent au thermokarst terrestre, qui se forme lorsque la fonte de la glace contenue dans le sous-sol peu profond provoque l'effondrement de la surface en trous et en canyons. Les tabliers rocheux couverts de débris que l'on aperçoit sur les flancs de certaines montagnes martiennes seraient des glaciers jonchés de décombres ou, plus vraisemblablement, des «glaciers rocheux» semblables à ceux du massif alpin et des Vallées sèches de l'Antarctique. La forme caractéristique de ces pentes résulte de milliers de cycles de gel et de dégel, qui font lentement glisser le mètre supérieur de terrain, gorgé d'eau, ou d'un lent glissement de la glace.

De surcroît, des vallées sinueuses, larges d'un kilomètre et longues de plusieurs centaines de kilomètres, forment de vastes réseaux. Elles auraient été formées par des écoulements d'eau. D'autres vallées martiennes ont des

3. LE CYCLE DE L'EAU, sur Mars, au cours des périodes humides. Une atmosphère épaisse transportait probablement une bonne partie de l'eau évaporée des lacs et des mers. La vapeur d'eau se condensait ensuite en nuages et précipitait. Cette pluie ruisselait à la surface

de la planète et s'infiltrait dans le sol. La neige formait des glaciers, qui devaient alimenter des lacs glaciaires. Une circulation hydrothermale, associée peut-être à des sites volcaniques, apportait en surface l'eau de réservoirs souterrains profonds.

Edwatt Bai



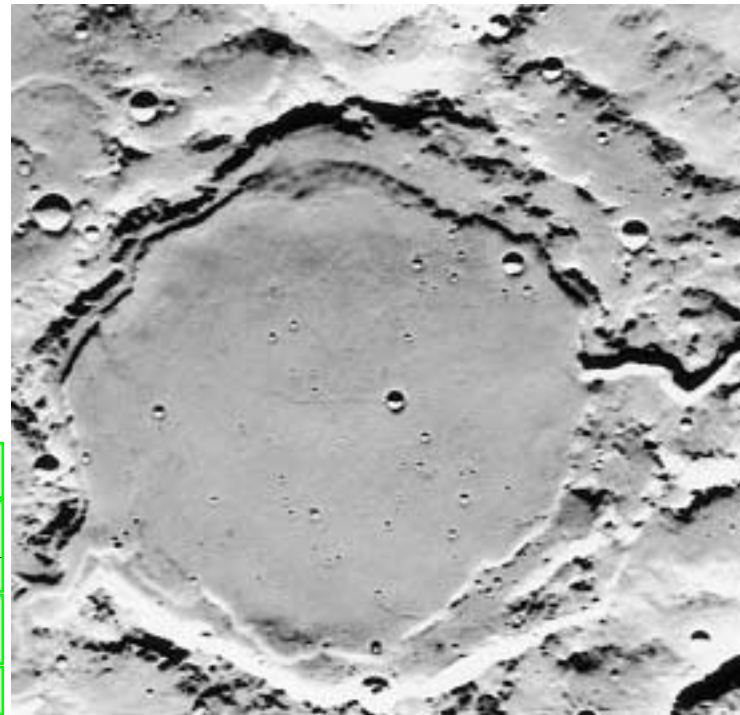
ouvertures émoussées et des affluents courts, caractéristiques d'une érosion par de nombreuses sources. Ce phénomène, fréquent sur la Terre, résulte de l'écoulement de l'eau, qui lessive les roches et le sol, comme sur une plage où la mer se retire. Ces écoulements assez réguliers ont eu lieu jusqu'à il y a 3,8 milliards d'années.

Les photographies révèlent aussi d'énormes chenaux d'écoulement plus récents, dont certains s'étendent sur plus de 200 kilomètres de large et plus de 2 000 kilomètres de long. Ils partent de «terrains chaotiques», encombrés par de gros blocs qui se seraient effondrés après une résurgence d'eau souterraine. L'écoulement vio-

lent de cette eau a creusé les chenaux, découpant des îles effilées de plus de 100 kilomètres de long et creusant des fondrières de plusieurs centaines de mètres de profondeur. Des structures semblables, mais plus petites, se forment sur la Terre : en Islande, l'inondation catastrophique consécutive à l'éruption d'un volcan sous un

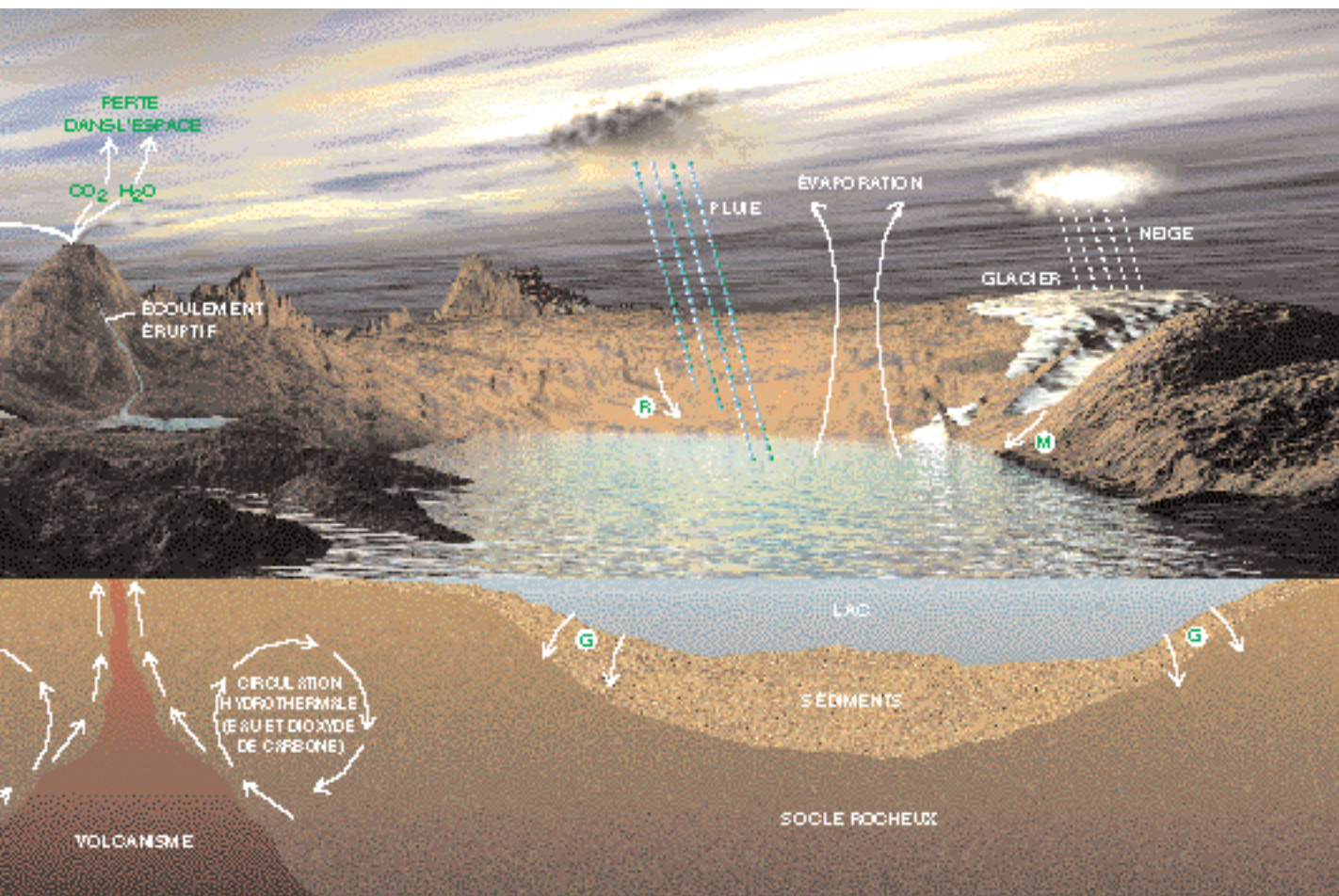


Byrth Robertson, Geological Survey of Canada



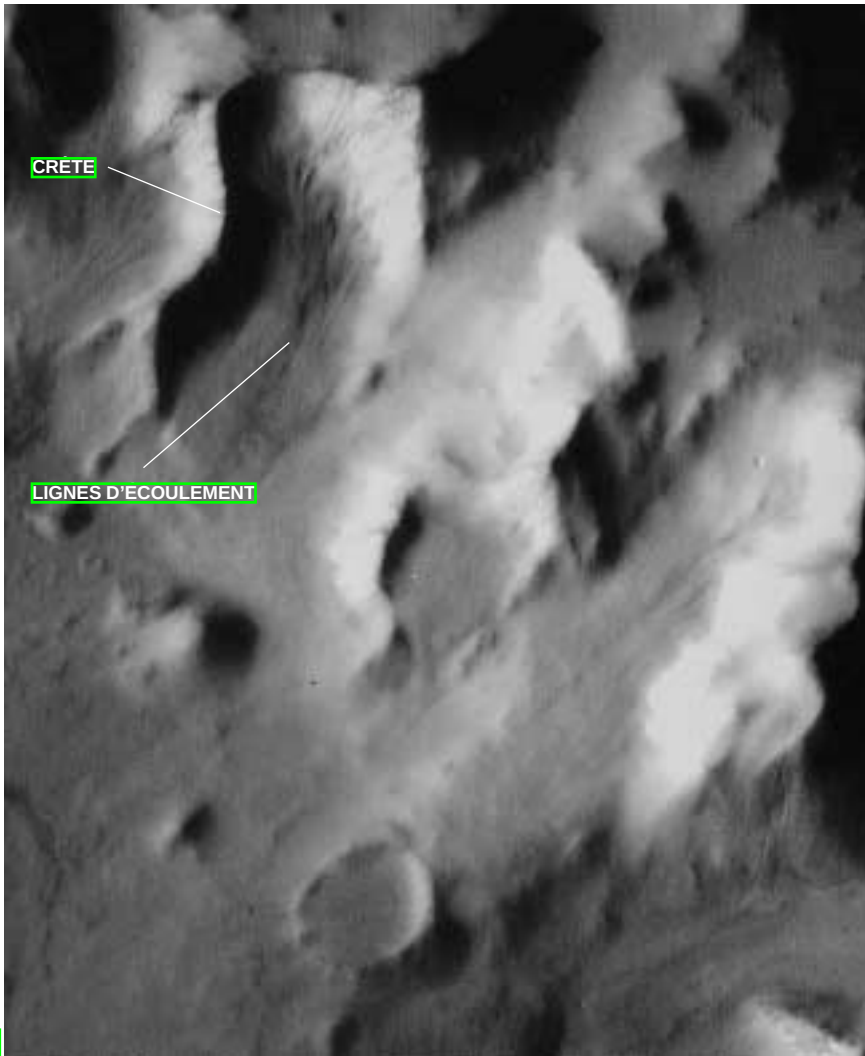
National Aeronautics and Space Administration

4. DES LACS DE CRATÈRES se forment, sur la Terre, dans des dépressions creusées par les impacts d'astéroïdes ou de comètes. Le cratère du Nouveau Québec (ci-dessus) est un tel lac. On suppose que le cratère à fond lisse observé sur les plateaux martiens (à droite) a aussi été empli d'eau, car il présente à la fois un dépôt en terrasse (en bas, à gauche) et un chenal d'écoulement profondément incisé (à droite).





Valley's Karoo



NASA

5. CE GLACIER ROCHEUX (à droite), en Alaska, s'effondre à partir d'une dépression semi-circulaire caractéristique des montagnes sculptées par les glaciers. Il ressemble beaucoup à certaines structures de Mars (à droite), où des lignes d'écoulement longitudinales émergent des crêtes montagneuses incurvées.

glacier laisse un champ semblable de vallées et de chenaux.

Selon la géométrie des chenaux d'écoulement martiens, l'eau qui les a creusés s'écoulait à plus de 250 kilomètres à l'heure. Elle aurait pu former un océan de 150 mètres de profondeur sur toute la planète (l'eau ne s'est toutefois pas écoulée en une seule fois). Cette énorme quantité d'eau provenait-elle d'un lac profond situé dans Valles Marineris, une région de Mars partiellement tapissée de couches sédimentaires qui semblent être d'anciens dépôts lacustres? Ou d'un grand réservoir, sous le pergélisol, qui aurait été réchauffé par la chaleur interne de la planète?

L'écoulement de cette eau souterraine aurait commencé après que le pergélisol qui la surmontait s'était aminci et affaibli : la cause de cet amincissement? Il n'en manque pas : réchauffement climatique, éruption volcanique, soulèvement tectonique, impact d'une météorite, séisme... Le dioxyde de carbone qui saturait l'eau souterraine aurait alors jailli en énormes geysers, dès l'apparition en surface, tel un gigantesque siphon d'eau de Seltz qui a dû déstabiliser les couches souterraines. Ce mécanisme explique la formation de terrains chaotiques, les inondations et les coulées de boues d'une ampleur rarement égale sur la Terre.

Mers et océans

Des réseaux de vallées qui s'étendent sur certaines hautes terres de Mars débouchent sur des dépressions tapissées de sédiments. Ces plaines auraient été couvertes d'eau. Les plus grands de ces lacs martiens remplissaient deux gigantesques bassins d'impact, Hellas et Argyre.

Selon plusieurs équipes, les inondations répétées des chenaux d'écoulement se vidèrent, au Nord, dans une succession de lacs et de mers temporaires. De nombreuses caractéristiques des bords de ces anciens bassins marqueraient les endroits où les glaciers se jetaient. D'épaisses couches sédimentaires déposées dans ces mers recouvriraient aujourd'hui la plus grande partie des plaines septentrionales. Le volume de l'une des plus grandes mers septentrionales de Mars aurait été équivalent à ceux du golfe du Mexique et de la Méditerranée réunis.

Un océan martien a peut-être aussi existé. Dès 1973, Henry Faul, de l'Université de Pennsylvanie, l'a proposé dans un article au titre romantique : *La falaise de Nix Olympica*. Les observations disponibles à l'époque n'ont convaincu aucune revue scientifique de le publier, mais les informations acquises durant les missions *Viking* lui ont redonné du crédit.

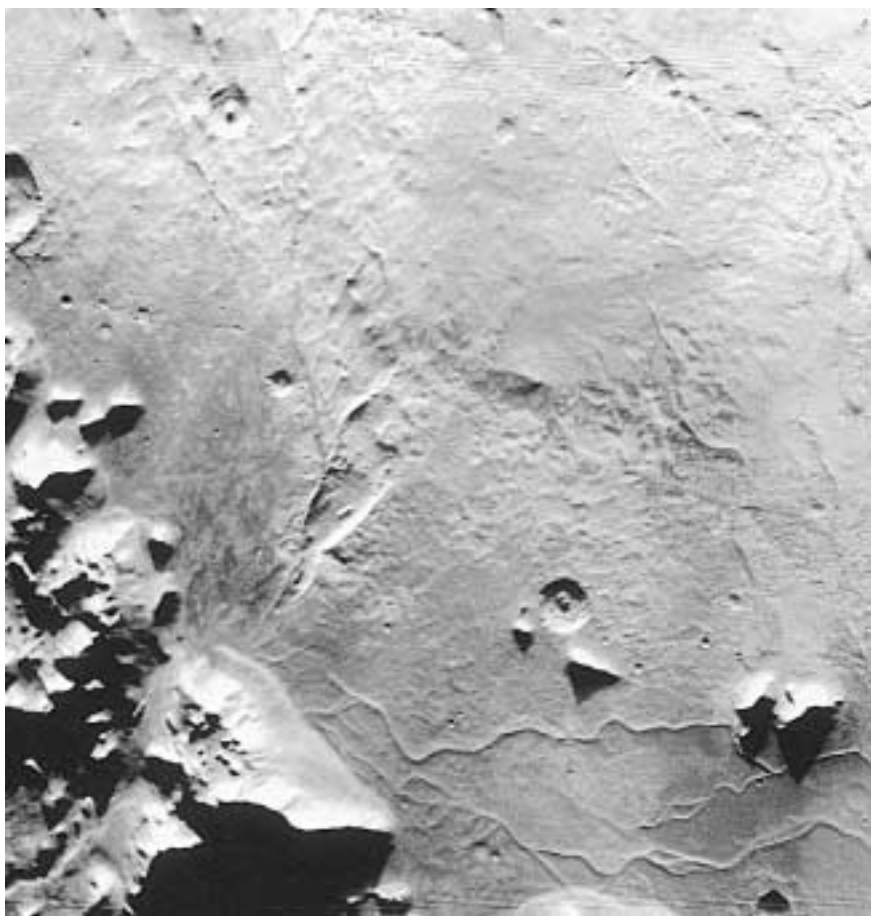
Ainsi, en 1989, Timothy Parker et ses collègues du Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena observèrent que de nombreuses formations, dans les plaines nordiques, paraissaient résulter d'une érosion côtière et reformulèrent l'hypothèse d'un océan septentrional, en la cachant derrière le titre banal de *Morphologie de transition dans la région occidentale Deuteronilus Mensae de Mars : conséquences pour la modification de la limite entre les basses et les hautes terres*. Le titre de leur article suivant, *Géomorphologie côtière des plaines septentrionales de Mars*, était plus explicite. Nous avons nommé *Oceanus Borealis* cet océan qui couvrirait probablement une superficie quatre fois supérieure à celle de l'océan Arctique, et nous avons proposé un modèle des cycles de l'eau sur Mars qui prend en compte cet océan. La plupart des planétologues admettent aujourd'hui que de vastes étendues d'eau se sont formées périodiquement dans les plaines septentrionales de Mars, mais peu acceptent qu'il y ait eu un véritable océan. Selon certains, il ne s'agissait que d'un océan de boue.

La nature des roches martiennes témoigne aussi de la présence passée d'eau sur la planète : de la Terre, la spectroscopie de Mars révèle la présence de minéraux argileux, et les deux sondes *Viking* qui se posèrent sur Mars découvrirent que le sol contient de 10 à 20 pour cent de sels. Les roches martiennes, comme les roches terrestres, forment des minéraux argileux et des sels par des réactions chimiques en présence d'eau.

Comment étudier ces roches ? En recueillant des roches martiennes qui ont été éjectées dans l'espace par les impacts d'astéroïdes ou de comètes et qui sont ensuite tombées sur la Terre. Selon Allan Treiman, de l'Institut d'études lunaires et planétaires de Houston, et James Gooding, de la NASA, des minéraux de certaines de ces météorites sont altérés chimiquement en présence d'eau salée froide, alors que d'autres le sont par des solutions hydrothermales



Bradford Washburn avec l'aimable autorisation de Panopticon Gallery



USGS

6. LES ESKERS sont des rides sinueuses, composées de sable et de gravier, qui sont déposées par les cours d'eau qui coulaient sous une couche de glace. Ils décorent le paysage près de la pointe d'un glacier dans la vallée de Tasnuna, en Alaska (*en haut*). Des eskers semblent aussi exister au fond du bassin d'Argyre, sur Mars (*en bas*), indiquant que des glaciers en fusion ont jadis couvert la région.

La procession des sondes martiennes

Huit programmes scientifiques d'exploration de Mars sont en cours ou en préparation (la mission russe *Mars '96* s'est perdue lors de son lancement, le 16 novembre 1996). La première sonde *Mars Global Surveyor* (ci-dessous, en haut) a été lancée le 5 novembre 1996 ; au cours de l'été 1997, elle se placera en orbite autour de Mars et dressera une carte précise de la surface.

Le 4 décembre 1996, la NASA a lancé *Mars Pathfinder*, qui se posera dans l'embouchure d'un ancien chenal d'écoulement, le 4 juillet 1997. Cet «amarsissage» se déroulera 21 ans, jour pour jour, après l'arrivée de *Viking 1* sur la planète rouge. *Mars Pathfinder* libérera un petit véhicule à six roues (ci-dessous, en bas) qui explorera les environs immédiats de la sonde.

Au cours des dix prochaines années, quatre vaisseaux spatiaux se placeront en orbite autour de Mars, et quatre sondes devraient se poser sur la planète (calendrier à droite). Une mission de récupération d'échantillons était prévue pour 2005,



Avec l'amable autorisation du Jet Propulsion Laboratory

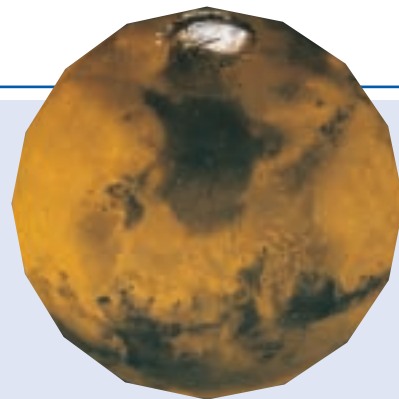
MARS SURVEYOR est ici en cours de préparation.

mais, après la découverte de possibles traces microscopiques de vie martienne, la NASA envisage d'accélérer ce projet. Une telle mission est toutefois techniquement complexe : la sonde transporterait assez d'hydrogène comme combustible pour le voyage de retour, mais elle devrait se réalimenter en oxygène, sur Mars : elle dissocierait le dioxyde de carbone, abondant et facilement accessible dans les dépôts gelés.



Avec l'amable autorisation du Jet Propulsion Laboratory

CE ROBOT MOBILE explorera la surface de Mars.



Calendrier des missions vers Mars

5 novembre 1996 (États-Unis)

Mars Global Surveyor

La NASA a envoyé un vaisseau spatial qui se placera en orbite autour de Mars et effectuera un relevé de la surface de la planète. Il arrivera en juillet 1997.

4 décembre 1996 (États-Unis)

Mars Pathfinder

Cette sonde se posera dans un ancien chenal d'écoulement le 4 juillet 1997 ; elle libérera un robot mobile qui explorera le site.

1998-1999 (États-Unis)

Mars Surveyor

Une sonde en orbite poursuit les observations en insistant sur la localisation des dépôts isolés de dioxyde de carbone en surface. Un module explore la région polaire australe.

1998-1999 (Japon)

Planète B

Un satellite explore la haute atmosphère de Mars.

2001 (États-Unis)

Mars '01

Un satellite et un module poursuivent des études de la surface de Mars.

2001 (Russie)

Mars '01

Un ou plusieurs modules, avec peut-être des véhicules mobiles, explorent la surface.

2003 (États-Unis)

Mars '03

Un satellite restera en orbite et une sonde se posera pour explorer des régions qui pourraient avoir abrité la vie.

2005 (États-Unis)

Mars Surveyor '05

Un vaisseau spatial se posera, recueillera des échantillons et les rapportera sur Terre.

plus chaudes. Ils en déduisent que Mars a eu un climat relativement chaud et humide, et que des sources chaudes auraient jailli à sa surface.

Le climat martien a-t-il un jour été propice à la vie? L'équipe de David McKay, de la NASA, a répondu positivement à cette question après avoir découvert, dans les fissures d'une météorite martienne de 3,5 milliards d'années, des composés organiques, des carbonates, des sulfures de fer et de la magnétite dont ils attribuent la formation à l'activité de micro-organismes. Ces conclusions sont toutefois vigoureusement contestées.

Le destin de l'eau

Qu'est devenue l'énorme quantité d'eau qui a un jour coulé à la surface de Mars? Une partie peut s'être infiltrée dans le sous-sol et avoir gelé dans le pergélisol; une autre peut s'être figée sur place (elle serait cachée sous un manteau de poussière et de sable, sur la majeure partie du sol des plaines septentrionales); une autre encore peut s'être évaporée, avant de se perdre dans l'espace ou de retomber en neige aux pôles.

Indépendamment, des physiciens ont étudié les isotopes de l'hydrogène dans la vapeur d'eau martienne et ils ont conclu que des quantités considérables de vapeur d'eau se sont échappées dans l'espace au cours du temps. Ce résultat théorique s'accorde avec la détection, par des sondes spatiales soviétiques, d'atomes d'oxygène et d'hydrogène (provenant de la dissociation de la vapeur d'eau par le rayonnement solaire) qui s'éloignent de Mars. La perte continue de ces éléments signifie qu'à une époque Mars contenait assez d'eau pour remplir Oceanus Borealis.

L'eau n'est pas la seule substance perdue par Mars : le dioxyde de carbone qui s'en est échappé aurait constitué une épaisse atmosphère, responsable d'une pression en surface trois fois supérieure à celle qui existe à la surface de la Terre. L'effet de serre créé par ce gaz aurait alors réchauffé la plupart de la surface de Mars au-dessus de 0 °C. C'est un élément supplémentaire en faveur de l'hypothèse d'un climat martien passé plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui.

Quand et pendant combien de temps ce climat chaud et humide a-t-il régné sur Mars? Plusieurs périodes de réchauffement se seraient produites : la perte continue d'eau et de dioxyde

de carbone font supposer que le premier milliard d'années de l'existence de Mars fut relativement chaud et humide, mais certaines périodes chaudes seraient plus récentes. Selon Timothy Swindle, de l'Université d'Arizona, les minéraux d'une météorite martienne produits par altération aqueuse se seraient formés il y a 300 millions d'années à peine (avec toutefois une grande incertitude).

Si la morphologie martienne a été produite par des glaciers comme ceux qui existaient lors des périodes glaciaires terrestres, alors les conditions climatiques se sont maintenues quelques milliers d'années, mais pas plus d'un million d'années : notamment, elles n'ont pas duré assez pour que l'érosion efface les cratères d'impacts météoritiques, comme sur Terre. S'il n'y a pas eu d'érosion glaciaire généralisée, ces durées doivent être multi-

pliées par 10 ou par 100. En outre, au tout début de l'histoire de la planète, il y a quatre milliards d'années, avant la formation des cratères visibles aujourd'hui, l'érosion a pu durer plus longtemps, lissant le visage de Mars. En entrant dans l'âge mûr, ce visage est devenu froid, sec et grêlé, rajeuni seulement en certains endroits par de courtes périodes plus chaudes.

Mécanique céleste

D'où proviennent ces variations climatiques? Peut-être des variations de l'obliquité, c'est-à-dire de l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la perpendiculaire au plan orbital. L'obliquité de Mars, comme celle de la Terre, est aujourd'hui d'environ 24 degrés. Jacques Laskar et Philippe Robutel, du Bureau des longitudes, ont calculé que cette inclinaison peut varier suivant



Avec l'aimable autorisation de Victor E. Ske



NASA

7. DES COLLINES EN FORME DE LARME, sculptées par les inondations du lac glaciaire Misoula, apparaissent dans le sol parsemé de vallées et de chenaux de l'Est de l'État de Washington (en haut). De telles collines effilées parsèment le fond des vastes chenaux d'écoulement sur Mars, se formant communément derrière des bords surélevés de cratères (en bas).

Quelle vie sur Mars?

La présence de vie sur Mars a toujours suscité des débats passionnés, de Percival Lowell qui y voyait des canaux aux scientifiques de la NASA qui jouent sur la corde «vie extraterrestre» pour obtenir des crédits du Congrès des États-Unis. Mars est une planète riche en eau : en surface et jusqu'à quelques kilomètres de profondeur, cette eau est aujourd'hui exclusivement sous forme de glace ou de vapeur. Des formations géologiques montrent que de l'eau liquide coulait, voire stagnait (dans des mers et dans des lacs), à la surface de Mars jusqu'il y a 3,5 milliards d'années. Le climat martien, s'est ensuite refroidi : l'effet de serre a diminué parce que la faible gravité martienne a mal retenu le dioxyde de carbone. Mars a été mis au "congélateur" depuis 3,5 milliards d'années.

Il y a 4 à 3,5 milliards d'années, la vie est née et a prospéré sur Terre sous la forme d'êtres primitifs, telles des bactéries. Les «ingrédients» nécessaires à la formation de cette vie semblent être l'eau liquide, des molécules organiques (présentes en abondance dans les comètes et dans les météorites) et des argiles. Comme ces ingrédients existaient simultanément sur Mars, il est raisonnable de penser que, les mêmes causes produisant les mêmes effets, une vie primitive y soit apparue. Ces formes de vie auraient été congelées en même temps que l'eau : les roches mar-

tiennes contiennent peut-être des traces fossiles de cette vie primitive.

Il n'est pas totalement impossible que des formes de vie subsistent sur Mars, mais elles seraient congelées ou réfugiées dans les couches profondes de la planète (à plus de cinq kilomètres), où l'activité géothermique maintient l'eau à l'état liquide. Toutefois ces formes de vie ne seraient pas beaucoup plus évoluées que celles que portait la Terre il y a 3,5 milliards d'années. Bien que les modèles de mouvement chaotiques de l'axe des pôles indiquent que Mars se serait brièvement réchauffé à plusieurs reprises depuis 3,5 milliards d'années, nous n'avons pas de preuves formelles de tels réchauffements. De toute façon, la durée cumulée de ces réchauffements n'aurait pas été très longue et n'aurait pas permis une évolution vers des êtres complexes. En outre, selon certains astronomes, la vie n'a évolué sur la Terre que grâce à la Lune, qui empêche les mouvements chaotiques de l'axe de rotation de la Terre et qui évite que le climat terrestre subisse des variations trop brusques ou trop importantes. Cette stabilité climatique est évoquée pour expliquer l'évolution vers les formes complexes qui demandent du temps et une relative continuité des conditions. Sur Mars, est-il raisonnable de proposer que les mêmes causes aient produit des effets inverses?

Pierre THOMAS, ENS de Lyon

une dynamique chaotique, avec des transitions parfois rapides, qui atteignent 60 degrés tous les dix millions d'années environ. En outre, la direction de l'inclinaison et la forme de l'orbite de Mars varient cycliquement avec le temps.

Ces variations et, notamment, les grands basculements de l'axe de rotation provoqueraient des extrêmes saisonniers de température. Pendant les périodes de forte obliquité, même avec la mince atmosphère actuelle, les températures estivales aux hautes et moyennes latitudes martiennes seraient devenues positives jour et nuit, et les hivers auraient été encore plus rudes qu'ils ne le sont aujourd'hui.

L'atmosphère aurait été bouleversée par ce réchauffement estival de l'un des pôles : son épaissement, par l'évaporation de la calotte polaire réchauffée, ou de l'eau souterraine ou du pergélisol riches en dioxyde de carbone, aurait créé un effet de serre. De l'eau qui aurait alors coulé en surface aurait réagi chimiquement avec les roches, formant des sels et des roches calcaires, et le stockage du dioxyde de carbone atmosphérique dans ces calcaires aurait réduit ainsi l'effet de serre. Un retour à une obli-

quité inférieure aurait refroidi encore plus la planète ; la neige carbonique serait tombée en surface, amincissant davantage l'atmosphère et renvoyant Mars à son état glacial.

Les sondes automatiques qui visiteront Mars au cours de la prochaine décennie permettront de tester cette hypothèse. Les expéditions ont commencé en novembre 1996, avec le lancement d'une sonde américaine ; elles devraient s'achever en 2005 par le retour sur Terre de roches martiennes.

La sonde *Mars Surveyor*, qui est partie le 5 novembre 1996, se placera en orbite autour de Mars et photographiera la planète avec une résolution

de quelques mètres : sur des cartes topographiques détaillées, nous rechercherons des dépôts de glace, ainsi que de nouvelles traces d'anciens glaciers, lacs et rivières. La sonde *Mars Pathfinder*, qui est partie le 4 décembre 1996, se posera dans un chenal d'écoulement, encombré de roches, qui alimentait une ancienne mer. Elle libérera alors un petit véhicule, qui explorera les abords immédiats. Les informations rassemblées par ces prochaines missions nous donneront une image plus claire de l'aspect de Mars durant son dernier épisode de climat plus clément, il y a 3,5 milliards d'années ou peut-être moins.

Jeffrey KARGEL est membre de l'équipe d'astrogéologie de l'Institut géologique américain. Robert STROM est professeur à l'Université d'Arizona.

V.R. BAKER, R.G. STROM, V.C. GULICK, J.S. KARGEL, G. KOMATSU et V.S. KALE, *Ancient Oceans, Ice Sheets and the Hydrological Cycle on Mars*, in *Nature*, vol. 352, pp. 589-594, 15 août 1991.

J.S. KARGEL et R.G. STROM, *Ancient Glaciation on Mars*, in *Geology*, vol. 20, n° 1, pp. 3-7, janvier 1992.

J.S. KARGEL et R.G. STROM, *The Ice Ages*

of Mars, in *Astronomy*, vol. 20, n° 12, pp. 40-45, décembre 1992.

T.J. PARKER, D.S. GORSLINE, R.S. SAUNDERS, D.C. PIERI et D.M. SCHNEEBERGER, *Coastal Geomorphology of the Martian Northern Plains*, in *Journal of Geophysical Research E (Planets)*, vol. 98, n° 6, pp. 11061-11078, 25 juin 1993.

Sur le World Wide Web :
<http://cmex-www.arc.nasa.gov>
<http://mpfwww.jpl.nasa.gov>
<http://www.gpl.nas.gov/mgs>

Le système immunitaire des invertébrés

GREGORY BECK • GAIL HABICHT

Le système immunitaire de l'homme et celui des autres mammifères ont évolué pendant plusieurs centaines de millions d'années pour acquérir leur complexité.

En décembre 1882, un zoologue russe âgé de 37 ans, Élie Metchnikoff, fait une promenade décisive sur la plage de Messine, au Nord-Est de la Sicile : il récolte une larve transparente d'étoile de mer, il la rapporte chez lui et, là, il la perce avec une épine de rose. Le lendemain matin, il découvre de minuscules cellules qui recouvrent l'épine et qui tentent de l'engloutir.

Il comprend immédiatement que, pour défendre la larve, ces cellules essaient d'absorber l'envahisseur, de le phagocyter. On savait déjà que certaines cellules humaines phagocytent les bactéries, mais Metchnikoff comprend alors que la phagocytose est un mécanisme fondamental, qui défend toutes les créatures du monde animal contre les infections. Grâce à cette petite expérience et à toute une vie de recherches, Metchnikoff fonda l'immunologie cellulaire. Ce travail de pionnier lui valut de partager, en 1908, le prix Nobel de médecine avec Paul Ehrlich, le père de l'autre aspect de l'immunité, l'immunité humorale, fondée sur la production des anticorps.

Metchnikoff a été avisé de choisir une étoile de mer, car cet organisme n'a quasiment pas changé depuis son apparition, il y a plus de 600 millions d'années. Après l'avoir piquée, Metchnikoff observa une scène qui, en cette journée de 1882, ne différait guère de ce qu'elle aurait été, dans les eaux primitives de la Terre, des dizaines de millions d'années avant l'apparition des vertébrés.

Metchnikoff le savait, et ses travaux allaient montrer que les systèmes de

défense de tous les animaux actuels sont issus de ceux des créatures qui ont peuplé la Terre depuis l'apparition de la vie. Ainsi naissait l'immunologie comparée. En étudiant divers organismes, dont certains très anciens, les immunologistes ont vu sous un jour nouveau l'un des systèmes les plus complexes et les plus étonnants de ceux que l'évolution a façonnés : le système immunitaire de l'homme et des mammifères supérieurs. L'immunologie comparée précise également la nature de l'évolution : si les invertébrés représentent plus de 90 pour cent de toutes les espèces terrestres, c'est bien que leurs mécanismes de défense, réputés « primitifs », sont pourtant efficaces. Cette nouvelle façon d'aborder l'immunologie a également révélé plusieurs substances agissant sur le système immunitaire et qui semblent utilisables chez l'homme.

Les progrès récents de l'immunologie et la mise au point des nouveaux outils de biologie moléculaire et de biologie cellulaire marquent le second âge d'or de l'immunologie comparée. Ainsi, on commence à savoir comment fonctionnent les systèmes de défense immunitaire d'animaux aussi différents que les étoiles de mer, les insectes, les requins ou les grenouilles.

Les mécanismes immunitaires

Pour comprendre tous les détours évolutifs des systèmes immunitaires au cours des centaines de millions d'années passées, on doit savoir comment ils fonctionnent. Pour assurer

l'immunité d'un organisme, un système doit distinguer les cellules, les tissus et les organes de l'individu – le soi – et les éléments étrangers – le « non-soi » –, potentiellement présents. Ensuite, il doit éliminer ces envahisseurs, souvent des bactéries ou des virus. Enfin, il doit détecter et détruire le « soi altéré », c'est-à-dire les cellules ou les tissus modifiés par des blessures ou par des maladies, le cancer par exemple. Le système immunitaire des mammifères et, notamment, celui de notre espèce, semble être celui qui dépiste et élimine le mieux les micro-organismes étrangers.

Que se passe-t-il quand on se pique le doigt avec une épine de rose ? Dès que le sang cesse de perler, le système immunitaire est activé, pour éliminer les microbes qui se seraient introduits par la blessure. Des globules blancs phagocytaires, les macrophages, sont déjà sur place, ou y arrivent rapidement : ils ingèrent les microbes et les détruisent, et ils libèrent des protéines qui activent d'autres éléments du système immunitaire, alertant notamment d'autres cellules phagocytaires.

Ces réactions cellulaires rapides constituent ce que l'on nomme parfois l'immunité naturelle ou innée, car elles résultent de l'activité de cellules de défense, avant même qu'un micro-organisme étranger n'apparaisse. Tous les animaux ayant un dispositif de défense de ce type, c'est probablement la forme d'immunité la plus ancienne. C'est cette immunité innée que Metchnikoff a observée sur la larve d'étoile de mer qu'il a piquée.

Le «système du complément» est un autre élément de l'immunité innée. Il est composé d'une trentaine de protéines qui, dans le sang, se relaient pour identifier et anéantir les «envahisseurs». L'immunité innée suffit généralement à éliminer les microbes. En cas d'échec, l'immunité acquise des vertébrés se déclenche.

Les «soldats» de l'immunité acquise sont des globules blancs spécialisés : les lymphocytes. Circulant dans le sang et dans les ganglions lymphatiques, les lymphocytes sont normalement au repos, mais ils sont activés et se multiplient dès qu'ils rencontrent des antigènes, c'est-à-dire des molécules spécifiques des organismes étrangers. Il existe deux classes de lymphocytes : les lymphocytes *B* et les lymphocytes *T*. Les lymphocytes *B* fabriquent des anticorps, qui sont des protéines de défense qui s'associent aux antigènes et favorisent leur élimination. L'organisme humain abrite plus de 100 milliards de lymphocytes *B*, qui sécrètent chacun un anticorps particulier. Les lymphocytes *T* ont d'autres rôles : certains reconnaissent les cellules qui portent des molécules du «non-soi» et les tuent. D'autres aident les lymphocytes *B* à fabriquer des anticorps.

L'immunité acquise est très efficace, mais sa complexité est la cause de sa lenteur. Elle se déclenche quand le microbe envahisseur vient en contact avec les lymphocytes *T* ou *B* appropriés, et c'est alors que les macrophages sont activés et apportent leur assistance, que les lymphocytes activés se multiplient, que les globules blancs libèrent des protéines qui amplifient les réactions, et que les lymphocytes *B* libèrent des anticorps.

Toutefois, la mémoire immunitaire accélère ces événements ; elle résulte des mécanismes qui permettent aux lymphocytes de reconnaître d'innombrables anticorps, quand bien même chaque lymphocyte n'est spécifique que d'un seul type d'antigène. L'organisme garde le souvenir de toutes les rencontres avec des micro-organismes envahisseurs, lesquels laissent une «empreinte» génétique dans certains lymphocytes *B* et *T*. Quand ces cellules sont à nouveau en contact avec un micro-organisme déjà rencontré, elles déclenchent une réaction plus rapide et plus puissante que lors de la première rencontre. Ce phénomène est utilisé dans les rappels de vaccins que l'on fait aux enfants. Quand on se pique avec une rose, on l'oublie rapidement, mais le système immunitaire s'en souvient toujours.

Au commencement

Ainsi, le système de défense des vertébrés supérieurs, notamment des mammifères, est constitué d'une immunité innée et d'une immunité acquise. La mémoire immunitaire est une composante essentielle et spécifique de l'immunité acquise. Les réactions immunitaires sont déclenchées par divers agents : des macrophages et d'autres cellules phagocytaires, des lymphocytes *B* et *T*, des anticorps et de nombreuses protéines. Combien de ces éléments – ou d'éléments similaires – existaient déjà chez les organismes les plus anciens ?

De façon surprenante, on retrouve certaines composantes du système immunitaire chez presque tous les organismes vivants ; la phagocytose, par exemple, est un mécanisme protecteur très ancien. Certains éléments se sont transmis, au fil du temps, quasi inchangés, d'un organisme à un autre. D'autres éléments sont spécifiques des vertébrés supérieurs, mais ils ressemblent, par certains aspects, aux systèmes de défense des invertébrés. En raison de ces ressemblances, les immunologistes pensent que le système de défense des invertébrés a été un précurseur du

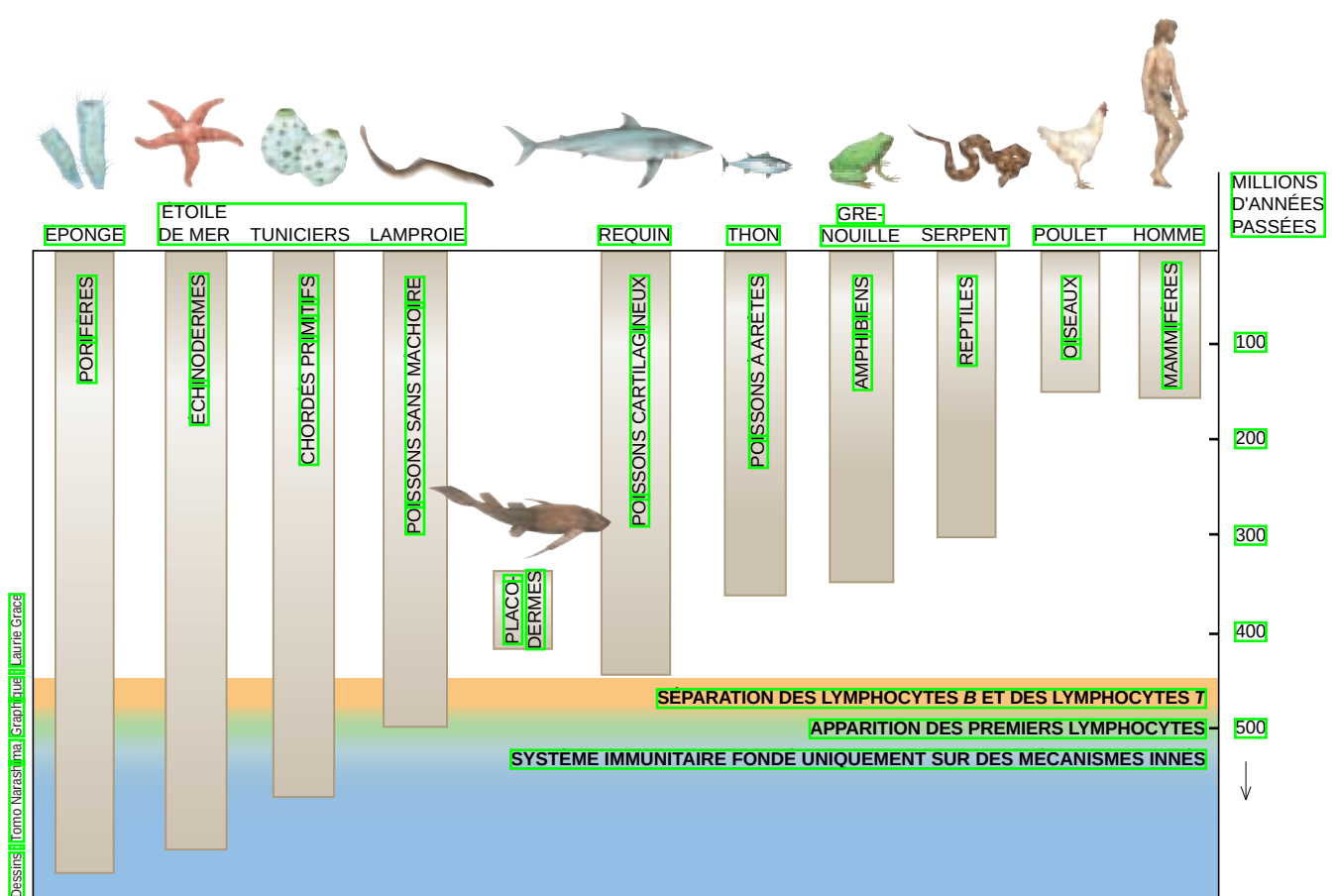


ROBERTO OSSI

1. DES CELLULES PHAGOCYTAIRES tentent d'engloutir une épine de rose piquée dans une larve transparente d'étoile de mer. C'est le biologiste russe Élie Metchnikoff (à droite) qui a observé, le premier, en 1882, cet exemple d'une réaction de défense innée d'un organisme. Ses travaux ultérieurs ont posé les bases de l'immunologie cellulaire.



Corbis-Bettmann



2. LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS du système immunitaire sont apparus en même temps que les vertébrés. Ainsi, les premiers systèmes immunitaires à base de lymphocytes seraient apparus chez les poissons sans mâchoire (la famille des lamproies), il y a environ 500 mil-

lions d'années. Puis, ces lymphocytes se sont séparés en deux populations distinctes, que l'on retrouve aujourd'hui chez tous les vertébrés supérieurs. Les invertébrés ont des cellules qui ressemblent, par certains aspects, aux cellules immunitaires des vertébrés.

système ultérieur des vertébrés. Ces ressemblances sont peut-être la meilleure preuve de l'évolution, sur des centaines de millions d'années, d'un système immunitaire primitif vers celui des mammifères.

Les systèmes de défense sont apparus il y a 2,5 milliards d'années, avec les protozoaires, les plus simples des organismes vivants. Ces protozoaires sont des organismes unicellulaires : toutes les fonctions physiologiques sont effectuées par une unique cellule. La respiration, la digestion, la défense, notamment, sont partiellement assurées par phagocytose. Cette dernière, moyen de défense des protozoaires, diffère peu de celle assurée par les cellules phagocytaires de l'homme.

Chez les animaux, de l'étoile de mer à l'homme, les cellules phagocytaires circulent dans l'organisme. Dans le cas de l'étoile de mer, elles circulent dans une cavité remplie de fluide, nommée celome. Chez les animaux pluri-cellulaires, elles patrouillent dans les tissus et aux alentours.

Même les systèmes immunitaires les plus anciens distinguent le soi du

non-soi. Certains protozoaires, qui vivent par colonies de milliers d'individus, doivent se reconnaître : la vie en colonie ou la reproduction sexuée ne sont possibles qu'à condition de distinguer le soi du non-soi. L'éponge, qui serait le métazoaire (ou animal pluri-cellulaire) le plus ancien et le plus simple, reconnaît le soi du non-soi : ses cellules attaquent les greffes prélevées sur d'autres éponges.

Toutefois, ce rejet n'est pas identique à celui qui a lieu chez les vertébrés : si une greffe a été rejetée une première fois, une seconde greffe provenant du même donneur sera rejetée encore plus rapidement. Au contraire, chez les éponges et les méduses, le second rejet n'est pas plus rapide que le premier : diverses expériences réalisées sur des étoiles de mer et d'autres invertébrés supérieurs indiquent que les invertébrés seraient dépourvus de mémoire immunitaire, laquelle serait une caractéristique du système immunitaire des vertébrés.

Les invertébrés sont privés de deux autres particularités immunitaires des vertébrés – le complément et les lymphocytes –, mais ils possèdent des sys-

tèmes analogues. À la place du complément, plusieurs classes d'invertébrés, y compris des insectes, des crabes et des vers, ont un système prophénoloxydase : comme le complément, le système prophénoloxydase est activé par plusieurs enzymes. La cascade des réactions se termine par la conversion de la prophénoloxydase en phénoloxydase active, qui participe à l'encapsulation des corps étrangers. Ce système intervient également lors de la coagulation du sang et de la destruction des microbes.

Les invertébrés n'ont pas de lymphocytes ni de système immunitaire humoral fondé sur les anticorps. Néanmoins, certains de leurs composants semblent être des précurseurs des cellules qui assurent l'immunité humorale chez les vertébrés. Ainsi, certaines cellules des vers de terre, apparus il y a 500 millions d'années, possèdent des cellules qui ressemblent à des lymphocytes. De surcroît, tous les invertébrés synthétisent des molécules qui semblent fonctionner comme des anticorps et qui en auraient été les précurseurs. Ces protéines, nommées lectines, se fixent sur des molécules

de sucre présentes sur les cellules ; elles rendent les cellules collantes et provoquent leur agglutination. Les lectines, omniprésentes, sont probablement apparues très tôt : on les trouve dans les plantes, les bactéries, les invertébrés et les vertébrés.

On ignore le rôle précis des lectines dans les réactions immunitaires : elles participeraient au repérage des organismes envahisseurs, probablement recouverts de divers sucres. Les lectines des vers de terre, des escargots, des coquillages et de presque tous les invertébrés favorisent la phagocytose. Chaque groupe animal a plusieurs lectines, dont les affinités spécifiques pour les sucres diffèrent. Les lectines isolées de l'oursin et de la mouche *Sarcophaga peregrina* ressemblent aux protéines des vertébrés nommées collectines. Chez l'homme, les collectines interviennent dans l'immunité innée en enrobant les microbes, ce qui permet aux cellules phagocytaires de les identifier plus facilement, et en activant les cellules immunitaires ou le complément.

Bien que les invertébrés soient dépourvus d'anticorps, ils produisent des molécules qui ont presque la même structure et la même fonction. Les anticorps (aussi nommés immunoglobulines) appartiennent à une famille de molécules vaste et fort ancienne : la superfamille des immunoglobulines. Toutes les molécules de cette famille ont une structure caractéristique. Elles ont des fonctions variées, mais, le plus souvent, elles participent à la reconnaissance du non-soi.

Le repliement caractéristique des immunoglobulines s'est sans doute produit au cours de l'évolution des métazoaires, lorsque les cellules ont appris à se reconnaître. Initialement, cette structure a peut-être servi à l'identification du soi ; puis elle est devenue capable de reconnaître aussi des

antigènes, avant de figurer dans les immunoglobulines.

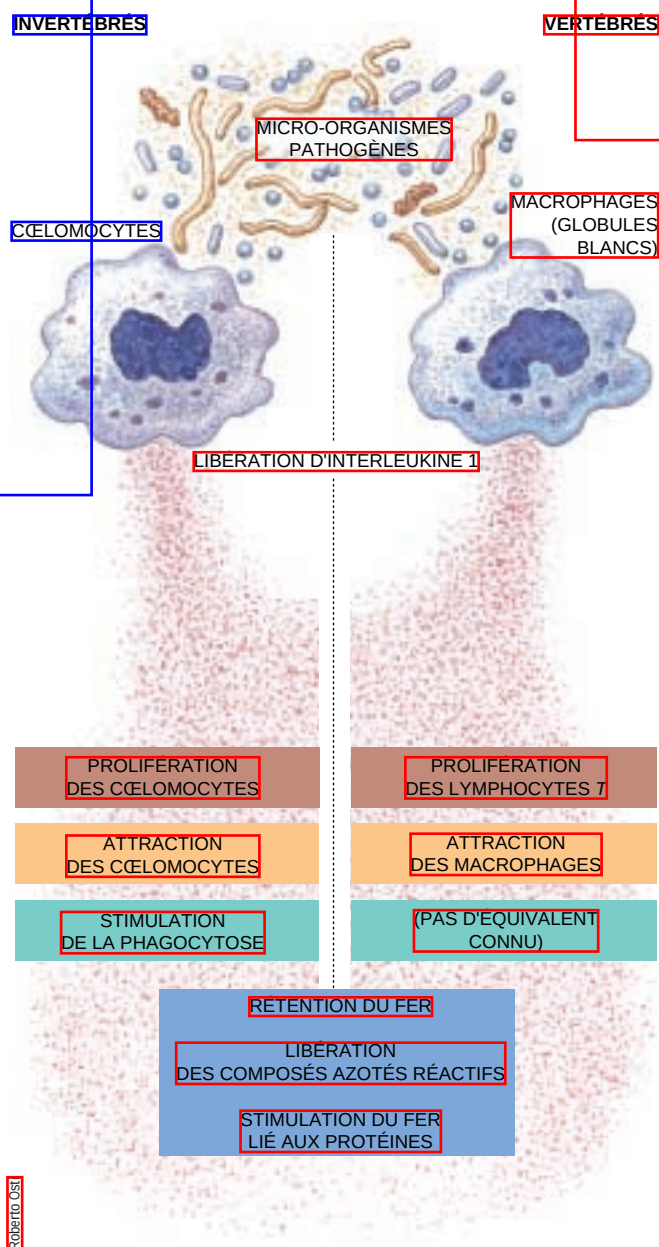
L'hémoline, protéine isolée du sang de certains papillons, appartient à la superfamille des immunoglobulines. Elle se lie aux microbes et participe à leur élimination. D'autres molécules de la superfamille ont été identifiées chez divers invertébrés (des sautelles et des mouches) et chez des vertébrés inférieurs. Ainsi, les réactions immunitaires fondées sur les anticorps, bien qu'elles soient l'apanage des vertébrés, sont issues des mécanismes de défense des invertébrés.

Un précurseur de la réaction immunitaire

L'évolution semble également avoir conservé la plupart des signaux qui commandent les mécanismes de défense des invertébrés. Nous avons isolé, chez des invertébrés, des molécules qui ressemblent aux cytokines des vertébrés. Les cytokines sont des protéines libérées par diverses cellules immunitaires (ou non) activées qui stimulent ou inhibent d'autres cellules du système immunitaire, ou qui agissent sur divers organes. Les interférons, les interleukines 1 et 6, et le facteur nécrosant des tumeurs, le TNF, sont des cytokines. Ces molécules régulent toutes les étapes de l'immunité des vertébrés.

Pour plusieurs raisons, nous pensons que les invertébrés produisent de l'interleukine 1 ou une cytokine ancestrale similaire. D'abord, ces molécules contrôlent certains mécanismes immunitaires primitifs des vertébrés. En outre, comme la structure et la fonction défensive de l'interleukine 1 sont analogues chez de nombreux vertébrés, nous supposons qu'il devait exister un précurseur. Enfin, les macrophages (les globules blancs qui produisent l'interleukine 1) sont présents chez toutes les espèces animales.

À partir du fluide qui emplit l'étoile de mer *Asterias forbesi*, nous avons extrait une protéine qui ressemble beaucoup à l'interleukine 1 : elle a les mêmes propriétés physiques, chimiques et biologiques ; elle stimule les cellules des vertébrés qui sont sensibles à l'interleukine 1 ; les anticorps qui reconnaissent cette interleukine humaine s'y fixent également. Ultérieurement, nous avons observé que de nombreux invertébrés synthétisent des molécules apparentées aux cytokines des vertébrés. Les vers et les tuniciers, par exemple, produisent des substances analogues à l'interleukine 1 et au TNF. De plus, une chenille du tabac



ROBERT OSI

3. LA LIBERATION DE CYTOKINES stimule plusieurs dizaines de fonctions, chez les invertébrés comme chez les vertébrés, notamment des fonctions de défense. Les auteurs ont montré que l'interleukine 1 (une cytokine) de l'étoile de mer a des fonctions de défense similaires, voire identiques, à celles qu'elle déclenche chez les vertébrés.

contient des molécules qui ressemblent aux interleukines 1 et 6. Ainsi, les invertébrés fabriquent des équivalents des trois principales cytokines des vertébrés.

Les cytokines des invertébrés semblent commander les réactions de protection de la même façon que les cytokines des vertébrés, dans les mécanismes de l'immunité innée. Nous avons montré que des cellules nommées cœlomocytes (l'équivalent des macrophages) produisent de l'interleukine 1 chez l'étoile de mer ; l'interleukine 1 libérée stimule d'autres cœlomocytes, qui englobent alors les envahisseurs et les éliminent.

De la grenouille au médicament

L'immunologie comparée ne cherche pas seulement, chez les invertébrés, les analogues des dispositifs de défense des vertébrés. Elle étudie, chez ces invertébrés, de nouveaux mécanismes de défense et les retrouve ensuite, parfois, chez les vertébrés.

Par exemple, les invertébrés se défendent avec des protéines antibactériennes. Ces molécules, dont certaines pourraient devenir des médicaments,

sont généralement libérées par les cellules sanguines au début de la réaction immunitaire innée. Le lysozyme est la protéine antibactérienne inducible la plus fréquente que les invertébrés fabriquent ; c'est aussi la première à avoir été isolée. Les insectes produisent aussi du lysozyme quand ils sont infectés ou quand ils sont exposés à des protéines de la paroi des cellules bactériennes. Le lysozyme fait également partie du système de défense innée de l'homme : dans la salive, par exemple, il protège la cavité buccale contre les bactéries.

En 1979, Hans Boman et ses collègues de l'Université de Stockholm avaient découvert, chez le ver à soie *Hyalophora cecropia*, des peptides antibactériens. Ces molécules constituées de quelques acides aminés détruisent les bactéries à des concentrations suffisamment faibles pour ne pas endommager les cellules de l'animal : elles perforent les bactéries, qui éclatent. Récemment, cinq molécules apparentées à ces «cécropines» ont été isolées dans la partie supérieure de l'intestin de porc, où elles contrôlent la flore bactérienne. On cherche aujourd'hui à les utiliser comme médicaments antibactériens.

Jules Hoffmann et ses collègues de l'Université de Strasbourg ont étudié un autre groupe de peptides antibactériens d'insectes, les défensines. Celles-ci ont été isolées chez plusieurs espèces d'insectes et semblent être le groupe de peptides antibactériens le plus fréquent. Comme les cécropines, les défensines sont des protéines assez petites, mais, contrairement aux cécropines, on connaît mal leur mécanisme d'action sur les bactéries. Les défensines des mammifères sont petites également, mais n'ont pas d'autres caractéristiques communes avec les défensines des insectes. Ainsi, les petits peptides antibactériens seraient un des principaux éléments de la défense rapide, chez les animaux.

Diverses espèces de vertébrés inférieurs ont aussi des molécules de défense spécifiques : certaines grenouilles africaines n'ont nul besoin d'antibiotiques après une opération chirurgicale non stérile, alors même qu'elles vivent dans de l'eau contaminée par d'innombrables bactéries. Cherchant ce qui protégeait ces grenouilles, Michael Zasloff isola, en 1987, à l'Institut américain de la santé, deux peptides de leur peau : la magainine 1 et la magainine 2 (*magainine* vient du mot hébreu qui signifie *bouclier*). Ces

Les peptides antimicrobiens des insectes

Depuis la découverte des cécropines et des défensines d'insectes, la liste des peptides antimicrobiens participant à la défense immunitaire des insectes s'est considérablement allongée et dépasse désormais la centaine. Ces molécules sont, pour la plupart, de petite taille et portent des charges positives qui permettent une bonne interaction avec les membranes des micro-organismes. Ils semblent agir comme des détergents faibles. Les peptides antimicrobiens sont synthétisés dans le corps gras de l'insecte, un analogue du foie des vertébrés, et sécrétés dans l'hémolymph (le sang), où les concentrations dépassent notablement le seuil auquel ils sont actifs contre les micro-organismes. La plupart de ces peptides ont un large spectre d'activité contre les bactéries.

Récemment, nous avons isolé un puissant peptide antifongique chez la drosophile, et nous l'avons nommé drosomycine ; sa structure et sa fonction ressemblent beaucoup à celles des peptides antifongiques des plantes. Quelques rares peptides antimicrobiens d'insectes, telle la thanatine qui nous avons isolée d'une punaise, sont actifs à la fois contre les bactéries et contre les champignons. Chaque espèce d'insectes synthétise cinq à six peptides différents. Les gènes qui codent ces peptides ont été isolés chez la drosophile, et l'on a montré que le contrôle de leur expression au cours des réactions immunitaires

ressemble à celui de l'expression de gènes de mammifères au cours des réactions inflammatoires.

C'est notamment le cas de l'activation du gène codant la drosomycine, et de l'activation du gène de l'interleukine 1 qui participe aux réactions inflammatoires chez les mammifères : la plupart des molécules qui interviennent dans ces deux cascades régulatrices présentent des homologies de structure et de fonction, et les promoteurs des gènes cibles de ces cascades ont des séquences régulatrices homologues. Ces données confortent l'hypothèse d'un origine ancestrale commune de certains des mécanismes de la défense immunitaire innée des animaux. De surcroît, des travaux récents ont révélé que plusieurs gènes impliqués dans la défense immunitaire des plantes présentent également des homologies avec les gènes codant les protéines des cascades régulatrices mentionnées. L'immunologie comparée a rapproché les insectes des mammifères. Les analogies qu'elle révèle entre le monde animal et le monde végétal sous-entendent-elles que ces deux mondes ont eu un lointain ancêtre commun ? Ou ces analogies ne sont-elles que le résultat de mécanismes d'évolution convergents ?

Jules HOFFMANN
Institut de biologie moléculaire et cellulaire, Strasbourg

molécules agissent sur les bactéries, les champignons et les protozoaires. En outre, les anticorps qui se lient aux magainines se fixent également aux cellules épithéliales humaines, telles celles de la peau et de la paroi intestinale : on doit en conclure que l'homme synthétise aussi des molécules analogues pour se défendre rapidement contre les agents pathogènes.

La découverte d'antibiotiques et de stratégies de défense originales chez les invertébrés devrait encourager les immunologistes à reprendre l'étude de stratégies de défense inédites qui, aujourd'hui, dorment dans les « tiroirs » de la recherche immunologique. Qui sait combien de médicaments restent à découvrir là ?

Les biologistes ont trop négligé l'étude des systèmes de défense des invertébrés. Aujourd'hui, ils découvrent de nouvelles caractéristiques des fonctions de défense, chez tous les êtres vivants, et l'étude d'organismes ancestraux nous renseigne sur le fonctionnement de leurs descendants actuels.

On ne comprendra les réactions immunitaires complexes des vertébrés qu'en analysant des systèmes de défense moins complexes, notamment celui des invertébrés. Les immunologistes cherchent à comprendre les mécanismes de l'évolution, à préciser le fonctionnement du système immunitaire et à appliquer leurs découvertes à la mise au point de traitements. Metchnikoff reste le saint patron de ces recherches.

Gregory BECK est professeur de biologie à l'Université de Boston. Gail HABICHT est professeur de médecine interne à l'Université de Stony Brook.

H.G. BOMAN et D. HULTMARK, *Cell-Free Immunity in Insects*, in *Annual Review of Microbiology*, vol. 41, pp. 103-126, 1987.

G. BECK et G.S. HABICHT, *Primitive Cytokines : Harbingers of Vertebrate Defense*, in *Immunology Today*, vol. 12, n° 3, pp. 180-183, juin 1991.

Jules A. HOFFMAN et C. HETRU, *Insect Defensins : Inducible Antibacterial Peptides*, in *Immunology Today*, vol. 13, n° 10, pp. 411-415, octobre 1992.

Primordial Immunity : Foundations for the Vertebrate Immune System, sous la direction de G. Beck, E.L. Cooper, G.S. Habicht et J.J. Marchalonis, numéro spécial d'*Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 712, 31 mars 1994.

Les requins et l'origine de l'immunité des vertébrés

GARY LITMAN

Les requins, qui existent depuis plus de 450 millions d'années, nous renseignent sur l'évolution du système immunitaire.

Il y a quelque 500 millions d'années, l'ancêtre de tous les vertébrés à mâchoires apparut dans les eaux chaudes de la vaste mer primitive qui recouvrait la Terre. On connaît mal cet animal, mais certains paléontologues supposent qu'il ressemblait aux placodermes, des poissons plus tardifs, connus par les fossiles qu'ils ont laissés. Ces créatures, longues parfois de sept mètres, étaient recouvertes de plaques osseuses qui protégeaient la tête et le thorax.

Retrouver un placoderme vivant est un rêve de bien des biologistes, car nous aurions alors un témoin de l'évolution ; nous pourrions observer comment fonctionnait le système immunitaire primitif, l'un des constituants les plus complexes des organismes vivants, dont l'apparition suivit de peu celle des vertébrés à mâchoires. Cette transition est l'une des principales étapes de l'évolution, car elle a favorisé l'apparition d'animaux plus évolués, notamment les animaux terrestres, et finalement l'homme. Des systèmes immunitaires complexes et adaptatifs sont vraisemblablement apparus avec les premiers vertébrés. Les systèmes immunitaires des invertébrés d'aujourd'hui, qui ressemblent probablement à ceux de leurs ancêtres, n'ont pas cette capacité d'adaptation.

Toutefois, les placodermes et leurs ancêtres ont disparu depuis longtemps. Le rêve est-il anéanti ? Non, car ces animaux ont laissé des descendants qui leur ressemblent : les requins, les raies et les chimères (des poissons marins cartilagineux aux dents broyeuses). Ces animaux, dont le système immunitaire a sans doute peu changé, voire pas

du tout, depuis leur apparition, il y a quelques centaines de millions d'années, nous donnent un aperçu de cette période ancienne.

Avec mes collègues, nous étudions le système immunitaire de quelques-uns de ces animaux. Comme on s'y attendait, ce système immunitaire diffère de celui d'animaux plus récents, tels les grenouilles, les singes ou l'homme. En revanche, nous avons découvert que ces systèmes immunitaires ancestraux protègent aussi bien, si ce n'est mieux, que leurs équivalents plus récents contre les maladies et contre les infections.

Cela n'est peut-être pas très surprenant : la sous-classe des élasmobranches, à laquelle appartiennent les requins et les raies, est apparue il y a plus de 450 millions d'années (*Homo sapiens sapiens* a tout au plus 200 000 ans) et elle a survécu à plusieurs extinctions en masse qui ont éliminé d'innombrables espèces. Ce succès évolutif tient sans doute partiellement à une efficacité particulière de leur système immunitaire. En identifiant les caractéristiques du système immunitaire des élasmobranches, nous préciserons le fonctionnement des défenses humaines.

Double immunité

Le système immunitaire assure une double protection : par l'immunité humorale et par l'immunité cellulaire. Les agents de l'immunité humorale sont les globules blancs nommés lymphocytes B, qui produisent des anticorps ; présentes à la surface des lymphocytes B, ces molécules se lient

aux molécules étrangères, les antigènes, portées par les bactéries et les virus nuisibles qui envahissent parfois le sang. Une fois ces complexes antigènes-anticorps formés, d'autres cellules immunitaires détruisent les bactéries et les virus. L'homme a cinq principaux types d'anticorps, ou immunoglobulines.

Chaque lymphocyte B produit un seul type d'anticorps, qui reconnaissent tous le même antigène. Dès qu'un anticorps se lie à l'antigène dont il est spécifique, le lymphocyte B qui porte l'anticorps est stimulé : il prolifère tout en sécrétant les anticorps. La plupart des milliards de lymphocytes B de l'organisme fabriquent des anticorps tous différents : quand un lymphocyte B naît, un mécanisme génétique, qui associe des composantes aléatoires et innées, lui confère la capacité de fabriquer un unique type de « récepteur » (la partie de l'anticorps qui se lie à l'antigène). C'est cette diversité des récepteurs d'antigènes qui confère à l'immunité humorale son vaste champ d'action. Le terme « humoral » provient de ce que les anticorps sont libérés dans les liquides corporels, jadis nommés humeurs.

D'autres globules blancs nommés lymphocytes T assurent l'immunité cellulaire. Contrairement aux lymphocytes B, les lymphocytes T ne produisent pas d'anticorps, mais reconnaissent les antigènes portés par d'autres cellules, grâce à leurs récepteurs. Ils interviennent, par exemple, dans les rejets de greffes et dans l'élimination des cellules tumorales.

L'organisme reconnaît les antigènes étrangers grâce aux anticorps et aux

récepteurs des lymphocytes *T*. Bien que les cellules de l'immunité humorale et celles de l'immunité cellulaire soient différentes, elles coopèrent au cours des réactions immunitaires. Ainsi, les lymphocytes *T* règlent le fonctionnement des lymphocytes *B*.

À certains égards, le système immunitaire des requins ressemble à celui de l'homme. Les requins ont une rate qui, comme chez l'homme, produit beaucoup de lymphocytes *B*. Quand un requin est immunisé, c'est-à-dire quand on provoque une réaction immunitaire par injection d'un antigène, ses lymphocytes *B* produisent des anticorps. De même pour l'immunité cellulaire : comme l'homme, les requins ont un thymus qui libère les lymphocytes *T* après une phase de maturation. De surcroît, les lymphocytes *T* des requins portent des récepteurs, et nous avons montré que la diversité de ces récepteurs résulte des mêmes mécanismes génétiques que ceux qui assurent la diversité des anticorps humains. Les lymphocytes *T* des requins sont également responsables des rejets de greffes, mais, au moins dans le cas des greffes de peau, le rejet est moins rapide que chez l'homme (il survient au bout de plusieurs semaines seulement).

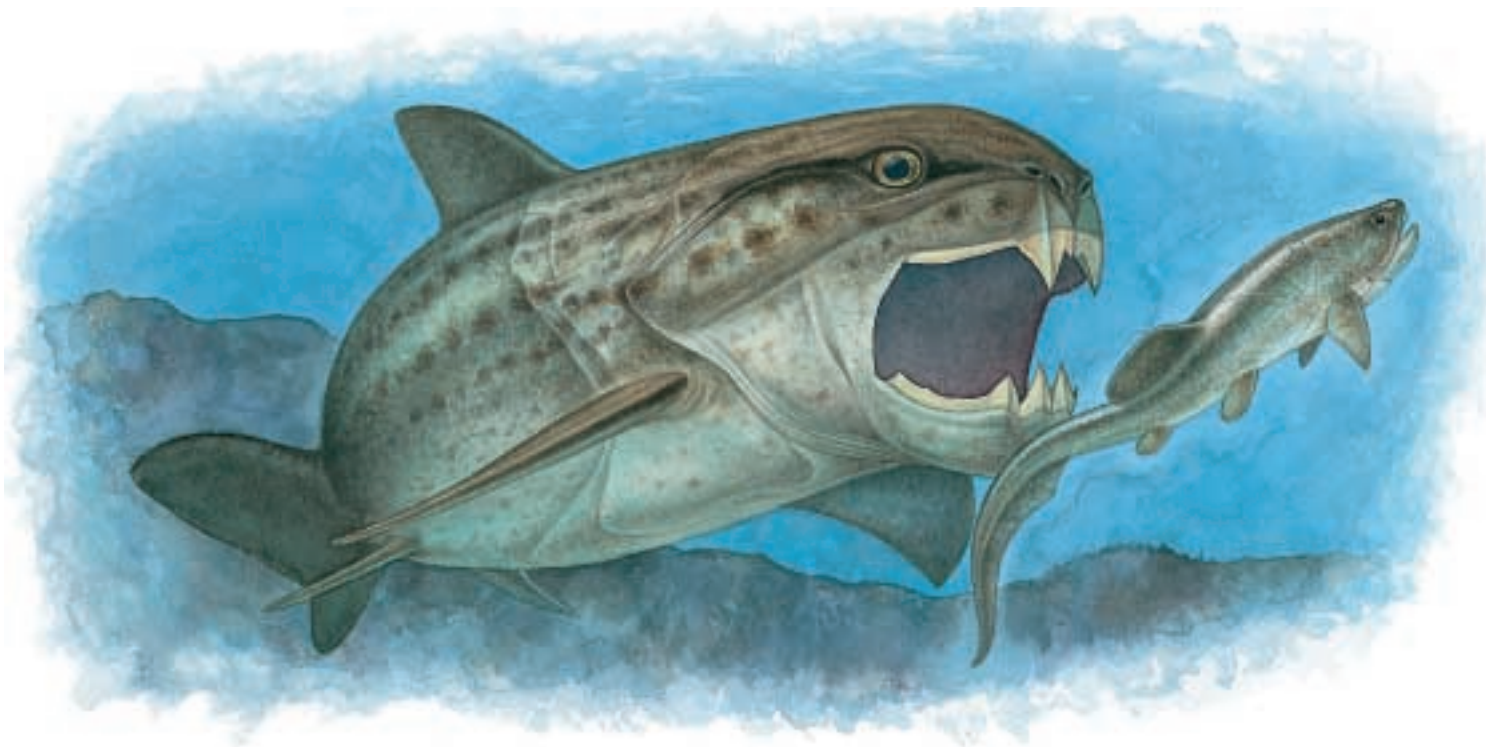
Malgré ces ressemblances, le système immunitaire d'un poisson cartilagineux tel que le requin diffère de celui de l'homme par des aspects importants. Par exemple, les poissons cartilagineux ont seulement quatre classes d'immunoglobulines (l'une d'elles ressemble à une des cinq classes d'immunoglobulines humaines). De plus, les anticorps du requin n'ont pas la précision qui permet aux anticorps humains de distinguer des types de bactéries quasi semblables. Enfin, le système de défense des requins est dépourvu d'un mécanisme qui, chez l'homme, améliore la lutte contre les agents infectieux : chez l'homme, la liaison entre les anticorps et leur antigène est renforcée lors des réactions immunitaires prolongées.

Pour autant, le système immunitaire des requins n'est pas moins bien adapté aux besoins de l'organisme que celui de l'homme ou des autres mammifères. La nature spécifique de ce système immunitaire ancestral reflète tous les détours qu'a suivis le système immunitaire au cours de l'évolution : l'évolution, au moins en ce qui concerne le système immunitaire, n'a pas toujours progressé avec l'inexorable continuité qu'on lui attribue souvent.

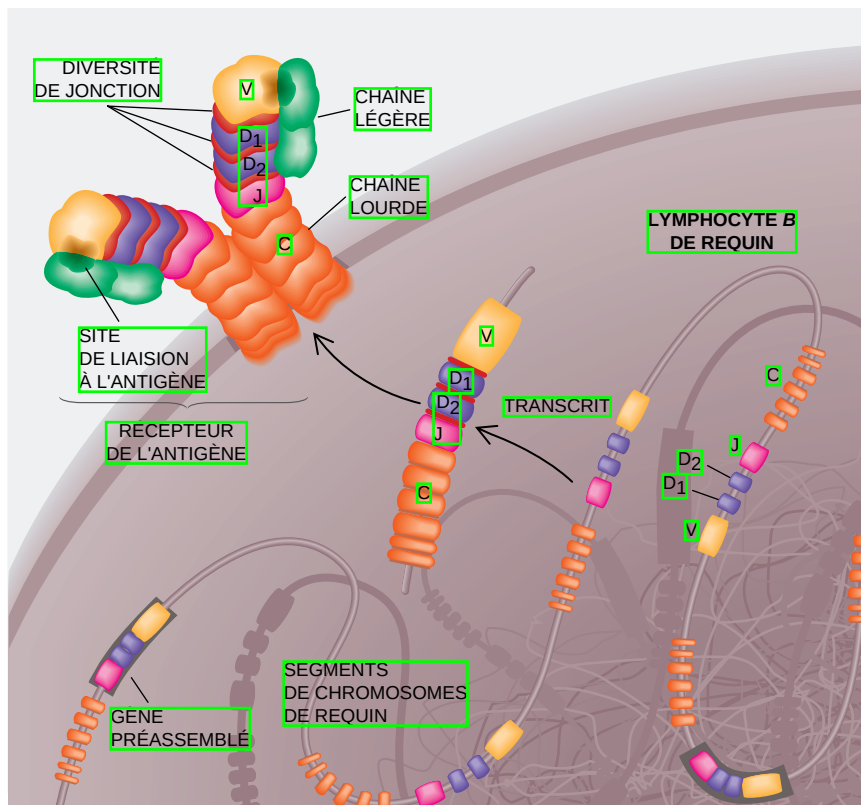
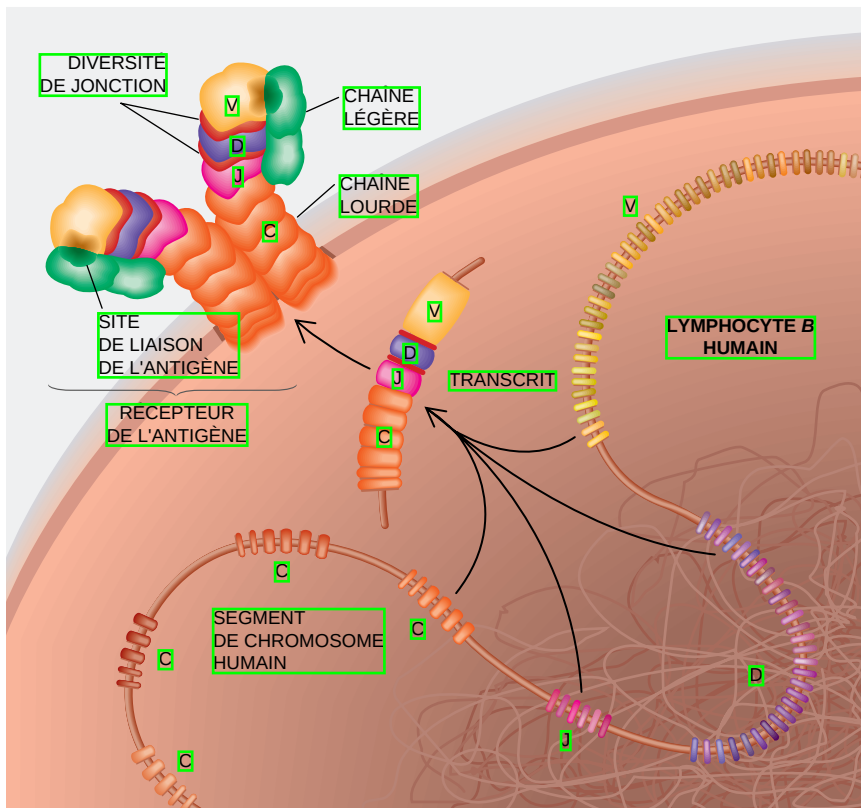
Un récepteur par antigène

Nous avons surtout étudié le système immunitaire humoral du requin à cornes californien, un animal tacheté d'une cinquantaine de centimètres de long. Chez cet animal, comme chez tous les vertébrés, la diversité des récepteurs des antigènes est d'origine génétique. Chaque récepteur antigénique est constitué de deux protéines (des enchaînements d'acides aminés) : une «chaîne lourde» et une «chaîne légère». À de rares exceptions près, un anticorps est constitué de deux paires de chaînes et a, ainsi, deux sites récepteurs d'antigènes. La nature et l'arrangement des acides aminés de la chaîne lourde et de la chaîne légère déterminent le récepteur et, par là même, l'antigène qui s'y lie.

Quel que soit leur site de production, les chaînes d'acides aminés sont codées par des gènes du noyau cellulaire. Ainsi les récepteurs des antigènes sont des chaînes d'acides aminés définies par des gènes des lymphocytes *B*. Trois types de segments géniques assurent la production des récepteurs des antigènes : le segment V (pour *variable*), D (pour *diversité*) et J (pour *jonction*). Les acides aminés de la chaîne lourde sont codés par ces trois types de segments, tandis que la chaîne légère est



1. LES PLACODERMES, dont il ne reste que des fossiles, auraient été parmi les premiers animaux à bénéficier d'un système immunitaire adaptable et complexe.



2. LES ANTICORPS sont codés par des groupes de gènes qui se réarrangent différemment chez l'homme et chez le requin. Ces gènes se recombinent pour produire les récepteurs auxquels se lient les antigènes. On a représenté ici le mécanisme de fabrication de la «chaîne lourde» d'un récepteur d'antigène. Chez l'homme (*en haut*), les segments géniques qui se combinent pour coder le récepteur sont dispersés sur un seul chromosome ; au contraire, chez le requin (*en bas*), les segments géniques sont déjà préassemblés en «lots», situés sur n'importe lequel des chromosomes. On n'a pas indiqué ici les détails du mécanisme de transcription.

codée uniquement par les segments V et J. Un quatrième type de segments géniques, nommé C (pour *constant*), détermine la classe des anticorps.

Chez l'homme, les segments V, D, J et C sont répartis sur le même chromosome. Comme chez la plupart des vertébrés supérieurs, ces segments sont regroupés : on trouve, par exemple, quelque 50 segments V fonctionnels, 30 segments D, six segments J et huit segments C au même site, ce qui correspond approximativement à un million de paires de bases, les «barreaux» de cette molécule en forme d'échelle qu'est l'ADN. Lorsqu'un lymphocyte B produit un anticorps, des segments géniques V, D et J, adjacents à un segment C, sont recombinés. Ce matériel génétique est alors décodé, et le système cellulaire de fabrication des protéines produit la chaîne d'acides aminés correspondante. La recombinaison de ces segments géniques détermine les caractéristiques du site récepteur situé sur l'anticorps. Chez les vertébrés supérieurs, cet assemblage d'éléments V, D et J – la diversité combinatoire – augmente la diversité des récepteurs des antigènes.

Chez le requin également, les segments géniques codant les anticorps sont regroupés, mais les unités d'ADN (ou groupes de gènes) codant les chaînes lourdes ne contiennent qu'un segment V, deux D, un J et un C. Plus d'une centaine de ces unités d'ADN sont réparties sur différents chromosomes du requin. Quand la machinerie cellulaire produit un anticorps, seuls les quatre segments géniques d'une seule unité sont recombinés (le segment C est déjà lié au segment J), avant que le message génétique ne soit traduit en un récepteur d'antigène.

L'origine de la diversité

Ce type de recombinaison restreint-il la diversité des récepteurs d'antigènes du requin ? Sans doute, sauf que des centaines de groupes de gènes codant les anticorps sont répartis sur plusieurs chromosomes du requin. De surcroît, la diversité combinatoire n'est pas la seule source de diversité (chez les mammifères non plus) : chez les requins comme chez les autres poissons cartilagineux, la diversité de jonction et la diversité innée accroissent les capacités immunitaires.

Pour comprendre la diversité de jonction, revenons au mécanisme d'as-

semblage des segments géniques V, D et J de la chaîne d'un récepteur d'antigène. Cette diversité s'introduit lors de la jonction des segments V et D ou des segments D et J. Avant la fusion, à l'endroit où les deux segments s'unissent, plusieurs paires de bases sont éliminées et remplacées par de nouvelles bases de façon quasi aléatoire. Ces modifications locales du matériel génétique modifient la séquence des acides aminés et, par là même, les caractéristiques des récepteurs d'antigènes.

C'est là que le segment génique supplémentaire D confère un avantage notable au système de production d'anticorps du requin. Avec quatre segments géniques différents, la diversité se manifeste entre V et D₁, entre D₁ et D₂, et entre D₂ et J. Grâce à la diversité de jonction, des millions de variants d'un même anticorps, chacun ayant un site récepteur un peu différent des autres, sont créés. Au contraire, chez les mammifères, la diversité d'assemblage se produit seulement entre les segments V et D, et entre les segments D et J.

Tous ces anticorps semblent pouvoir protéger contre d'innombrables micro-organismes. Toutefois, une production massive d'anticorps n'est pas une garantie d'immunité : la diversité de jonction produit une gamme d'anticorps suffisante pour faire face à n'importe quelle situation, mais elle est trop lente pour produire suffisamment d'anticorps, sélectionner les plus efficaces, les multiplier et s'attaquer à l'envahisseur. Dans sa course contre l'agent infectieux, le requin risque de perdre.

Les espèces se sont adaptées grâce à des mécanismes qui sélectionnent rapidement la séquence qui code l'anticorps nécessaire : cette séquence est d'abord fournie par un des millions de lymphocytes B de l'organisme. Chez les mammifères, des compartiments cellulaires spécialisés et des communications intercellulaires complexes activent le système immunitaire à cette fin.

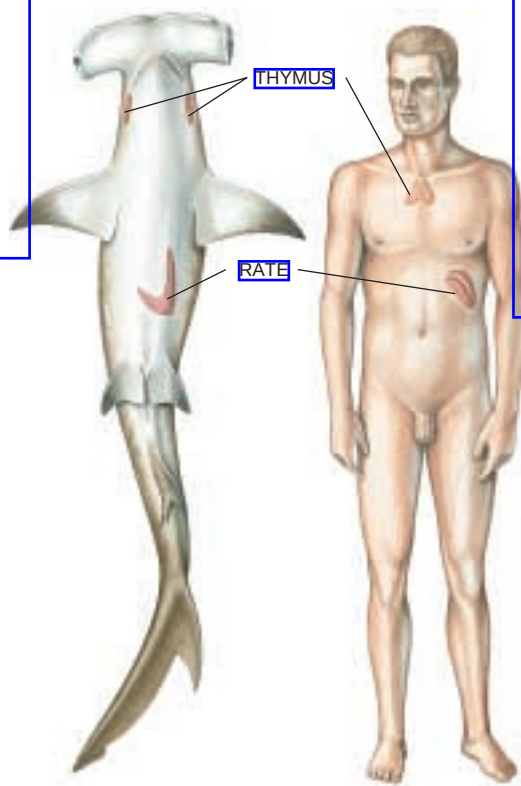
Les requins disposent d'une forme de diversité innée qui leur évite de se livrer totalement au hasard : leur organisme n'a pas à attendre qu'apparaisse une combinaison appropriée de séquences pour fabriquer au moment opportun le récepteur d'antigène requis, parce que toutes les cellules con-

tiennent un grand nombre de groupes de gènes, où les segments géniques V, D₁, D₂, J sont déjà «préassemblés».

Dans ces groupes, la diversité de jonction est limitée. L'analyse de certaines de ces groupes partiellement ou totalement préassemblés (chez les requins) a montré que leurs segments V, D₁, D₂ et J ressemblent beaucoup à ceux des groupes non assemblés (chez les mammifères) : l'un des systèmes aurait divergé de l'autre au cours de l'évolution.

Pour quelle raison? Comme dans d'autres branches de la biologie, si l'on connaît bien les mécanismes génétiques, on ne comprend pas toujours la relation entre ces gènes et leur fonction physiologique. Toutefois, on peut supposer que le système immunitaire humoral des poissons cartilagineux a évolué pour bénéficier, d'une part, des innombrables gènes qui peuvent se recombiner et qui confèrent la flexibilité immunitaire et, d'autre part, de quelques gènes dont les caractéristiques sont figées et qui s'expriment rapidement pour fabriquer des anticorps contre les agents pathogènes les plus fréquents.

Enfin, la diversité repose encore sur des mutations, fréquentes, des gènes qui codent les anticorps des vertébrés supérieurs. Ces mutations modifient



3. LE REQUIN ET L'HOMME ont en commun plusieurs caractéristiques immunitaires, notamment le thymus et la rate.

les caractéristiques des sites récepteurs portés par les anticorps.

Ainsi, l'immunité humorale de l'homme et celle du requin se ressemblent : 450 millions d'années d'évolution n'ont quasiment pas modifié l'immunité humorale, puisque les anticorps du requin ressemblent à ceux de l'homme, et que les séquences V, D et J des segments géniques qui commandent la synthèse des anticorps sont semblables. En revanche, l'évolution a totalement modifié l'organisation des segments géniques qui codent les anticorps. Chez le requin, la diversité de jonction et la diversité innée sont supérieures à celles qui agissent chez l'homme. Bien que relativement simples, les mécanismes de diversification génétique du système immunitaire du requin semblent souvent plus efficaces que ceux des vertébrés supérieurs. Ces observations confirment que l'évolution adapte spécifiquement les mécanismes aux besoins immédiats de leurs hôtes en prévoyant notamment les rencontres imprévisibles.

L'immunité cellulaire

Certaines des caractéristiques de l'immunité humorale se retrouvent dans le cas de l'immunité cellulaire : c'est, par exemple, le cas du réarrangement de segments géniques dispersés le long d'un chromosome, du décryptage des gènes qui codent les récepteurs des antigènes et de la modification de ces gènes. Les lymphocytes T, tout comme les anticorps produits par les lymphocytes B, doivent reconnaître une gamme quasi illimitée d'antigènes et s'y lier.

Les sites récepteurs des lymphocytes T et ceux des anticorps sont codés par des segments géniques similaires, et les mécanismes de réarrangement qui engendrent la diversité des anticorps fonctionnent aussi pour les récepteurs des lymphocytes T. Toutefois, ces récepteurs ne sont présents qu'à la surface des cellules, et ils ne reconnaissent les molécules étrangères que lorsqu'elles sont présentées par des molécules spécialisées, portées par d'autres cellules. L'affinité des lymphocytes T pour les antigènes étrangers est inférieure à celle de certains anticorps, et ces lymphocytes subissent moins de mutations.



4. LE REQUIN A CORNES est l'un des animaux les plus anciens, chez qui l'on a identifié des lymphocytes T, les agents de l'immunité cellulaire.

Les immunologistes ont longtemps cru que l'immunité cellulaire était apparue avant l'immunité humorale. Toutefois, les greffes de peau ne sont rejetées qu'après plusieurs semaines par l'organisme des requins ; on en a déduit que, chez les requins, l'immunité cellulaire – si elle existe – n'est ni très efficace, ni très spécifique. Certains ont alors pensé que les requins étaient dépourvus de lymphocytes T.

Pour le savoir, nous avons recherché des lymphocytes T chez le requin à cornes. Pour prouver l'existence de ces cellules, il nous fallait identifier leurs récepteurs d'antigènes. Nous avons échoué, jusqu'au jour où nous avons utilisé la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, une technique qui produit des millions de copies d'un petit fragment d'ADN. Récemment nous avons isolé, chez la raie, les quatre classes de récepteurs d'antigènes des lymphocytes T de mammifères, et nous pensons qu'elles existent aussi chez le requin.

La caractérisation d'une de ces classes de récepteurs a montré qu'ils sont presque aussi diversifiés que chez l'homme. Autrement dit, contrairement aux gènes codant les anticorps, les gènes codant les récepteurs des lymphocytes T semblent n'avoir quasiment pas évolué depuis le moment où les requins ont divergé de la lignée qui a abouti aux mammifères, il y a envi-

ron 450 millions d'années. L'ensemble des gènes codant les anticorps et celui des récepteurs des lymphocytes T auraient divergé d'un ancêtre commun.

À mesure que nous caractérisons le génome des requins et des animaux apparentés, nous découvrons de nombreux ensembles de gènes. Ainsi, on a découvert un groupe de gènes qui ressemblent à la fois aux gènes qui codent les anticorps et à ceux qui codent les récepteurs des lymphocytes T. Les gènes de ces ensembles subissent des mutations à un rythme accéléré.

Certains gènes de groupes différents se seraient mélangés et réassociés au cours de l'évolution. Ces échanges (chaque individu a des centaines de groupes, chacun contenant d'innombrables gènes) auraient favorisé l'apparition de nouveaux groupes de gènes. Peut-être découvrirons-nous encore de nouveaux récepteurs du système immunitaire du requin.

En raison de ces échanges, certains gènes sont redondants chez le requin : des segments V, D1, D2 et J identiques se regroupent de façon répétitive sur divers chromosomes. Ces recombinaisons, associées à d'autres mécanismes génétiques spécifiques du requin, permettent l'élaboration rapide de nouvelles familles de récepteurs. Chez les mammifères, les segments géniques sont présents sur un seul des chromosomes, et il y a peu de redon-

dance structurelle, de sorte que ce type de recombinaison est rare.

De surcroît, la duplication de segments géniques – l'existence de multiples segments V, D et J, une caractéristique du système immunitaire des mammifères – ne semble être apparue qu'au prix de l'introduction et du maintien de nombreuses séquences d'ADN non fonctionnelles. Au contraire, chez les requins et les raies, les éléments non fonctionnels sont rares et disparaissent sans doute rapidement du génome.

Parce qu'ils sont les représentants vivants d'une lignée ancienne, les requins et les animaux apparentés sont peut-être les seuls vestiges des systèmes immunitaires primitifs. Ces poissons qui ont été les témoins d'un moment clé de l'évolution nous permettront peut-être, un jour, de préciser les éléments qui ont engendré un système aussi efficace, voire plus, que l'armure du placoderme.

Plusieurs questions restent posées : quelles modifications du milieu ont fait apparaître des agents pathogènes qui ont ensuite tant modifié l'organisation des gènes qui codent les anticorps ? Le système immunitaire est-il conçu pour évoluer rapidement ? L'étude des vertébrés préhistoriques et des différences entre les mammifères contemporains le fait penser. Si cette hypothèse se confirme, nous devons revoir nos concepts sur l'adaptation et sur la sélection naturelle.

Gary LITMAN est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à la Faculté de médecine de Floride du Sud.

Louis DUPASQUIER, *Evolution of the Immune System*, in *Fundamental Immunology*, troisième édition, sous la direction de William E. Paul, Raven Press, 1993.

Charles JANEWAY, *La détection des intrus*, in *Pour la Science*, n° 193, novembre 1993.

Gary W. LITMAN, Jonathan P. RAST, Michael J. SHAMBLOTT et al., *Phylogenetic Diversification of Immunoglobulin Genes and the Antibody Repertoire*, in *Molecular Biology and Evolution*, vol. 10, n° 1, pp. 60-72, janvier 1993.

Simona BARTL, David BALTIMORE et Irving L. WEISSMAN, *Molecular Evolution of the Vertebrate Immune System*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, n° 23, pp. 10769-10770, 8 novembre 1994.

Les véhicules électriques

DANIEL SPERLING

Les véhicules électriques sont aujourd'hui aussi performants que les véhicules à essence. Les consommateurs les adopteront-ils ?

Dans les pays industrialisés, les automobiles sont responsables de la moitié de la consommation de pétrole. Elles émettent la moitié des polluants urbains et rejettent le quart des gaz à effet de serre. Le nombre de véhicules ne cesse d'augmenter : sans une réaction rapide, les coûts économique et sanitaire seront exorbitants. Le pétrole, par exemple, deviendra inévitablement plus rare et plus coûteux.

Quatre solutions sont envisageables : la restriction de la circulation des véhicules, l'amélioration du rendement et la réduction des émissions des moteurs à essence, la généralisation de carburants plus propres et la mise au point de systèmes de propulsion moins polluants. Les trois premières solutions sont irréalistes ou peu efficaces. Seule la quatrième, avec la mise au point de véhicules électriques, résoudra durablement les difficultés.

La restriction de la circulation automobile, qui réduirait notamment les embouteillages, se heurte à l'hostilité des automobilistes du monde entier. En Europe de l'Ouest, où le prix moyen du carburant est supérieur à cinq francs par litre, où les transports en commun sont bien développés et où la densité de population est élevée, 80 pour cent des déplacements sont effectués à bord de voitures particulières. Aux États-Unis, la part des transports en commun et du covoiturage n'a cessé de reculer depuis la Seconde Guerre mondiale.

L'amélioration des rendements des moteurs n'a pas permis d'économies notables de carburant depuis dix ans. Les carburants de substitution, méthanol, gaz naturel ou gaz de pétrole liquéfié, ne réduisent pas non plus énormément les émissions polluantes : les compagnies pétrolières amélioreront déjà la formulation de l'essence pour que sa combustion pollue moins.

En revanche, des véhicules à propulsion électrique ne pollueraient presque pas. Les améliorations récentes de leurs performances, de leur rendement et la réduction de leur prix leur permettent aujourd'hui de concurrencer les véhicules à essence. Néanmoins, face à la position bien établie de ces derniers, les industriels et les gouvernements devront unir leurs efforts pour que les consommateurs bénéficient financièrement des avantages environnementaux des véhicules électriques.

Circuler sans polluer... ou presque

On nomme «véhicule électrique» des véhicules alimentés par des batteries que l'on charge à partir du réseau électrique, ou bien des véhicules hybrides, qui produisent eux-mêmes leur électricité. Leurs rendements sont supérieurs à ceux des véhicules à essence, ils polluent moins que ces derniers. Dans un véhicule à moteur thermique, celui-ci tourne en permanence : il entraîne les roues, par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses et d'un embrayage, et un alternateur qui alimente les accessoires électriques. Dans un véhicule électrique, le moteur est relié directement aux roues motrices : la consommation est nulle à l'arrêt et dans les descentes, ce qui accroît le rendement total d'environ un cinquième. En outre, le système de freinage actif, qui transforme

1. LE VEHICULE ELECTRIQUE Tulip a été conçu par le Groupe PSA Peugeot Citroën pour la circulation urbaine. Sa vitesse maximale de 75 kilomètres à l'heure permet de s'insérer normalement dans la circulation. Il est court grâce à l'absence de coffre à bagages, mais il accueille confortablement deux personnes. Fabriqué en matériaux composites, ce véhicule est léger, ce qui augmente son autonomie.



le moteur en générateur lors des décélérations, récupère jusqu'à la moitié de l'énergie cinétique du véhicule : c'est un avantage important en ville, où les conducteurs doivent sans cesse freiner et accélérer.

Enfin, le rendement de la conversion en énergie motrice de l'énergie stockée à bord du véhicule est supérieur à 90 pour cent, alors qu'il plafonne à 25 pour cent dans les moteurs thermiques. Même si les accumula-

teurs sont chargés à partir de centrales thermiques, dont le rendement n'est que de 30 à 40 pour cent, le gain net d'un moteur électrique sur un moteur à explosion est de cinq pour cent. Il augmentera encore lorsque le rendement des centrales thermiques atteindra 50 pour cent, grâce à de nouvelles techniques, telle la génération par cycles combinés, qui récupère l'énergie aujourd'hui dissipée sous forme de chaleur. Lorsque, comme en

France, la majorité de l'électricité est produite par des centrales nucléaires, la pollution atmosphérique est supprimée (bien qu'éventuellement remplacée par une pollution radioactive). Enfin les piles à combustible qui produisent de l'électricité directement à bord du véhicule en brûlant de l'hydrogène ont un rendement encore supérieur et ne polluent pas (sous réserve que la production d'hydrogène ne pollue pas).



PSA Peugeot Citroën

Les véhicules électriques résoudront les problèmes de pollution urbaine de l'air en déplaçant les zones d'émission des polluants : les véhicules à essence rejettent ces derniers partout où ils circulent, tandis que la pollution associée à la production d'électricité est localisée autour de centrales, généralement construites en dehors des centres urbains. Il est aussi plus facile de réduire la pollution de quelques centrales électriques que celle de plusieurs millions de véhicules. La généralisation des véhicules électriques supprimerait les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures, et réduirait celles d'oxydes d'azote. Elle accroîtrait peut-être faiblement les émissions d'oxyde de soufre et de particules, autour des centrales thermiques à charbon. La pollution liée à la fabrication des batteries et des moteurs électriques est négligeable.

Dans les régions où les centrales électriques ne polluent pas l'atmosphère (qu'elles soient hydroélectriques, solaires, éoliennes ou nucléaires), les véhicules électriques apporteront une amélioration certaine. La France et la Californie sont les deux principaux exemples, la première car son électricité est surtout d'origine nucléaire, la seconde car son électricité provient en majeure partie de centrales au gaz naturel sévèrement contrôlées, et de centrales hydroélectriques et nucléaires.

L'autonomie, un obstacle ?

L'une des principales limitations à l'adoption des véhicules électriques provient des batteries. Celles qui sont

aujourd'hui disponibles sont coûteuses et elles ne permettent qu'une autonomie maximum de 150 kilomètres en vitesse stabilisée. Cet obstacle n'est toutefois pas insurmontable : un marché existe pour des véhicules de faible autonomie, et des modèles de batteries plus performants apparaissent.

Selon une enquête que nous avons réalisée en Californie, la moitié des foyers qui possèdent plus d'une voiture (la majorité des foyers des États-Unis, et qui achètent 70 pour cent des voitures neuves) modifieraient aisément leurs habitudes de conduite de manière à utiliser une seconde voiture dont l'autonomie serait inférieure à 180 kilomètres. De nombreuses personnes interrogées accepteraient même une autonomie plus faible, compensée par les effets bénéfiques sur l'environnement et par les avantages de la recharge à domicile (beaucoup de personnes détestent fréquenter les stations-service). En France, 90 pour cent des conducteurs se déplacent quotidiennement d'une distance inférieure à l'autonomie d'un véhicule électrique.

De toute façon, les accumulateurs seront bientôt remplacés, au moins en partie, par d'autres composants : supercapacités, volants d'inertie et piles à combustible. Les supercapacités ont été mises au point dans le cadre de programmes de recherche militaires. On les obtient en éliminant les petites imperfections du film isolant qui sépare les électrodes des condensateurs classiques, responsables de fuites de charges. De nouveaux matériaux permettent aussi

d'empiler des feuilles de carbone et des électrolytes liquides. Les supercapacités stockent ainsi plus de 50 000 joules dans un volume d'un litre et délivrent une puissance de trois kilowatts par litre. De petits modèles équipent déjà des calculatrices, des montres et des rasoirs électriques.

Les volants d'inertie stockent l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation d'un rotor. Ils ont été utilisés pour la première fois dans les transports dans les années 1950 : des autobus qui en étaient équipés desservaient la ville d'Yverdon, en Suisse ; ils relançaient leurs rotors à chaque arrêt. Les volants d'inertie ont considérablement évolué depuis : des rotors en matériaux composites tournent aujourd'hui à près de 100 000 tours par seconde dans le vide ; leur vitesse n'est limitée que par la tension de rupture de leur jante. Les frottements sont atténués par des paliers magnétiques, qui ne dissipent que dix pour cent de l'énergie en quatre jours.

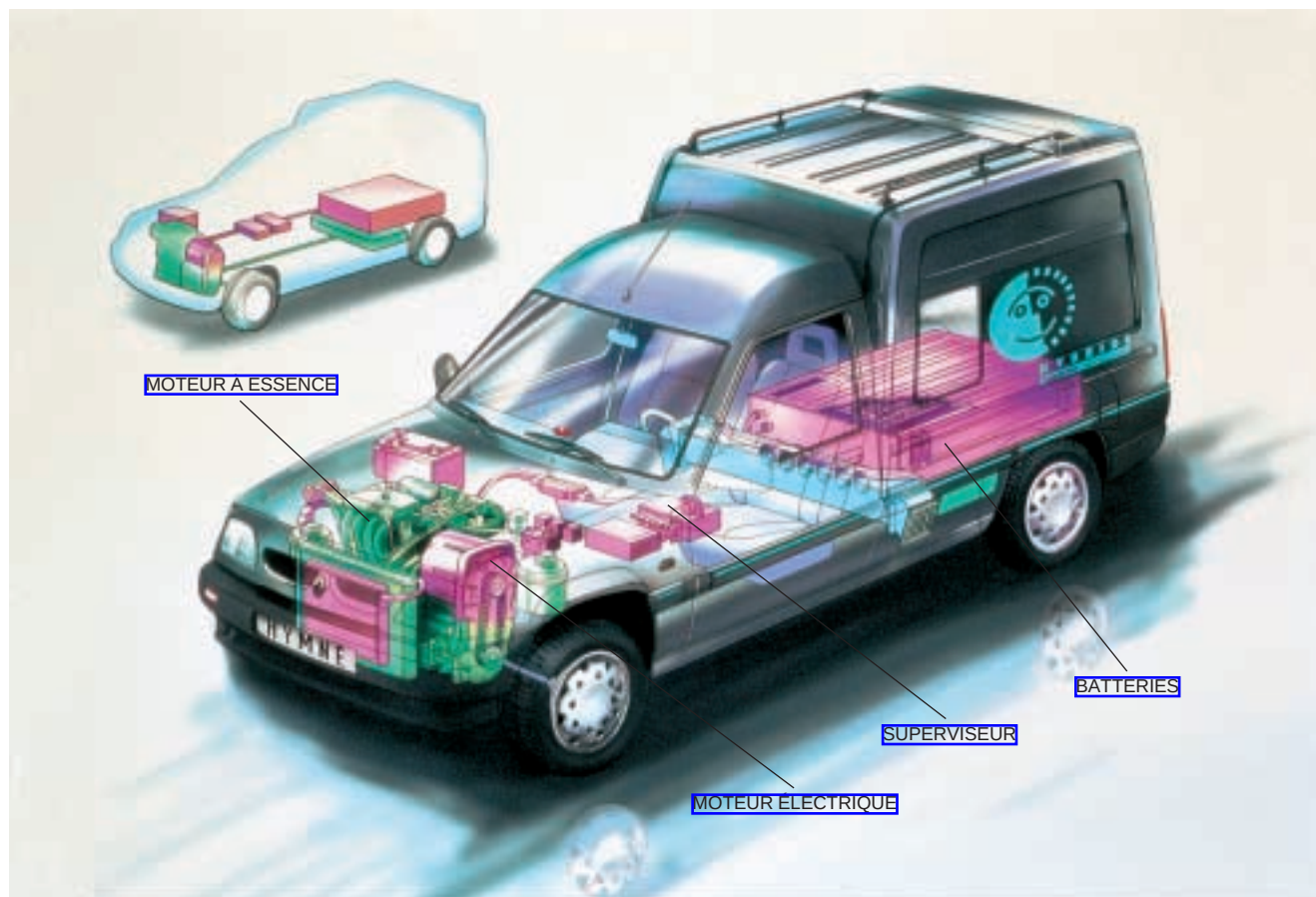
Les premiers véhicules commerciaux équipés de volants d'inertie et de supercapacités devraient apparaître vers l'an 2000. Ces dispositifs, qui peuvent fournir de l'énergie rapidement, seront utilisés pour les pointes de puissance, lors des accélérations ou des ascensions ; des batteries assureront le fonctionnement régulier du véhicule. Cette association permettra l'utilisation d'accumulateurs moins encombrants, moins puissants et dont la durée de vie sera augmentée.

Du carburant pour l'électricité

Toutefois, même selon les prévisions les plus optimistes, les nouveaux systèmes ne stockeront jamais les 1 800 000 kilojoules que contient un réservoir de 50 litres d'essence. C'est pourquoi de nombreux ingénieurs ont prévu que le véhicule électrique du futur serait hybride : il avancerait grâce à des moteurs électriques, mais l'électricité serait produite à bord par un petit moteur à combustion interne. La puissance moyenne nécessaire sur autoroute n'étant que de dix kilowatts, un moteur thermique relativement petit suffirait. En outre, les dispositifs de stockage se rechargeraient pendant que le véhicule roulerait à vitesse constante et se déchargeraient rapidement lors des

Les véhicules électriques réduisent la pollution (variations des émissions en pourcentage)					
	HYDROCARBURES	MONOXYDE DE CARBONE	OXYDES D'AZOTE	OXYDES DE SOUFRE	PARTICULES
FRANCE	-99	-99	-91	-58	-59
ALLEMAGNE	-98	-99	-66	+96	-96
JAPON	-99	-99	-66	-40	+10
ROYAUME-UNI	-98	-99	-34	+407	+165
ETATS-UNIS	-96	-99	-67	+203	+122
CALIFORNIE	-96	-97	-75	-24	+15

2. LA GÉNÉRALISATION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES à accumulateurs réduirait la pollution urbaine. La pollution produite par les centrales électriques augmenterait toutefois légèrement, surtout dans les pays qui sont principalement alimentés par du charbon et du pétrole, tels les États-Unis et le Royaume-Uni.



3. LE VÉHICULE HYBRIDE *Hymne*, de la Société Renault, associe la propulsion électrique (en rose) et un moteur thermique (en vert) qui peuvent être utilisées indépendamment ou simultanément.

Un superviseur électronique commande l'utilisation des batteries, pour fournir un surcroît de puissance au moteur thermique, par exemple, ou leur recharge par celui-ci.

accélérations. Comme les moteurs à combustion interne ont un rendement qui atteint 40 pour cent, lorsqu'ils tournent à régime constant, le rendement total d'un véhicule hybride serait même supérieur à celui d'un véhicule purement électrique.

Le mode de production d'électricité embarqué le plus prometteur est toutefois la pile à combustible qui, dans le meilleur des cas, consomme de l'hydrogène et ne rejette que de la vapeur d'eau (des piles à combustible qui consomment d'autres carburants, tels le gaz naturel, le méthane ou l'essence, ont des rendements inférieurs et rejettent des gaz polluants). Couramment utilisées pour propulser les engins spatiaux, les piles à combustible ont été testées sur un tracteur expérimental dès 1959. Au milieu des années 1990, des prototypes d'autobus à piles à combustible ont prouvé que cette technique est utilisable pour les transports terrestres.

Les piles à combustible ont l'inconvénient d'être encombrantes et coûteuses. Les mieux adaptées à la

propulsion automobile, celles qui sont équipées de membranes échangeuses de protons, coûtaient 500 000 francs par kilowatt il y a quelques années. Ce coût devrait descendre à quelques dizaines de milliers de francs au début du siècle prochain, et peut-être jusqu'à moins de 1 000 francs lorsque les piles à combustible seront produites en série. Elles seraient alors compétitives face aux moteurs à combustion interne. La Société *Daimler-Benz* a annoncé, en juillet 1996, son intention de produire des véhicules *Mercedes* à piles à combustible dès 2006.

Nous l'avons vu, l'hydrogène serait le combustible le moins polluant. On peut l'obtenir de différentes manières, mais la raréfaction des carburants fossiles et l'augmentation de leur prix favoriseront sans doute la synthèse de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à l'aide d'énergie solaire. La généralisation de cet hydrogène solaire assainirait toute la chaîne de production de l'énergie. L'équivalent d'un litre d'essence ne devrait pas coûter plus de cinq francs.

De l'électricité à l'électronique

La partie énergétique des véhicules électriques n'est pas la seule qui ait été perfectionnée. Les progrès en électronique de puissance ont réduit de 40 pour cent en dix ans le poids et le prix des ensembles de transmission. Du côté de l'électronique de commande, des dispositifs de gestion de la batterie et du moteur, disponibles aujourd'hui, permettraient de gagner jusqu'à 50 pour cent d'énergie.

Jusqu'au début des années 1990, presque tous les véhicules électriques étaient équipés de moteurs à courant continu, plus faciles à alimenter à partir d'accumulateurs. La mise au point de petits dispositifs qui convertissent le courant continu en courant alternatif permet aujourd'hui d'utiliser des moteurs à courant alternatif, plus fiables, d'une maintenance plus simple, de rendement supérieur et plus faciles à coupler au système de freinage actif. L'ensemble formé par le moteur et l'électronique de puissance

d'un véhicule électrique a aujourd'hui des dimensions, un poids et un coût de fabrication inférieurs à ceux d'un moteur à combustion interne de caractéristiques équivalentes.

Tous les grands constructeurs automobiles se sont lancés dans la mise au point de véhicules électriques, mais les quelques milliards de francs investis à cette fin dans le monde, au cours des années 1990, sont bien inférieurs aux autres investissements du secteur : l'industrie automobile américaine

dépense à elle seule plus de 25 milliards de francs chaque année dans la publicité, et encore plus en recherche et développement. Les compagnies pétrolières prévoient un investissement de plus de 50 milliards de francs dans les dix prochaines années, aux États-Unis, pour produire de nouvelles essences moins polluantes.

Ce sont surtout les pressions politiques qui incitent les constructeurs à mettre au point les véhicules électriques. La Californie a ainsi adopté

une convention qui stipulait que les véhicules «zéro émission» devaient représenter deux pour cent des ventes en 1998, cinq pour cent en 2001 et dix pour cent en 2003. Les constructeurs devaient payer 25 000 francs d'amende par véhicule zéro émission non vendu. En mars 1996, sous la pression des compagnies pétrolières et des constructeurs automobiles, les échéances de 1998 et de 2001 ont été supprimées : les constructeurs refusaient d'investir pour fabriquer des

Les constructeurs français et les véhicules électriques

Dès les années 1950, des ingénieurs du Groupe *PSA Peugeot Citroën* plaidaient pour la mise au point de véhicules électriques. Le renforcement des normes anti-pollution, la menace d'une pénurie des carburants fossiles et la mode écologiste favorisent l'essor de ce mode de propulsion. La mise sur le marché de véhicules électriques a été possible grâce à des améliorations des performances des batteries, des systèmes de contrôle et des moteurs, mais, surtout, grâce à la baisse de leurs prix, qui sont aujourd'hui du même ordre de grandeur que celui des autres automobiles.

Le principal problème reste l'autonomie : en ville une *Peugeot 106 Electric* ou une *Citroën Saxo* électrique ne parcourent pas plus de 80 kilomètres sans recharge. La solution ne viendra que d'une amélioration des batteries : l'augmentation du rendement des moteurs, qui est déjà supérieur à 85 pour cent, n'apporterait qu'un faible gain.

Nous espérons au moins doubler cette autonomie dans moins de dix ans : une voiture parcourra alors 200 kilomètres environ sans recharge. Le nickel et le cadmium des batteries actuelles seront remplacés par des couples électrochimiques qui équipent aujourd'hui des téléphones ou des calculatrices (nickel/hydrures métalliques ou lithium/carbone). Nous travaillons aujourd'hui, avec les fabricants d'accumulateurs, à l'adaptation de ces systèmes à la propulsion automobile.

L'amélioration des performances des batteries permettra-t-elle un jour aux véhicules électriques d'égaliser en autonomie les véhicules actuels à essence ? En attendant la réponse à cette question, nous travaillons (en particulier avec la Société *Renault*) à un projet qui combine les avantages des deux modes de propulsion : une turbine à gaz, alimentée par du gazole, est reliée à un turbo alternateur qui alimente un moteur électrique et une batterie. En ville, le véhicule sera purement électrique. Sur route, la turbine à gaz alimentera directement le moteur et rechargera les batteries.

Ce véhicule sera globalement peu polluant : la combustion catalytique à basse température, sans flamme, ne produit pas d'oxydes d'azote. Quand le système est bien réglé, seul du dioxyde de carbone est émis. La commercialisation commencerait dans une dizaine

d'années ; d'ici là, nous devons trouver le moyen de fabriquer les véhicules de ce type à des coûts compatibles avec les prix des automobiles.

Patrick BLAIN, Groupe *PSA Peugeot Citroën*

Les Sociétés *Renault* et *Peugeot* ont été, en 1995, les premiers constructeurs au monde à fabriquer en série des véhicules électriques. La Société *Renault* vend, avec des moteurs à courant continu, la *Clio* et l'*Express* équipées de batteries nickel/cadmium, et le *Master* équipé de batteries au plomb. Il existe un petit marché, pour ces véhicules non polluants, silencieux et faciles à conduire : nous en fabriquons quelques centaines par an.

La Société *Renault* est associée à d'autres partenaires (dont le Groupe *PSA Peugeot Citroën*) sur plusieurs projets de véhicules hybrides qui pourraient être commercialisés d'ici dix ans ; à beaucoup plus long terme, des voitures seront peut-être propulsées par des piles à combustible.

La pile à combustible, qui combine de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, fonctionne bien aujourd'hui. L'hydrogène n'est pas un carburant plus dangereux que les autres, même s'il faudra résoudre les problèmes de distribution et de stockage. Toutefois, l'utilisation de piles à combustible dans l'automobile rencontre un problème... de taille. La Société *Balard*, au Canada, avait présenté, en 1990, un autobus électrique dont un tiers environ du volume était occupé par une pile à combustible et par ses accessoires. En 1995, l'ensemble n'occupait que l'arrière d'un autobus conventionnel. Nous cherchons aujourd'hui à faire entrer le dispositif à l'arrière d'un break familial. Avant d'en envisager la commercialisation, il faudra encore réduire l'encombrement : nous ignorons quand nous y parviendrons.

Dans les prochaines années, l'automobile se diversifiera. Déjà, à travers le monde, de nombreux carburants sont utilisés : essence, gazole, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, méthanol. Les véhicules électriques, commercialisés en France depuis un an, et les véhicules hybrides s'ajouteront sans doute à la liste.

Claude SUTREN, Société *Renault*

véhicules dont la technique serait, selon eux, rapidement obsolète.

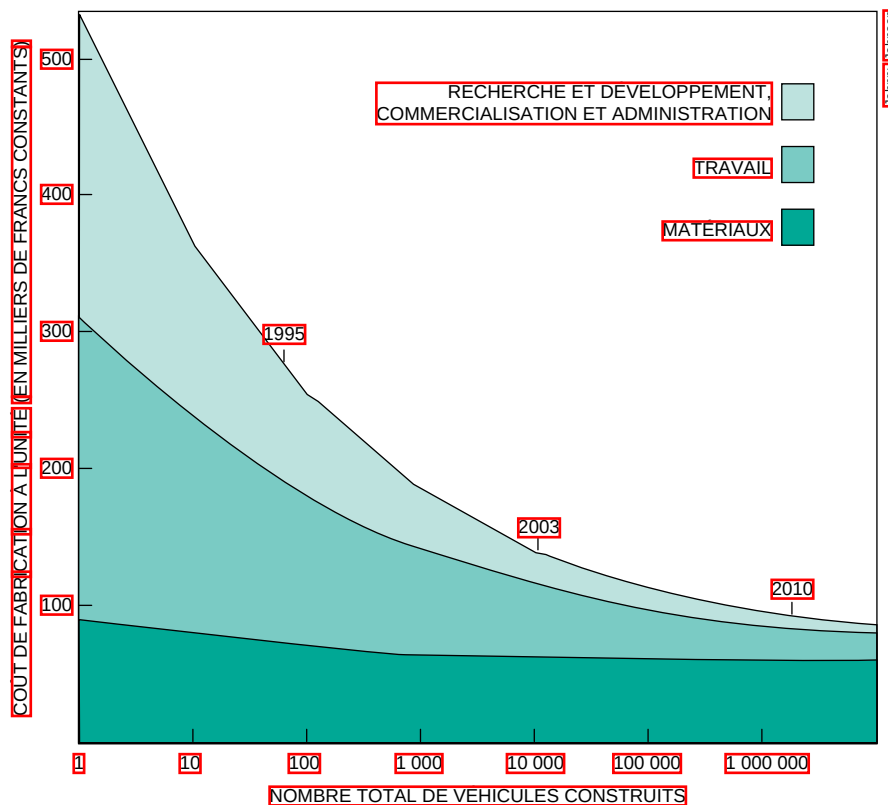
Des choix industriels

Un facteur déterminant du succès des véhicules électriques sera leur prix. Une *Peugeot 106 Electric* coûte 93 600 francs ; une *Renault Clio électrique*, 93 200 francs. Ces prix n'incluent pas les batteries, qui sont louées, pour environ 500 francs par mois, avec un dépôt de garantie de 2 500 francs, qui assure la récupération de la batterie usagée. Il est impossible d'annoncer des prix concurrentiels tant que les véhicules ne seront pas produits en grande série. L'examen de l'évolution des prix d'autres biens manufacturés, dont les automobiles classiques, suggère toutefois que le passage à une production en grande série diviserait par deux les prix actuels.

Comme ils ne peuvent ignorer complètement les véhicules électriques, les constructeurs minimisent les coûts de production. Beaucoup se contentent de remplacer le moteur thermique et la transmission de véhicules existants par un groupe propulseur électrique. D'autres sous-traitent cette adaptation à de petites entreprises spécialisées. D'autres enfin imaginent des véhicules de taille réduite adaptés à la circulation urbaine, telles la *Zoom*, des Sociétés *Renault* et *Matra*, ou la *Tulip*, du Groupe *PSA Peugeot Citroën*, pour la circulation urbaine. De tous les grands constructeurs, seule la Société *General Motors* a aujourd'hui lancé la production en série d'un véhicule électrique spécifique, nommé *EV-1*.

Le prix des batteries (et des piles à combustible) maintiendra probablement toujours les prix d'achat des véhicules électriques au-dessus de ceux des véhicules à essence de même catégorie. Toutefois, le prix au kilomètre devrait être finalement égal. Le carburant des véhicules électriques est bon marché, la maintenance est minime et les moteurs électriques ont une durée de vie supérieure à celle des moteurs à essence. Si l'on tient compte des conséquences sur la pollution atmosphérique, de l'effet de serre et d'autres facteurs externes (que la société doit supporter), les véhicules électriques sont beaucoup plus intéressants que les véhicules à essence.

Comment faire comprendre aux consommateurs qu'ils ont intérêt à abandonner l'essence ? Le passage des



4. LA PRODUCTION EN GRANDE SÉRIE permettrait aux constructeurs de baisser le prix des véhicules électriques. Le coût des matières premières deviendrait l'élément principal du prix de revient (ces estimations sont fondées sur les données de l'industrie automobile actuelle, où une usine produit au moins 100 000 véhicules par an).

moteurs à combustion interne aux véhicules électriques semble inéluctable, même s'il est lent et incomplet. Quand et sous quelle forme la transition interviendra-t-elle ? Comment la mener à bien ? Les États doivent remplir leur rôle en accordant des subventions qui conduisent les consommateurs et les entreprises à intégrer les coûts externes, tels ceux de la pollution, dans leur raisonnement économique, et en ne finançant que des projets innovants qui mettent en jeu des techniques de pointe, et non ceux

que le secteur privé entreprendrait de toute façon.

Le premier constructeur qui commercialisera un véhicule électrique à un prix compétitif bénéficiera de marchés considérables, dans le monde entier. Les véhicules électriques auront du succès dans les régions où la pollution est un problème majeur, où l'on privilégie la fiabilité et une maintenance réduite aux dépens des performances, où l'électricité est peu coûteuse et où les investissements pétroliers sont modérés.

Daniel SPERLING dirige l'Institut d'études sur les transports de l'Université de Californie.

D. SPERLING, *New Transportation Fuels : A Strategic Approach to Technological Change*, University of California Press, 1988.

Choosing an Alternative Transportation Fuel : Air Pollution and Greenhouse Gas Impacts, OCDE, Paris 1993.

James J. MACKENZIE, *The Keys to the Car*, World Resources Institute, 1994.

Michael Brian SCHIFFER, *Taking Charge : The Electric Automobile in America*,

Smithsonian Institution Press, 1994.

D. SPERLING, *Future Drive : Electric Vehicles and Sustainable Transportation*, Island Press, 1995.

Kenneth KURANI, Thomas TURRENTINE et Daniel SPERLING, *Testing Electric Vehicle Demand in «Hybrid Households» Using a Reflexive Survey*, in *Transportation Research*, partie D, vol. 1, n° 2 (à paraître).

MobIE, magazine de l'AVERE (Association européenne des véhicules électriques routiers), AVERE France, Paris-La Défense.

L'énergie des véhicules électriques

CORD-HENRICH DUSTMANN

Grâce à de nouveaux types d'accumulateurs, les performances des véhicules électriques urbains vont s'améliorer.

Lorsque Carl Friedrich Benz et Gottlieb Wilhelm Daimler présentèrent, indépendamment, leurs fiacres motorisés, en 1885 et en 1886, des voitures électriques circulaient déjà dans Paris depuis quelques années. Puis, en 1899, la *Jamais Contente* du Belge Camille Jenatzy, avec son moteur électrique, fut le premier véhicule autopropulsé à dépasser la vitesse de 100 kilomètres à l'heure.

Au tournant du siècle, aux États-Unis, le nombre des voitures à essence était inférieur (22 pour cent du parc automobile) au nombre des voitures électriques et à vapeur (respectivement, 38 et 40 pour cent). On appréciait l'électricité pour sa facilité d'utilisation, sa fiabilité et sa propreté ; l'autonomie et la puissance n'étaient pas encore des critères importants.

La découverte du démarreur électrique pour le moteur à explosion a donné à celui-ci un avantage décisif. En 1995, les véhicules électriques représentaient à peine 0,01 pour cent des 47,5 millions d'automobiles du parc allemand, dont la moitié étaient des voitures particulières.

Des bricoleurs, des bureaux d'études et des constructeurs automobiles présentent régulièrement des concepts nouveaux et intéressants de véhicules totalement ou partiellement électriques. En France, par exemple, à la fin de 1996, plus de 3 000 véhicules électriques sont immatriculés, dont plus de 1 000 l'ont été dans l'année. Certains sont fabriqués industriellement et vendus : le marché progresse. Toutefois, les moteurs à combustion interne ont encore de beaux jours devant eux : à moyen terme, les véhicules qu'ils équipent

resteront moins coûteux et leur utilisation restera plus souple.

Le principal handicap des véhicules électrique est la difficulté du stockage de l'énergie électrique. Tandis que 40 litres d'essence fournissent une énergie de 1 400 mégajoules, dont 8 à 15 pour cent (selon le mode de conduite) sont convertis par le moteur en énergie de propulsion, une batterie de volume équivalent ne contient qu'une énergie d'environ 100 mégajoules, que le moteur utilise à 80 ou 90 pour cent.

En outre, les véhicules électriques ne s'imposent que si leur conduite est aussi confortable que celle des véhicules à moteur thermique : la batterie doit fournir de l'énergie à la demande, uniquement en fonction des besoins du véhicule et quelles que soient les conditions extérieures. Que la voiture soit en stationnement ou qu'elle roule sur une route accidentée, par temps chaud, froid, sec ou humide, elle doit répondre aux commandes du conducteur.

Les constructeurs visent, pour un avenir proche, la commercialisation de batteries qui permettront à des véhicules d'atteindre une vitesse de 120 kilomètres à l'heure, de rouler une centaine de kilomètres sans recharge, et qui résisteront à un millier de cycles de charge et de décharge (soit environ 150 000 kilomètres parcourus en dix ans). Ces caractéristiques constituent un compromis entre l'énergie et la puissance de la batterie : avec certaines batteries, des véhicules prototypes ont une autonomie de 200 kilomètres et, sur les véhicules électriques actuels, la vitesse de pointe n'est pas limitée par la batterie mais par le moteur.

Une bonne batterie

Comment les fabricants de batteries atteindront-ils ces objectifs ? Un accumulateur est caractérisé par sa densité d'énergie et par sa densité de puissance. La densité d'énergie, tout d'abord, est la quantité d'énergie stockée dans un kilogramme (ou dans un litre) d'accumulateur ; elle détermine l'autonomie du véhicule. On essaie aujourd'hui d'atteindre 360 kilojoules par kilogramme. D'autre part, la densité de puissance est la puissance électrique maximale par kilogramme, qui détermine la vitesse maximale et l'accélération ; la densité de puissance d'un accumulateur satisfaisant serait de 150 watts par kilogramme (200 watts par litre).

Les réactions électrochimiques de charge et de décharge doivent être totalement réversibles. Le système de freinage actif relié aux roues, qui transforme le moteur en générateur, recharge en effet la batterie à chaque décélération, quel que soit son état de charge. Le système doit aussi fonctionner sans entretien et ne présenter aucun danger supplémentaire par rapport à un véhicule classique, même en cas d'accident grave. Enfin le prix de la batterie ne doit pas trop grever celui de la voiture électrique. Le coût associé dépend, entre autres paramètres, des matériaux utilisés et de la durée de vie de la batterie. Pour qu'une batterie soit commercialisable, il faut que les électrodes et les électrolytes utilisés soient chimiquement stables pendant toute sa durée de vie.

Des laboratoires universitaires et industriels testent aujourd'hui plusieurs systèmes électrochimiques. Peu

répondront à l'ensemble des critères que nous venons d'énumérer, de sorte que les constructeurs devront trouver des compromis. La batterie au plomb à électrolyte gélifié, par exemple, est la plus utilisée aujourd'hui, parce qu'elle est la moins coûteuse et que c'est celle dont on connaît le mieux le fonctionnement. Sa densité

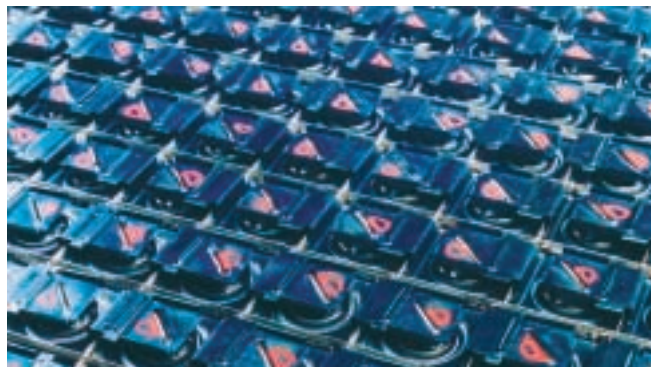
d'énergie est toutefois trop faible. La batterie Zebra (l'acronyme anglais d'un projet de recherche sur les batteries sans émissions), dont la Société AEG Anglo Batteries prépare la production en série, est beaucoup plus performante : elle stocke l'énergie sous forme de sodium et de chlorure de nickel.

La batterie sodium /chlorure de nickel

On fabrique un élément de la batterie Zebra en plaçant, dans un tube d'alumine, du chlorure de sodium et du nickel, en poudre, une électrode de nickel et du chlorure d'aluminium et de sodium. Le tube est ensuite



1. LES VEHICULES ÉLECTRIQUES, équipés de batteries, sont rechargés par un branchement électrique standard. Les utilisateurs profitent des arrêts, à domicile ou dans des parcs de stationnement, pour «faire le plein».



2. UNE BATTERIE ZEBRA, composée de 200 à 500 cellules, délivre une tension d'environ 300 volts (à gauche). Le boîtier métallique à double paroi isole thermiquement la batterie, qui fonctionne à 300 °C,



de l'environnement extérieur. Ce boîtier protège aussi contre d'éventuelles fuites lors de chocs violents, tel celui qu'a subi une batterie lors d'un essai de chute (à droite).

encapsulé dans un autre tube métallique. L'alumine utilisée ne conduit pas les électrons, mais elle est perméable aux ions sodium lorsque la température atteint environ 300 °C. Lorsque l'on charge l'élément à cette température de fonctionnement, les ions sodium traversent le tube d'alumine et sont réduits en sodium métallique, tandis que le nickel métallique est oxydé en ions nickel qui se combinent avec les ions chlorure. Le contact entre le chlorure de nickel ainsi formé et l'alumine est assuré par le chlorure d'aluminium et de sodium, liquide et conducteur des ions sodium à cette température. Le sodium métallique, très inflammable à l'air, ne se forme que pendant la charge, alors que l'ensemble est scellé.

Tout le courant qui circule dans l'accumulateur est utilisé dans la réaction que nous venons de décrire (ou pour la réaction inverse lors de la décharge): il n'y a pas d'autre réaction

chimique possible. Il suffit de suivre en permanence le courant avec un dispositif électronique d'intégration pour connaître à tout instant le niveau de charge de la batterie. En outre, à température ambiante, l'alumine n'est pas perméable aux ions sodium : l'accumulateur peut rester chargé très longtemps sans être utilisé.

Une telle cellule a une tension à vide de 2,58 volts et une capacité de 32 ampères-heures. En associant une centaine de cellules en série, on obtient une tension d'environ 300 volts et, en associant en parallèle des groupes de cellules en série, on atteint des capacités de 64 ou 96 ampères-heures. La résistance électrique des cellules est telle que, si elles n'ont pas toutes le même niveau de charge, la répartition du courant s'équilibre.

Les cellules élémentaires sont assemblées debout, dans un boîtier isolé de l'extérieur par une double paroi sous vide. La température interne est

ajustée par un chauffage électrique et un réfrigérant qui assurent un bon fonctionnement de la batterie entre les températures extérieures de -40 °C à 75 °C. Les réactions de charge et de décharge de la batterie sont indépendantes de son niveau de charge : la même densité de puissance est fournie jusqu'à 80 pour cent d'utilisation de la charge.

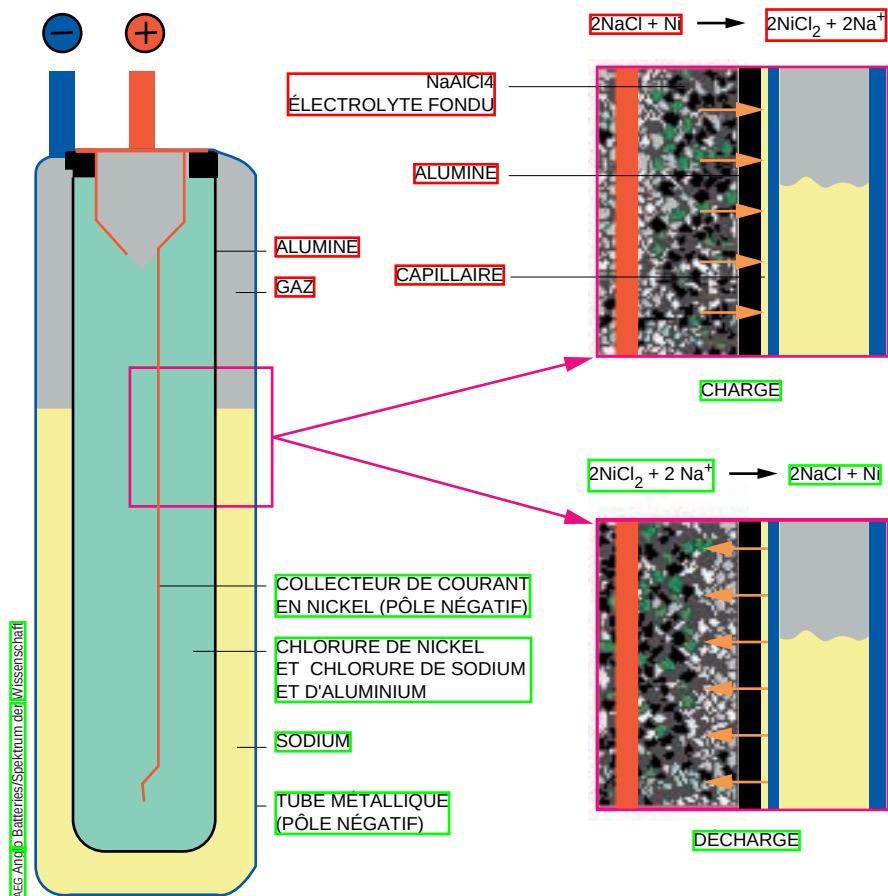
Cette batterie est fiable et sûre. Si une cellule tombe en panne, la capacité est réduite de moins d'un pour cent. Si le tube en alumine se casse, le sodium et le chlorure d'aluminium et de nickel réagissent, ce qui conduit à la formation d'aluminium métallique : les deux électrodes sont alors court-circuitées et le courant circule librement à travers la cellule, ce qui préserve le fonctionnement global de la batterie. La puissance ne diminue pas notablement tant que moins de cinq pour cent des cellules sont hors service.

Nous avons analysé le fonctionnement des batteries Zebra dans des conditions défavorables, et nous avons testé 210 spécimens dans des conditions normales d'utilisation, sur des bancs d'essai, ainsi que sur 75 véhicules dont les conducteurs ont parcouru au total 1,6 million de kilomètres. Quelques batteries ont fonctionné pendant quatre ans, certaines plus de 100 000 kilomètres, sans qu'une seule cellule ait été changée. Une durée de fonctionnement de dix ans paraît donc réaliste.

Une batterie sûre

Nous avons éliminé les deux risques que les accumulateurs font courir en cas d'accident : l'électrocution et la fuite de produits toxiques. Tout d'abord, un interrupteur général isole la batterie du reste du véhicule, en cas de choc violent. En cas de fausse manœuvre ou de panne des systèmes électroniques de contrôle ou de charge, le court-circuit déjà évoqué protège la batterie contre une charge ou une décharge excessives. Si des composants sont détériorés, le système s'éteint automatiquement.

En outre, lors d'une déformation violente d'une cellule, le tube d'alumine est le premier élément endommagé : le sodium liquide est immédiatement oxydé par le chlorure de sodium et d'aluminium, ce qui forme de l'aluminium et du chlorure de sodium ; toute fuite est ainsi bloquée.



3. UNE CELLULE DE LA BATTERIE ZEBRA est composée d'un tube en alumine encapsulé dans un tube métallique. Lors de la charge (à droite, en haut), le chlorure de sodium et le nickel contenus dans le tube d'alumine sont transformés en sodium et en chlorure de nickel. Les ions sodium traversent l'alumine et sont réduits en sodium métallique dans le tube métallique. La réaction inverse se produit lors de la décharge (à droite, en bas). Du chlorure de sodium et d'aluminium, liquide à la température de fonctionnement, assure la conduction dans le tube d'alumine.

Cette réaction chimique ne dégage que les deux tiers de l'énergie libérée par la réaction normale de décharge, qui ne peut plus se produire : l'aluminium et le chlorure de sodium formés recouvrent l'électrode négative d'une couche isolante.

Le boîtier métallique et les joints résistent à des températures atteignant 800 °C, et les températures d'ébullition élevées des matériaux contenus dans la cellule évitent une trop grande augmentation de la pression interne : il n'y a pas de dégagement gazeux. De même, dans le cas extrême où toute l'énergie serait dissipée sous forme de chaleur lors d'un court-circuit, la température interne resterait inférieure à 1 000 °C, et les parois externes atteindraient à peine 100 °C.

Au cours d'un essai, nous avons laissé tomber verticalement, sur une glissière fixe de sécurité, une batterie entièrement chargée et à la température interne de 300 °C. Le choc s'est produit à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure : toutes les cellules ont été détruites, et presque toute l'énergie contenue dans la batterie s'est transformée en chaleur. Toutefois, il ne s'en est échappé qu'un peu de fumée blanche : de l'hydroxyde d'aluminium, inoffensif, et des traces d'acide chlorhydrique.

Naturellement, la batterie *Zebra* est en concurrence avec d'autres accumulateurs et, notamment, avec les batteries qui sont composées de nickel et d'hydrures métalliques. Leur densité d'énergie est inférieure de 30 à 40 pour cent, mais leur puissance massique est supérieure. Elles conviendraient particulièrement aux véhicules hybrides qui rechargent eux-mêmes leurs batteries pendant qu'ils roulent avec un moteur thermique.

Dans moins de dix ans, les batteries à base de lithium et d'hydrures métalliques, dont les caractéristiques électriques sont comparables à celles des batteries *Zebra*, seront utilisables dans les véhicules. La concurrence conduira les ingénieurs à améliorer leurs systèmes et à en mettre au point de nouveaux, et permettra ainsi le développement des voitures électriques.

Cord-Henrich DUSTMANN est directeur commercial de la Société *AEG Anglo Batteries*, à Ulm.

Voir sans regarder

PAUL KWIAT • HARALD WEINFURTER • ANTON ZEILINGER

L'optique quantique détecte des objets sans interagir avec eux, même par de la lumière.

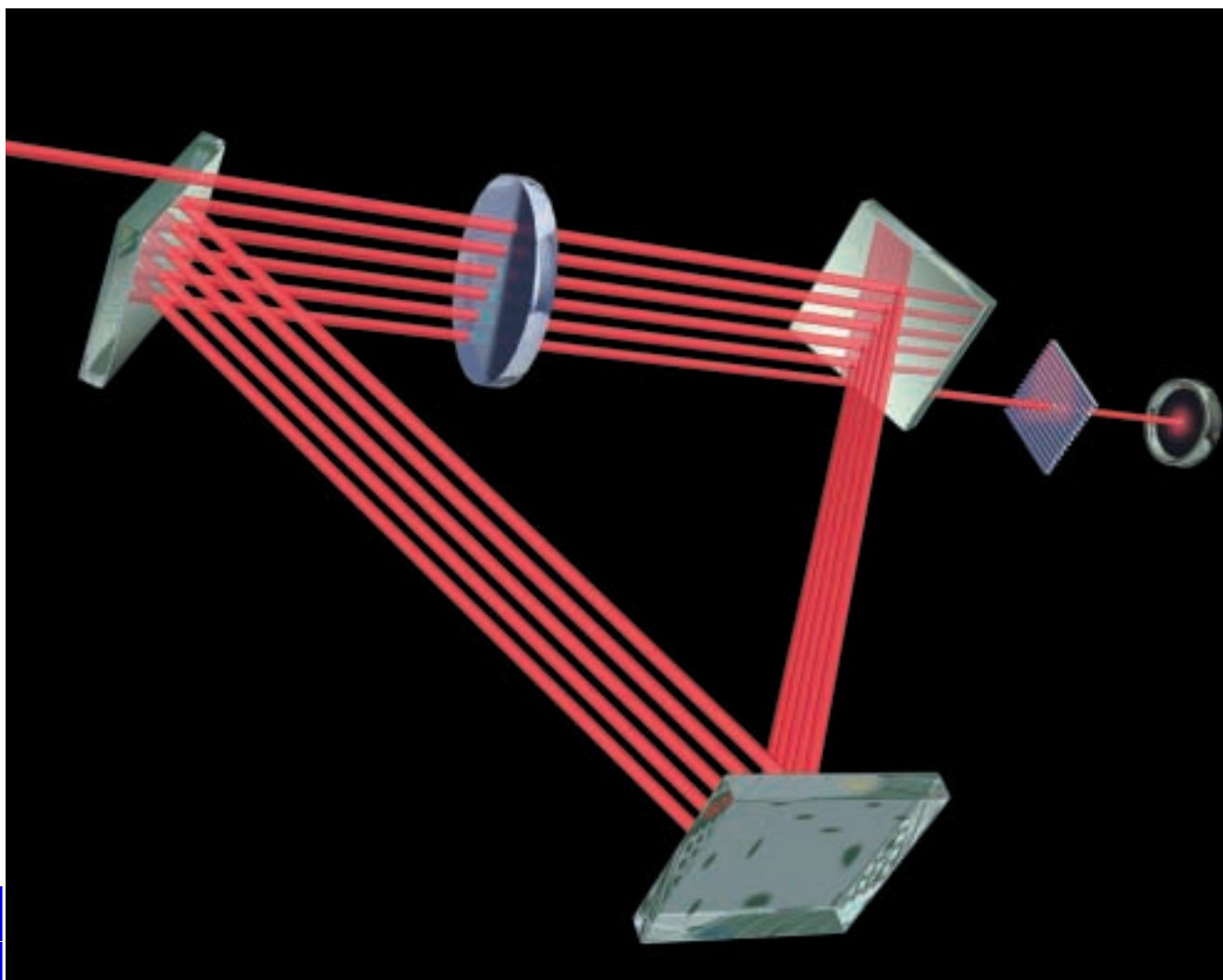
Les mythes grecs rapportent comment Persée affronta Méduse, créature aux cheveux de serpents qu'aucun mortel ne pouvait contempler en face sans être instantanément pétrifié. Certaines versions du mythe racontent que Persée échappa à la pétrification grâce à un bouclier que lui avait donné Hermès : il prit soin

de ne regarder la Gorgone qu'indirectement, avant de lui couper la tête.

En 1962, Dennis Gabor, l'inventeur de l'holographie, affirma que Persée n'aurait pas échappé à Méduse si les lois de la physique avaient été respectées : aucun objet, énonça-t-il, ne pouvait être observé avec moins d'un photon, ou grain de lumière.

Toutefois, ces dernières années, les spécialistes de l'optique quantique ont appris que cette affirmation n'était ni évidente ni, même, exacte : ils savent maintenant déterminer la présence d'un objet même quand aucun photon ne l'a percuté.

Une telle mesure sans interaction est paradoxale : sans interaction, com-



Michael Socolman

1. L'EFFET ZENON QUANTIQUE, version du paradoxe de l'impossibilité du mouvement forgé par le philosophe grec Zénon, est utilisé dans des dispositifs qui font des mesures sans interagir avec les

systèmes sur lesquels porte la mesure. Pour observer cet effet, on utilise un faisceau laser qui suit un trajet en escalier menant à un détecteur de photons.

ment obtenir une mesure? Cette question est légitime en mécanique classique, quand on décrit le mouvement des ballons de football, des planètes ou, plus généralement, des objets assez gros ; mais il en va autrement en mécanique quantique : au royaume des électrons, des photons et des autres particules subatomiques, des mesures sans interaction sont possibles quand on utilise des effets inédits et des systèmes expérimentaux bien conçus. Armé de physique quantique, Persée aurait pu trouver un moyen de «voir» Méduse sans aucune lumière provenant de la Gorgone ; il aurait pu voir sans regarder.

Des détecteurs quantiques qui mesureraient ainsi sans interaction auraient de nombreuses utilisations dans la vie quotidienne, mais ce sont surtout les conséquences philosophiques de leur fonctionnement qui sont intéressantes. Elles s'évaluent mieux grâce à des expériences de pensée, c'est-à-dire des analyses qui envisagent les résultats d'expériences qu'on ne cherche pas à réaliser en pratique.

Imaginons une variation du jeu de bonneteau, avec deux coquilles de noix et un cailloux caché sous l'une d'elles. Le caillou est spécial : il est réduit en poussière par la lumière. Le jeu consiste à chercher l'emplacement du caillou sans soulever les coquilles, et en lui évitant toute perturbation ; si le caillou est réduit en poussière, le joueur perd la partie.

Il semble impossible de gagner à tout coup, mais on gagne un coup sur deux si l'on soulève la coquille supposée ne pas contenir le caillou : si rien n'apparaît, alors le caillou se trouve sous l'autre coquille ; si un peu de poussière est présente, c'est que le caillou s'y trouvait.

Poursuivons notre modification du jeu en le simplifiant, de sorte qu'un joueur limité aux lois de la physique classique ne puisse plus gagner : nous ne conservons qu'une seule coquille, et une chance sur deux que le caillou soit dessous. Le but du jeu est de dire si le caillou est présent, toujours sans l'exposer à la lumière.

Supposons qu'il y a un caillou sous la coquille. Si le joueur ne regarde pas sous la coquille, il n'obtient pas d'information. S'il regarde, alors il sait que le caillou était là, mais, comme il l'a exposé à la lumière, il ne retrouve qu'un tas de poussière. Pourrait-on diminuer l'éclairement, de sorte que la lumière

qui atteint le caillou soit minimale ? Pour voir quelque chose, il faut au minimum un photon.

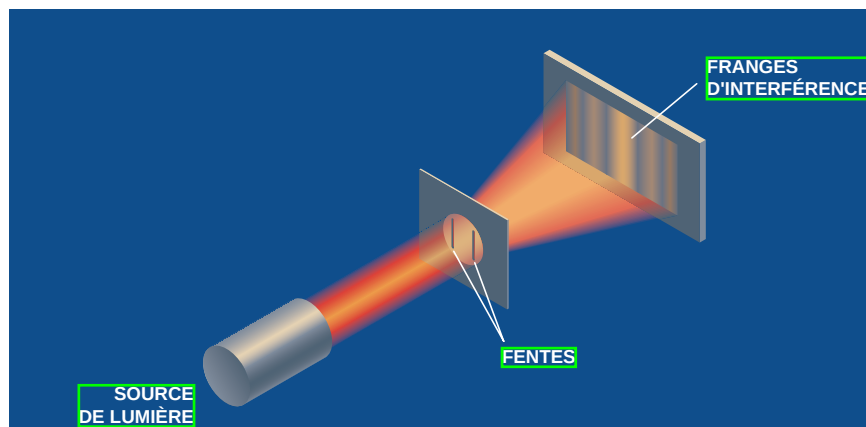
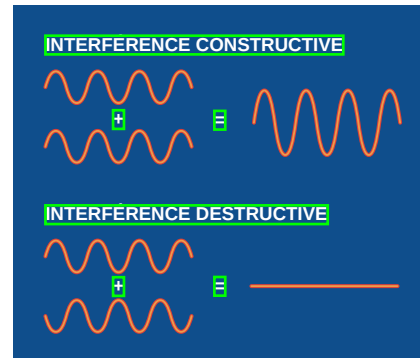
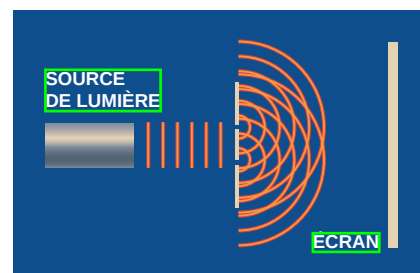
Elitzur, Vaidman et la bombe

Avec un caillou, le jeu n'a pas de conséquences dramatiques, mais, à l'Université de Tel Aviv, C. Elitzur et Lev Vaidman ont proposé un problème équivalent, où le caillou serait remplacé par une bombe qui exploserait en recevant le moindre photon, quelle que soit son énergie. Comment déterminer alors si la bombe se trouve sous une coquille ?

C. Elitzur et L. Vaidman ont trouvé une solution qui ne donne un bon résultat qu'une fois sur deux, mais qui a montré qu'il existe un espoir de gagner un jour. Nous avons mentionné que la lumière est constituée de photons, mais, dans certaines circonstances, elle présente des propriétés purement ondulatoires et, notamment, peut former des interférences. Ces dernières se forment quand deux ondes se rencontrent dans une même partie de l'espace. Par exemple, dans l'expérience des fentes d'Young, la lumière traverse simultanément deux fentes parallèles, avant d'atteindre un écran situé derrière les fentes. Sur l'écran, les interférences se présentent sous la forme de raies alternativement sombres et claires (voir la figure 2). Les raies claires correspondent à des zones où les creux et les crêtes de la lumière provenant d'une fente se superposent respectivement aux crêtes et aux creux de la lumière provenant de l'autre fente. Les raies sombres correspondent à

des interférences destructives, où les crêtes de l'une des ondes se superposent aux creux de l'autre, et vice versa. Autrement dit, les raies claires correspondent à des zones de l'écran que les photons ont de fortes probabilités de frapper, et les bandes sombres de faibles probabilités.

La mécanique quantique montre que des interférences apparaissent lorsqu'un événement peut se produire de plus d'une façon, si ces façons sont indiscernables (cette définition de l'interférence est plus générale que celles qui sont généralement données dans les manuels). Dans l'expérience d'Young, la lumière a deux façons d'atteindre l'écran (elle peut passer par la fente supérieure ou par la fente inférieure), et on ne cherche pas à savoir



2. DES INTERFÉRENCES apparaissent lorsqu'un rayon laser traverse un écran percé de deux fentes : derrière l'écran, des ondes concentriques interfèrent (en haut). Ces ondes peuvent s'ajouter de façon constructive ou destructive (au milieu), engendrant une figure d'interférence composée d'une alternance de bandes sombres et claires (en bas).

quel photon passe par quelle fente. Si nous cherchions à savoir par quelle fente est passé un photon, les photons se répartiraient en tous points de l'écran, et les interférences n'apparaîtraient pas.

Dans leur expérience de pensée, C. Elitzur et L. Vaidman utilisent un interféromètre, c'est-à-dire un appareil composé de deux miroirs et de deux lames séparatrices. La lumière pénétrant dans l'interféromètre arrive sur une des deux lames et se répartit entre deux trajets optiques : un trajet «haut», et un trajet «bas». Les faisceaux se rejoignent sur la seconde lame, qui envoie la lumière sur deux détecteurs de photons (voir la figure 4). Ainsi l'interféromètre offre à chaque photon deux chemins possibles entre la source lumineuse et le détecteur.

Quand on ajuste les longueurs des trajets optiques de sorte qu'elles soient égales, le dispositif est comme un interféromètre de Young. Les détecteurs remplacent l'écran où apparaissent les franges claires et sombres. L'un des détecteurs ne détecte que l'équivalent des franges claires d'une figure d'interférences (nous le nommerons détecteur D-clair) ; l'autre enregistre les franges sombres (nous le nommerons détecteur D-sombre).

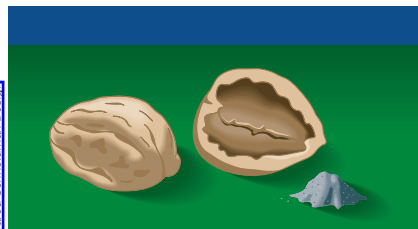
Un caillou dans le passage

Que se passe-t-il quand un caillou bloque l'un des trajets optiques, par exemple le trajet supérieur ? Si l'on considère que la première lame séparatrice répartit les photons au hasard, alors la probabilité qu'un photon suive la trajectoire supérieure est égale à 50 pour cent ; cette probabilité est donc celle que le photon heurte le caillou et ne parvienne jamais à la seconde lame.

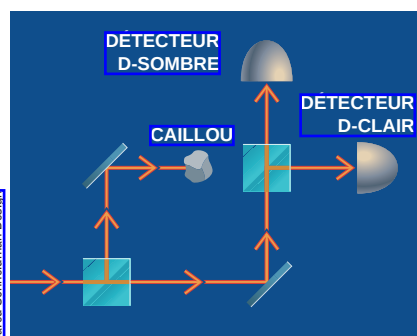
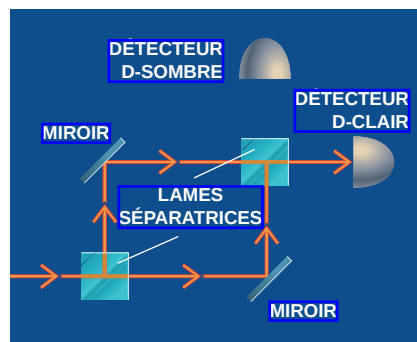
Si le photon suit le trajet inférieur, il ne rencontre pas le caillou. En outre, il n'y a plus d'interférences, car le photon ne parvient à la seconde lame que suivant un seul trajet. Aussi le photon fait un autre choix aléatoire, à la seconde lame : il peut être réfléchi, et frapper le détecteur D-clair, ce qui ne fournit pas d'information, car l'événement aurait pu se produire même si le caillou n'avait pas été là. Cependant le photon peut aussi frapper le détecteur D-sombre : nous saurons alors avec certitude que le caillou se

trouvait sur l'un des chemins de l'interféromètre, car si tel n'était pas le cas, le détecteur D-sombre n'aurait rien capté ; et, dans la mesure où un seul photon a été envoyé et qu'il a atteint le détecteur, il n'a pas pu heurter le caillou. Ainsi nous avons réalisé une mesure sans interaction : nous avons déterminé la présence du caillou sans interagir avec lui.

Bien que cette procédure ne soit efficace que dans certains cas, l'efficacité est absolue dans les cas favorables. La base de cette magie quantique est



3. LE JEU DE BONNETEAU a été réexploré par les physiciens qui ont voulu démontrer la faisabilité de la mesure sans interaction. Imaginons qu'un caillou sensible à la lumière soit caché sous des coquilles de noix. Comment déterminer sa position sans retourner les coquilles, ce qui risquerait de le transformer en poussière ?



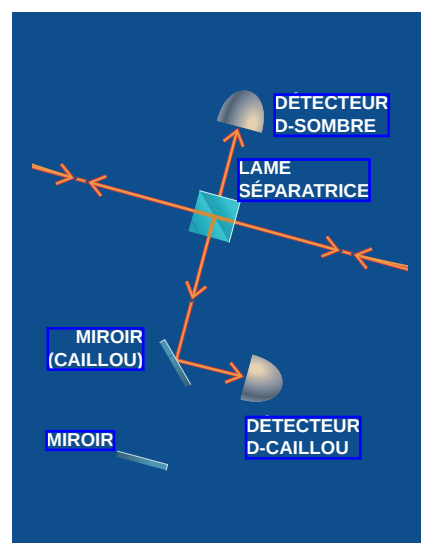
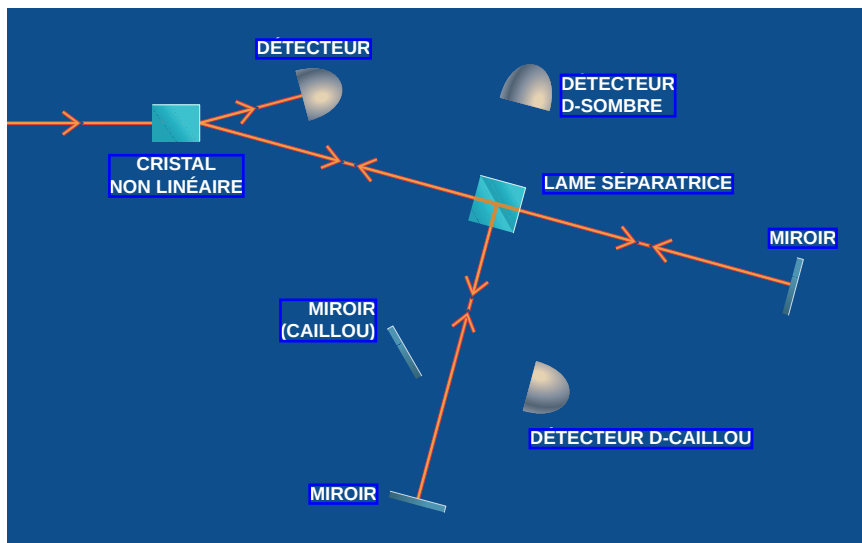
4. DANS L'EXPERIENCE de C. Elitzur et L. Vaidman, un photon a le choix entre deux chemins optiques. Les éléments optiques sont disposés de sorte que les photons aillent toujours au détecteur D-clair, et jamais au D-sombre (en haut). Toutefois, la présence d'un caillou sur l'un des trajets envoie parfois un photon sur le détecteur D-sombre (en bas) : une mesure sans interaction a alors eu lieu.

la dualité ondulatoire et corpusculaire des objets microscopiques. Lorsque l'interféromètre est vide, la lumière se comporte comme une onde. Elle peut atteindre les détecteurs en empruntant les deux chemins simultanément, ce qui produit des interférences. Quand un caillou s'interpose, la lumière se comporte comme une particule indivisible, qui ne suit qu'un seul des trajets. La seule présence du caillou élimine la possibilité d'obtenir des interférences, même si le photon n'a pas interagi avec lui.

Pour explorer l'idée de C. Elitzur et L. Vaidman, nous avons réalisé une expérience qui en reprend les principes, démontrant du même coup la faisabilité d'appareils de mesure sans interaction. La source de photons que nous avons utilisée, avec notre collègue Thomas Herzog, de l'Université de Genève, était un cristal non linéaire : lorsque des photons ultraviolets émis par un laser le traversent, ils sont parfois transformés en deux photons d'énergie inférieure, dont les trajectoires s'écartent d'environ 30 degrés. Quand on détecte un de ces photons, on est certain de l'existence de l'autre photon, qui est émis dans le système expérimental où nous effectuons la mesure sans interaction.

Ce dernier est un interféromètre un peu différent de celui qui avait été initialement proposé : les miroirs et les lames séparatrices sont disposés (voir la figure 5), de sorte que la plupart des photons sortent du montage à l'endroit où ils sont entrés (ce qui revient à aller au détecteur D-clair dans l'expérience de pensée, ou à aller sur une frange claire dans l'expérience des fentes d'Young) ; en l'absence du caillou, la probabilité qu'un photon parvienne au détecteur D-sombre est très faible en raison d'interférences destructives (l'équivalent des franges sombres de l'expérience des fentes d'Young).

L'introduction d'un caillou sur le trajet change les probabilités. Dans notre expérience, le caillou est un petit miroir qui dirige la lumière vers un autre détecteur (le détecteur D-caillou). Quand nous avons fait l'expérience, nous avons trouvé que le détecteur D-caillou enregistrait le photon dans la moitié des cas, et le détecteur D-sombre dans un quart des cas ; le reste du temps, le photon quittait l'interféromètre comme il y était entré, sans fournir d'information. L'excitation du



5. L'IDÉE DE C. ELITZUR ET DE L. VAIDMAN a été testée expérimentalement par ce montage fondé sur l'utilisation d'un cristal non linéaire qui produit des paires de photons quand il reçoit un

photon de haute énergie. Le détecteur D-sombre ne capte rien tant qu'un miroir (l'équivalent d'un caillou) n'est pas sur l'un des chemins optiques.

détecteur D-sombre était la trace d'une détection du caillou sans interaction.

Nous avons réduit la réflectivité de la lame séparatrice, afin de diminuer la probabilité que le photon suive le trajet aboutissant au détecteur D-caillou. Nous avons alors observé que, conformément aux prédictions théoriques, les probabilités que les photons parviennent aux détecteurs D-caillou et D-sombre devenaient de plus en plus voisines. Ainsi, en utilisant une lame faiblement réfléchissante, jusqu'à la moitié des mesures peuvent être réalisées sans interaction.

L'effet Zénon quantique

Peut-on faire mieux? Nous avons activement cherché des modifications expérimentales, mais c'est Mark Kasevich, de l'Université de Stanford, qui nous a mis sur la piste d'une solution, en janvier 1994, quand il est venu passer un mois dans notre laboratoire. Cette solution permettrait la détection sans interaction d'objets, presque à chaque coup. Ce n'est pas la première fois que l'optimisme quantique triomphe du pessimisme classique, et ce ne sera sans doute pas la dernière.

La nouvelle technique est fondée sur un phénomène quantique étrange, qui a été découvert en 1977 par Baidyanath Misra, aujourd'hui à l'Université de Bruxelles, et par George Sudarshan, de l'Université d'Austin : en utilisant l'effet des mesures sur les systèmes quantiques, on peut piéger un système quantique dans son état initial et

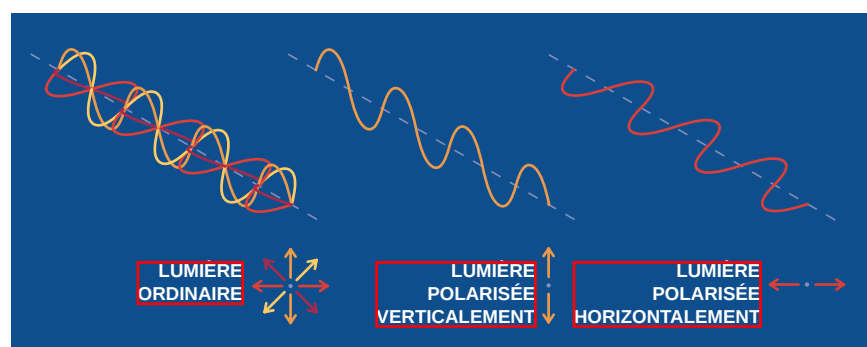
l'empêcher d'évoluer spontanément vers un autre état. Le phénomène est aujourd'hui nommé effet Zénon quantique, parce qu'il ressemble au paradoxe inventé par le philosophe grec Zénon, qui niait qu'une flèche lancée puisse bouger : pour atteindre un point, la flèche doit d'abord gagner le point à mi-distance entre l'arc et la cible, puis le point à mi-distance du chemin restant à parcourir, et ainsi de suite. La flèche devant occuper successivement une infinité de points intermédiaires, le déplacement, concluait Zénon, durerait un temps infini et serait impossible. Certains physiciens nomment ce phénomène l'«effet de la bouilloire observée» : en mécanique classique, l'observation de l'ébullition ne ralentit pas celle-ci, mais, en mécanique quantique, la mesure modifie le résultat.

M. Kasevich a retrouvé des illustrations de cet effet qui avaient été présentées pour la première fois en 1980,

par Asher Peres, de l'Institut de technologie d'Israël. A. Peres s'était intéressé à la polarisation de la lumière, c'est-à-dire la direction d'oscillation de l'onde lumineuse. Cette oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière (la lumière du Soleil, comme celle d'autres sources courantes, est composée de rayonnements dont les directions de polarisation sont aléatoires).

Considérons un photon que l'on dirige à travers six «rotateurs» (par exemple, des cuves contenant de l'eau sucrée) qui dévient tous la polarisation d'un angle égal à 15 degrés : si la polarisation initiale est horizontale, la polarisation finale sera verticale (voir la figure 8). À la sortie de l'enfilade de rotateurs, le photon parvient à un filtre polarisant qui ne laisse passer que les photons polarisés horizontalement.

Emettons d'abord un photon polarisé horizontalement, dont la polari-



6. LA DIRECTION DE POLARISATION d'une onde électromagnétique est la direction de la vibration des champs électriques et magnétiques associés à l'onde. Cette vibration est perpendiculaire à la direction de propagation.

sation tourne de 15 degrés à la traversée de chaque rotateur. Le photon n'atteindra jamais le détecteur, car, après avoir traversé toutes les cellules, sa polarisation aura tourné de 90 degrés (15 degrés par rotateur) : elle sera finalement verticale. La rotation progressive de la polarisation est l'évolution quantique que nous souhaitons annuler.

On y parvient en interposant un filtre polarisant horizontal après chaque

rotateur : après le premier rotateur, la polarisation de la lumière est peu modifiée, de sorte que la probabilité que le photon soit absorbé par le premier filtre polarisant horizontal n'est que de 6,7 pour cent (elle est égale au carré du sinus de l'angle de déviation).

Si le photon n'est pas absorbé par le premier filtre, sa polarisation est nécessairement horizontale, car c'est le seul état possible de la lumière sortant d'un filtre polarisant horizontal. Au deuxième rotateur, la polarisation tourne à nouveau de 15 degrés, et le photon a la même probabilité faible d'être absorbé par le filtre horizontal qu'il rencontre alors ; s'il est transmis, c'est encore que sa polarisation est horizontale, et ainsi de suite jusqu'à ce que le photon parvienne au dernier filtre.

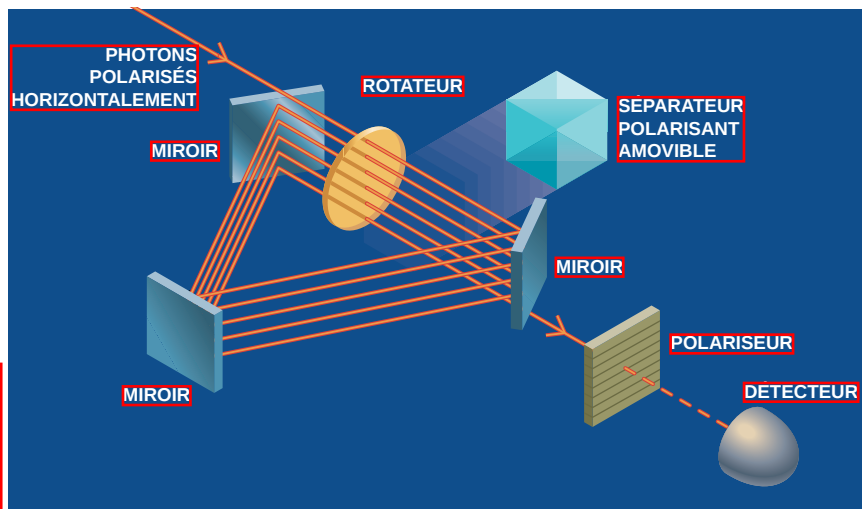
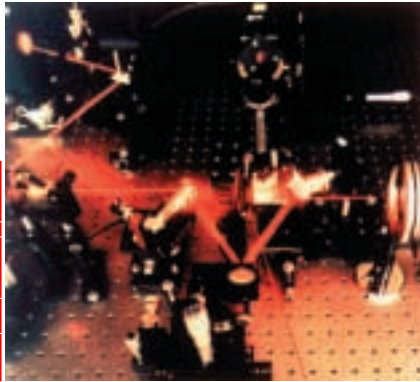
La probabilité qu'un photon traverse les six filtres et atteigne le détecteur est égale à $2/3$ (elle est donnée par la relation $\cos^2(15^\circ)^6$). Toutefois,

si l'on augmente le nombre d'étapes, ce qui diminue d'autant la rotation de la polarisation par les rotateurs (cet angle doit être égal au quotient de 90 degrés par le nombre d'étapes), la probabilité que le photon soit transmis augmente. Après 20 étapes, le photon atteint le détecteur presque neuf fois sur dix. Si l'on pouvait réaliser un système à 2500 étapes, la probabilité que le photon soit absorbé par l'un des filtres ne serait que de un sur 1 000. Et après un nombre infini d'étapes, le photon arriverait toujours au détecteur : nous aurions ainsi complètement annulé l'évolution de la rotation.

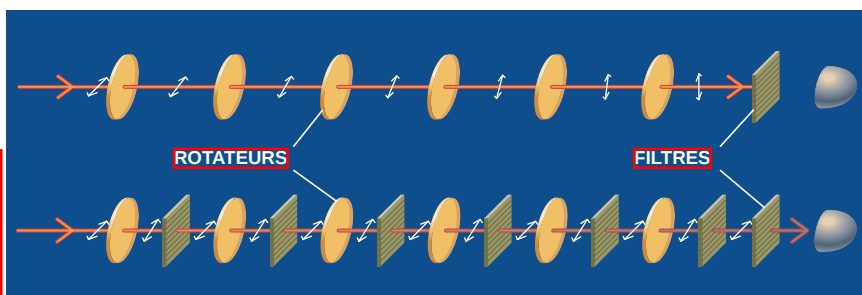
Pour étudier expérimentalement l'effet Zénon quantique, nous avons repris le cristal non linéaire utilisé précédemment et nous avons remplacé six rotateurs et six filtres par un seul rotateur et un seul filtre, où nous avons fait passer le photon six fois de suite, grâce à trois miroirs disposés comme les murs d'un escalier en colimaçon (voir la figure 7). Nous avons observé qu'en l'absence du filtre, le photon qui sort de l'escalier est toujours polarisé verticalement ; en revanche, quand le filtre est présent, le photon est polarisé horizontalement (sauf quand il est retenu par le filtre). Comme l'analyse théorique le prévoyait, ces cas se présentaient environ deux fois sur trois pour un système à six passages.

Nous étions alors prêts à étudier la mesure sans interaction et, plus précisément, à détecter un objet opaque sans lui envoyer de photon. Nous avons conçu un système intermédiaire entre celui qui testait l'effet Zénon quantique et celui avec lequel nous avions vérifié le principe de C. Elitzur et de L. Vaidman (voir la figure 9). Nous envoyons dans le dispositif un photon polarisé horizontalement et nous lui faisons faire quelques cycles (encore six, par exemple) avant de le laisser sortir. À une extrémité du système, on trouve le rotateur, qui fait tourner la polarisation de 15 degrés à chaque cycle. À l'autre extrémité se trouve un interféromètre à polarisation, constitué d'un séparateur polarisant et de deux bras d'égales longueurs terminés par des miroirs.

Au séparateur polarisant, toute la lumière polarisée horizontalement est transmise, et toute celle qui est polarisée verticalement est réfléchie ; le choix de la transmission ou de la réflexion est

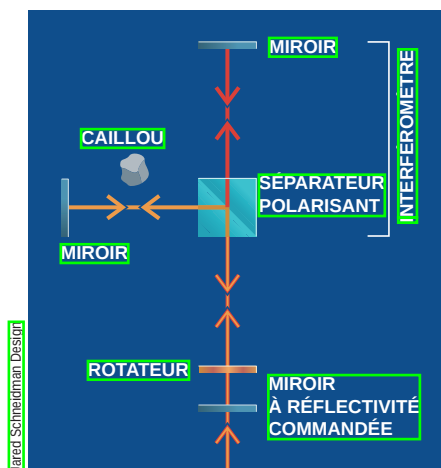


7. UN TEST EXPERIMENTAL de l'effet Zénon quantique a été obtenu grâce à ce système, où les photons suivaient une trajectoire en spirale qui leur faisait traverser six fois le rotateur de polarisation. En intercalant un polariseur après le rotateur de polarisation, on annulait la rotation de la polarisation du photon.

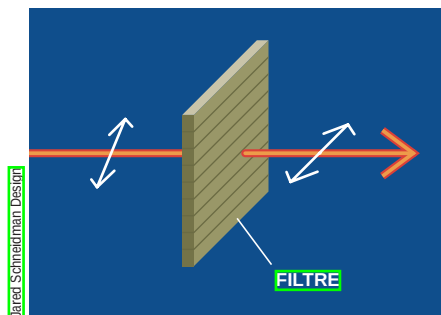


8. L'EFFET ZENON QUANTIQUE a été testé par des successions de dispositifs qui font tourner de 15 degrés la polarisation de la lumière. Après avoir traversé six de ces systèmes, la polarisation d'un photon, initialement horizontale, devient verticale : le photon est absorbé par un polariseur horizontal (en haut). En intercalant un polariseur après chaque rotateur, on bloque la rotation de la polarisation (en bas).

l'analogie des deux trajets dans l'expérience des fentes d'Young. En l'absence d'objet dans l'interféromètre à polarisation, la lumière est séparée en fonction de sa polarisation, par le séparateur, puis elle est réfléchiée par les miroirs à chaque passage, avant d'être enfin recombinaée par le séparateur. Ainsi le photon se trouve exactement dans le même état qu'à son entrée dans l'interféromètre (c'est-à-dire, avec une polarisation tournée de 15 degrés vers la verticale). Après six cycles, la polarisation est devenue verticale.



9. UNE MESURE SANS INTERACTION est possible grâce à un système qui combine le dispositif de l'effet Zénon quantique et le système qui avait été utilisé pour tester les idées de C. Elitzur et de L. Vaidman. Le photon pénètre par le miroir à réflectivité commandée et suit six fois le trajet optique qui lui est imposé quand ce miroir est dans un état réfléchissant, avant de sortir du dispositif par ce même miroir. Sa polarisation finale est toujours horizontale quand un objet se trouve sur l'une des branches de l'interféromètre ; elle devient verticale en l'absence d'objet.



10. LE POSTULAT DE PROJECTION stipule que, pour toute mesure effectuée sur un système quantique, seuls certains résultats sont possibles. Après la mesure, le système est dans un état déterminé par le résultat obtenu. Ainsi, un photon sortant d'un filtre polarisant horizontal est nécessairement polarisé horizontalement, même s'il était initialement polarisé presque verticalement (le filtre élimine la composante verticale de la polarisation).

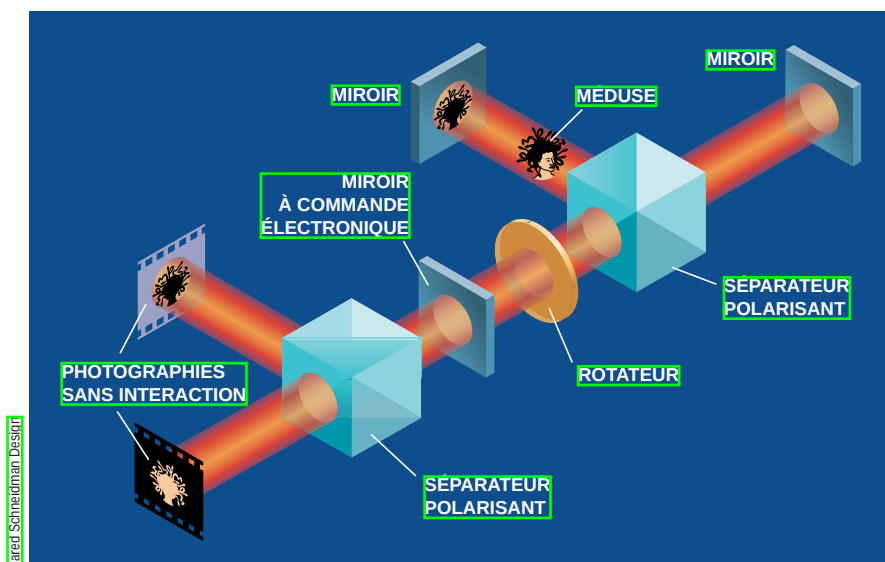
Lorsqu'un objet opaque est placé sur le trajet de la polarisation verticale de l'interféromètre, les six rotateurs sont dans la même configuration que dans le test de l'effet Zénon quantique. Au premier cycle, la probabilité que le photon – dont la polarisation n'a été tournée que de 15 degrés par rapport à l'horizontale – emprunte le chemin de polarisation verticale (et soit absorbé par l'objet) est très faible (6,7 pour cent, comme pour l'expérience de pensée de Zénon). Si cette absorption n'a pas lieu, c'est que le photon est plutôt passé par le chemin de polarisation horizontale : sa polarisation est horizontale.

Comme dans le test de l'effet Zénon quantique, le processus se répète à chaque cycle, jusqu'à ce que, finalement, après six cycles, nous désactivions le miroir inférieur (nous utilisons des miroirs dont la réflexion peut être commandée) et que nous laissions le photon sortir du système. Nous mesurons la polarisation du photon et, si nous la trouvons horizontale, nous concluons qu'un objet est présent l'interféromètre. Sinon, le photon aurait été polarisé verticalement à sa sortie. En augmentant le nombre de cycles, nous pouvons rendre aussi petite que nous le souhaitons la probabilité que le photon soit absorbé par l'objet. Les nouvelles expériences ont démontré qu'au moins 70 pour cent des mesures pouvaient être effectuées sans interaction, et nous espérons faire rapidement monter ce chiffre à 85 pour cent.

Magie quantique appliquée

À quoi servira cette sorcellerie quantique ? Nous avons l'impression d'être comme aux premières années du laser, quand les physiciens savaient que le nouveau dispositif serait la solution de nombreux problèmes encore inconnus. Cette nouvelle méthode de mesure sans interaction pourrait servir, par exemple, de moyen très inhabituel pour prendre des photographies sans éclairer les objets.

Un tel procédé «photographique» fonctionnerait ainsi : au lieu d'envoyer un seul photon, on en enverrait plusieurs, un par pixel, et on effectuerait une mesure sans interaction pour chacun d'eux. Dans les régions où l'objet ne bloquerait pas le chemin optique de l'interféromètre, la polarisation



11. DES PHOTOGRAPHIES pourraient être prises par des systèmes de mesure sans interaction. Ainsi des objets qui ne doivent pas être vus directement, telle la tête de Méduse, pourraient être photographiés à l'aide d'une lumière extrêmement réduite.

horizontale des photons serait progressivement tournée vers la verticale ; dans les régions où l'objet obstruerait le chemin optique, quelques-uns des photons seraient absorbés, tandis que la polarisation des autres serait bloquée dans le plan horizontal. Enfin on enregistrerait une photographie des photons à travers un filtre polarisant, après un nombre suffisant de cycles.

Avec un filtre aligné horizontalement, on obtiendrait une image de l'objet ; avec un filtre aligné verticalement, on obtiendrait son négatif. Dans tous les cas, l'image serait formée à partir de photons qui n'ont jamais touché l'objet. Ces techniques pourraient aussi être appliquées à des objets semi-transparents et pourraient probablement être généralisées à la détection de la couleur d'un objet (cet objectif semble beaucoup plus lointain).

Un procédé d'imagerie fondé sur ce principe serait utile en médecine, par exemple, pour visualiser les cellules vivantes ou pour réduire les doses de rayons X envoyées aux personnes à qui l'on fait une radiographie (un tel procédé de radiographie n'est pas pour demain, car on ne dispose pas des éléments des éléments optiques nécessaires aux longueurs d'onde des rayons X).

L'imagerie des atomes ultrafroids, produits depuis peu dans divers laboratoires, pourrait également profiter de ce type de photographie. En refroidissant suffisamment des atomes, on provoque la condensation de Bose-

Einstein, qui conduit à un nouvel état quantique où les atomes agissent collectivement comme une seule entité. À l'intérieur d'un groupe d'atomes où cette condensation a eu lieu, chaque atome est si froid qu'un seul photon le chasserait du groupe condensé. Initialement, on ne savait donc pas observer la condensation sans détruire le nuage, mais des méthodes de mesure sans interaction permettraient d'observer les assemblages atomiques.

Avec le même type de mesures sans interaction, on pourrait également fabriquer des systèmes quantiques nouveaux. Notamment on pourrait tester expérimentalement l'expérience de pensée du «chat de Schrödinger». Ce chat quantique est préparé de sorte qu'il se trouve simultanément dans deux états quantiques : vivant et mort. Au début de l'année 1996, des physiciens de l'Institut américain de normalisation ont créé une sorte de chaton de Schrödinger, à l'aide d'un ion béryllium : ils ont utilisé une combinaison de champs magnétiques et de lasers pour placer simultanément l'ion en deux endroits, séparés de 83 nanomètres.

Si l'on examinait un tel ion à l'aide d'un appareil de mesure sans interaction, le photon sondeur se placerait également dans des états superposés ; il pourrait finir son trajet en étant polarisé à la fois verticalement et horizontalement. Mieux encore, le type de dispositif expérimental présenté précédemment

devrait pouvoir placer un groupe de plusieurs photons dans la même superposition. Chaque photon «saurait» qu'il est dans le même état de polarisation que tous les autres, mais aucun ne connaîtrait sa propre polarisation ; les photons resteraient dans cette situation de superposition jusqu'à ce qu'une mesure révèle la nature verticale ou horizontale de leur polarisation. La taille notable du paquet de photons ainsi préparé montrerait que des effets quantiques peuvent se faire sentir au niveau macroscopique.

Inaccessible à notre expérience quotidienne, le concept de mesure sans interaction est exorbitant. Il semblerait peut-être moins bizarre si l'on se souvenait que la mécanique quantique décrit un monde de potentialités. C'est parce qu'il *pourrait* y avoir une interaction que l'on s'efforce de l'annuler.

Ceux que cette remarque n'aide pas à admettre le phénomène peuvent se reconforter en pensant que les physiciens eux-mêmes ont très difficilement accepté l'étrangeté du monde quantique. La clé de la magie quantique – la complémentarité, la double nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière, ainsi que la nature de la mesure quantique – est connue depuis 1930, mais les physiciens n'ont cherché que tout récemment des applications de ces principes. Et c'est ainsi qu'ils ont imaginé de voir dans l'obscurité.

Paul KWIAT, Harald WEINFURTER et Anton ZEILINGER ont effectué une bonne partie de leur travail commun à l'Université d'Innsbruck.

Richard P. FEYNMAN, *QED : The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, 1985.

Avshalom C. ELITZUR et Lev VAIDMAN, *Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements*, in *Foundations of Physics*, vol. 23, n° 7, pp. 987-997, juillet 1993.

P.G. KWIAT, H. WEINFURTER, T. HERZOG, A. ZEILINGER et M.A. KASEVICH, *Interaction-Free Measurement*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 24, pp. 4763-4766, 12 juin 1995.

Les mesures sans interactions sont discutées sur le réseau Internet, à l'adresse <http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/#Inter> et à <http://p23.lanl.gov/Quantum/kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm>

La dyslexie

SALLY SHAYWITZ

Cette difficulté de lecture semble résulter d'une défaillance du système de traitement du langage plutôt que d'une anomalie visuelle. Une nouvelle modélisation de la dyslexie explique pourquoi des personnes très intelligentes par ailleurs ont des difficultés de lecture.

Il y a 100 ans, le médecin anglais Pringle Morgan décrivait pour la première fois une difficulté de la lecture que l'on nomma plus tard la dyslexie ; dans le journal de l'Association britannique de médecine, il écrivait : « Percy F., âgé de 14 ans, a toujours été un garçon intelligent. Il est rapide dans les jeux, et en aucune façon moins doué que ses camarades du même âge. Sa grande difficulté a été – et reste – son incapacité à apprendre à lire. »

Dans cette courte introduction, Morgan décrit le paradoxe auquel, depuis un siècle, sont confrontés psychologues et médecins : la difficulté profonde et persistante que certaines personnes très intelligentes rencontrent dans l'apprentissage de la lecture. En 1996 comme en 1896, savoir lire est considéré comme un gage d'intelligence : il semble qu'une personne intel-

ligente, motivée et scolarisée finira par savoir lire. L'existence de millions de dyslexiques montre que cette croyance est infondée.

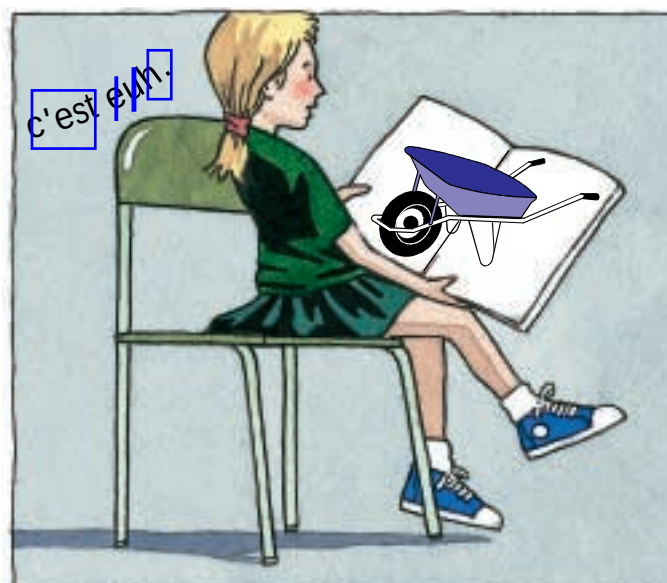
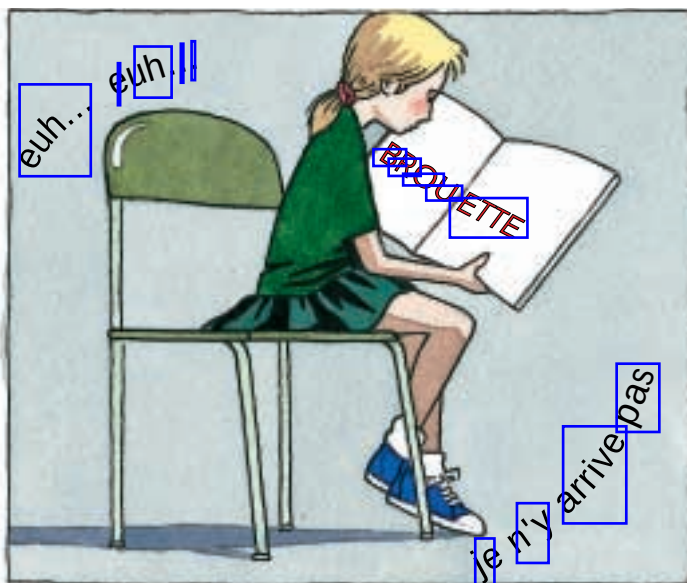
Dans les années 1920, les médecins supposaient que des défauts de la perception visuelle étaient responsables de l'inversion des lettres et des mots dont les dyslexiques sont coutumiers ; ils prescrivaient une rééducation des yeux, afin de corriger ces supposés problèmes visuels. Puis des recherches récentes montrèrent que les enfants dyslexiques n'inversent pas visuellement les lettres ou les mots, et que les difficultés de lecture résultent plutôt d'anomalies du langage : la dyslexie correspondrait à une déficience du traitement des phonèmes, les unités linguistiques qui composent les mots. Aujourd'hui, les modèles linguistiques de la lecture et de la dyslexie expliquent

pourquoi certaines personnes, très intelligentes par ailleurs, ont du mal à lire et à réaliser d'autres tâches linguistiques.

Au Centre pour l'étude de l'apprentissage et de l'attention, à Yale, nous avons évalué les difficultés de lecture de centaines d'enfants et d'adultes. Parmi ces derniers, beaucoup sont des étudiants ou des personnels de notre université. L'un d'eux, un étudiant en médecine prénommé Gregory, est venu nous voir après sa première année de médecine, où ses difficultés l'avaient découragé.

Malgré sa dyslexie diagnostiquée dès l'école primaire, Gregory avait suivi une scolarité spéciale pour enfants doués. Son intelligence et un soutien important lui avaient permis de terminer brillamment ses études secondaires et d'être admis en première

Le paradoxe de la dyslexie



année de médecine dans l'une des meilleures universités américaines. Là, Gregory avait énormément travaillé et avait reçu des offres émanant de quelques-unes des meilleures facultés de médecine pour la suite de ses études. Toutefois, il commençait à douter de ses compétences : il comprenait facilement les relations complexes entre les systèmes physiologiques et les mécanismes des maladies, car il excellait dans les domaines requérant des capacités de raisonnement, mais il peinait à prononcer des mots longs ou des termes nouveaux, tels ceux qui sont utilisés en anatomie descriptive, et il mémorisait très difficilement les termes techniques.

Ces performances sélectives étonnaient. Comment quelqu'un qui comprenait aussi bien des concepts difficiles était-il gêné par des détails ? La dyslexie de Gregory (il lisait encore lentement) était-elle la cause de son incapacité à nommer les tissus et les parties du corps ?

Nous pensons que c'est possible. L'histoire de Gregory correspond au tableau clinique de la dyslexie telle qu'elle est habituellement définie : des difficultés inattendues dans l'apprentissage de la lecture, malgré l'intelligence, la motivation et l'éducation. Nous comprenons maintenant bien la nature fondamentale de ces difficultés.

Au cours des deux dernières décennies, les psychologues ont mis au point un modèle cohérent de la dyslexie, fondé sur la compréhension nouvelle des mécanismes cérébraux du traitement phonologique. Il décrivent ainsi

les symptômes cliniques de la dyslexie en restant cohérents avec les connaissances neurobiologiques modernes.

Le modèle phonologique

Avant d'examiner le modèle phonologique de la dyslexie, voyons comment le cerveau traite le langage. Il utilise une hiérarchie de modules, dont chacun est spécialisé dans un traitement particulier. Les modules supérieurs traitent la sémantique (le vocabulaire et la signification des mots), la syntaxe (la structure grammaticale) et le discours (la connexion entre les phrases). En dessous, le module phonologique est dévolu à l'analyse des unités sonores qui composent le langage.

Le phonème, le plus petit segment du langage, est l'élément fondamental du système linguistique. Les combinaisons de 34 phonèmes seulement produisent tous les mots de la langue française. Le mot «foule», par exemple, est constitué de trois phonèmes : [f], [u] et [l]. Les mots ne sont identifiés, compris, stockés ou retrouvés dans la mémoire qu'après avoir été décomposés en phonèmes par le module phonologique du cerveau.

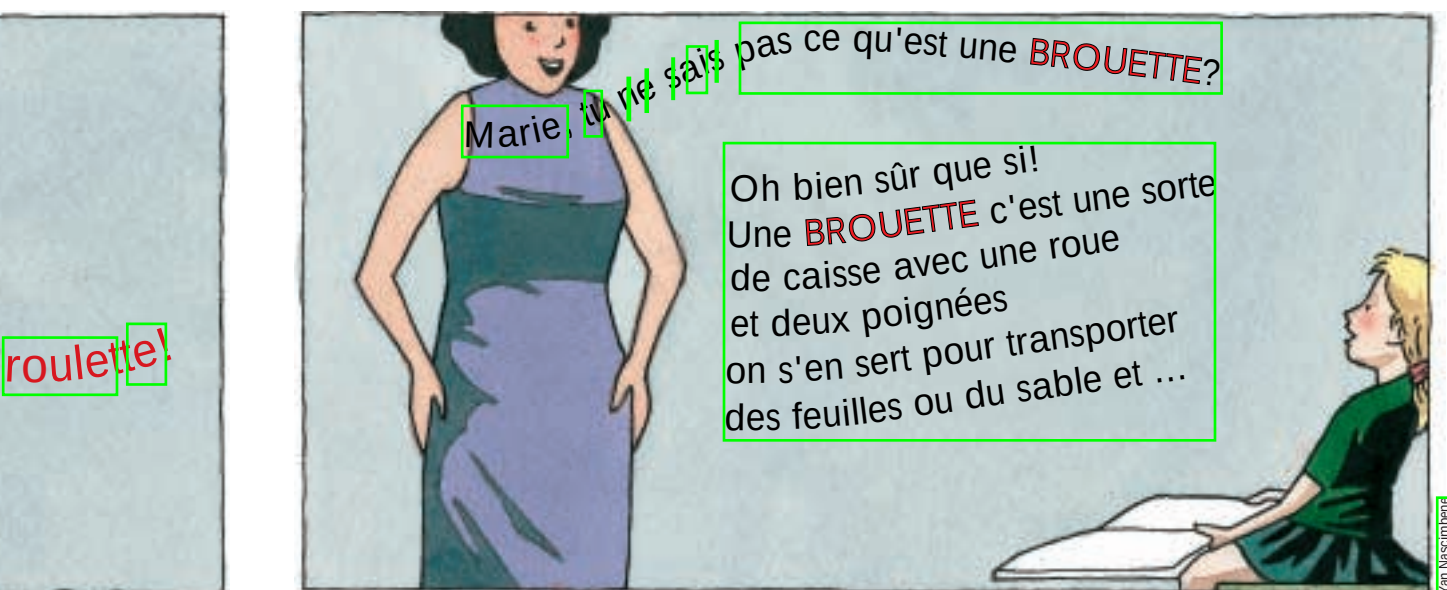
Cette décomposition est automatique et inconsciente. Noam Chomsky et, plus récemment, Steven Pinker, de l'Institut de technologie du Massachusetts, ont démontré que le langage est inné : les êtres humains l'apprennent dès qu'ils l'entendent. Un module phonologique génétiquement déterminé assemble automatiquement

les phonèmes en mots, pour celui qui parle, et décompose les mots parlés en leurs composants phonologiques, pour celui qui écoute.

Lors de l'émission d'un mot, l'appareil phonatoire – le larynx, le palais, la langue et les lèvres – fusionne automatiquement les phonèmes. L'information de plusieurs phonèmes est ainsi incorporée dans une seule unité sonore et, comme il ne subsiste pas d'indice apparent de la nature segmentée du discours, les mots semblent monolithiques : un oscilloscope enregistrerait le mot «foule» comme une bouffée sonore unique. Seul le système linguistique humain distingue les trois phonèmes composant ce mot.

La lecture fait intervenir le langage parlé et se fonde également sur un traitement phonologique, mais elle est beaucoup plus difficile à maîtriser, car elle n'est pas naturelle : la lecture est une invention, qui doit être apprise consciemment. Celui qui lit doit transformer les signes visuels de l'écriture alphabétique en signes linguistiques, c'est-à-dire décoder les graphèmes (les lettres) et les coder en phonèmes correspondants. À cette fin, les lecteurs débutants doivent d'abord identifier la structure phonologique des mots parlés ; puis ils doivent comprendre que l'orthographe, la séquence de lettres sur la page, représente les mots. Un enfant apprenant à lire réalise cette recombinaison.

Le modèle phonologique de la dyslexie, ou hypothèse du déficit phonologique, stipule que, chez les enfants dyslexiques, un déficit du module pho-



nologique perturbe la capacité à segmenter les mots écrits en phonèmes. Plus précisément, la perturbation du décodage empêcherait l'identification des mots. Ce déficit d'une fonction linguistique de bas niveau bloque le fonctionnement correct des modules supérieurs. Le déficit phonologique est manifeste quand la personne dyslexique lit, mais il gêne également la parole d'une manière correctement prévue par le modèle phonologique.

Depuis plus de 20 ans, les observations corroborent cette théorie. L'une des premières expériences, réalisée par

Isabelle Liberman, des Laboratoires *Haskins*, montrait que les enfants prennent conscience de la structure phonologique des mots parlés entre quatre et six ans : on demandait aux enfants combien de sons ils entendaient dans une suite de mots. Aucun des enfants de quatre ans n'identifiait correctement le nombre de phonèmes, mais 17 pour cent des enfants de cinq ans y parvenaient, et, à l'âge de six ans, la conscience phonologique était acquise pour 70 pour cent des enfants. À ce stade, la plupart des enfants avaient appris à lire pendant au moins un an

(aux États-Unis, l'apprentissage de la lecture commence dès cinq ans). Aussi a-t-on conclu que la conscience phonologique se développe parallèlement à cet apprentissage, ce qui indiquerait que les deux phénomènes sont liés.

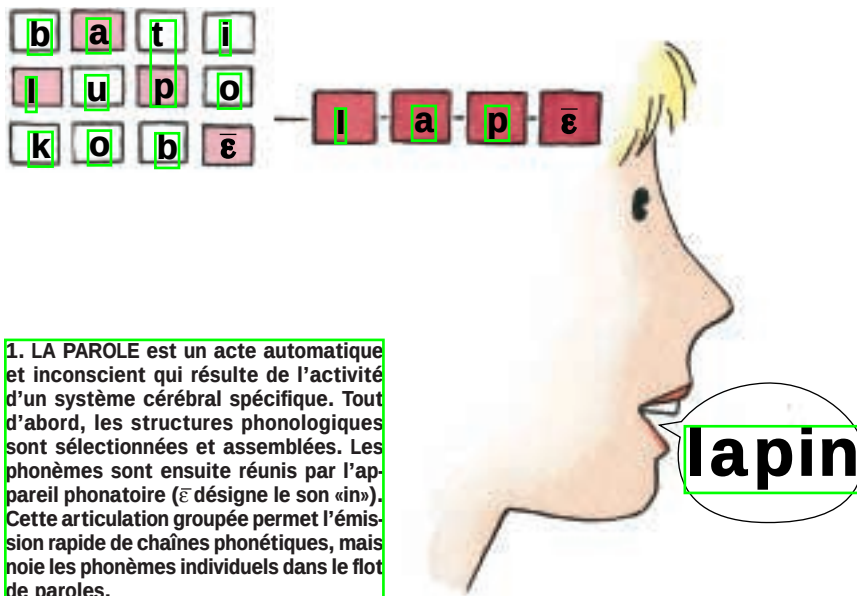
Cette correspondance est également corroborée par une enquête que nous menons dans le Connecticut depuis 1983. Chaque année, nous faisons passer des tests à 445 enfants tirés au sort. Nous avons ainsi observé que 20 pour cent environ des enfants scolarisés sont dyslexiques : cette proportion est à rapprocher de celle (30 pour cent) des enfants de six ans étudiés par Liberman, qui n'avaient pas acquis la conscience des phonèmes.

La conscience des phonèmes

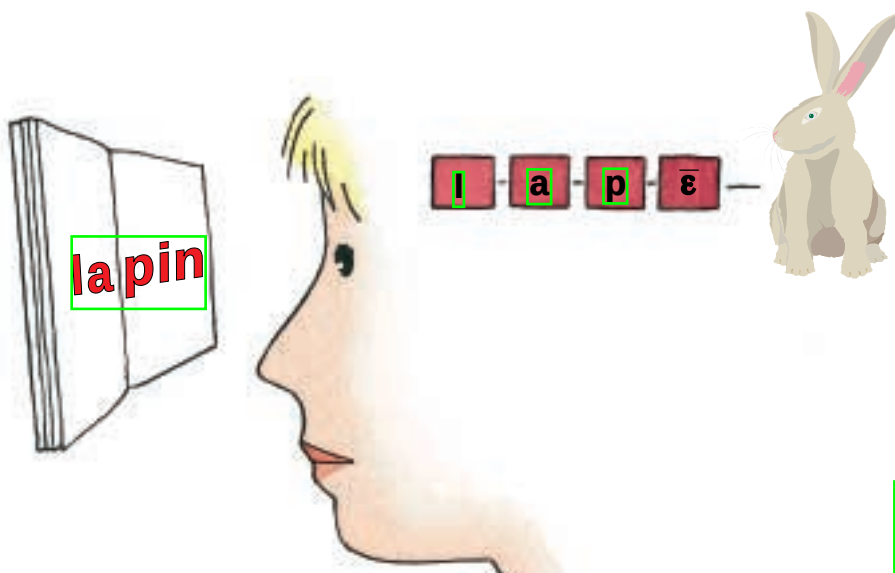
Au cours des années 1980, les psychophysiolgistes ont commencé à étudier explicitement les relations entre la conscience phonologique et la lecture. À l'Université d'Oxford, Lynette Bradley et Peter Bryant ont montré que l'aptitude phonologique des enfants de maternelle est un indicateur de leurs capacités ultérieures de lecture ; en outre, un entraînement systématique de la conscience phonologique augmente la capacité de lecture des enfants. Dans ces expériences, un groupe d'enfants était entraîné à effectuer des traitements phonologiques, tandis qu'un autre groupe effectuait des exercices linguistiques qui ne nécessitaient pas de manipulation de la structure sonore des mots ; par exemple, on demandait au premier groupe de classer des mots en fonction de leur consonance et au second groupe de les classer selon leur signification. Ces travaux, et d'autres qui suivirent, montrent clairement que l'exercice des fonctions phonologiques améliore plus la lecture que ne le font des exercices généraux d'apprentissage du langage.

Sur la base de ces résultats, nous avons ensuite comparé les capacités cognitives d'enfants dyslexiques et d'enfants non dyslexiques. Avec quelques collègues, nous avons examiné 378 enfants âgés de sept à neuf ans, au moyen de tests évaluant les aptitudes linguistiques et non linguistiques. Nous avons ainsi établi que les déficits phonologiques sont les meilleurs indicateurs de la dyslexie.

Un test d'analyse des sons semble un révélateur particulièrement fiable

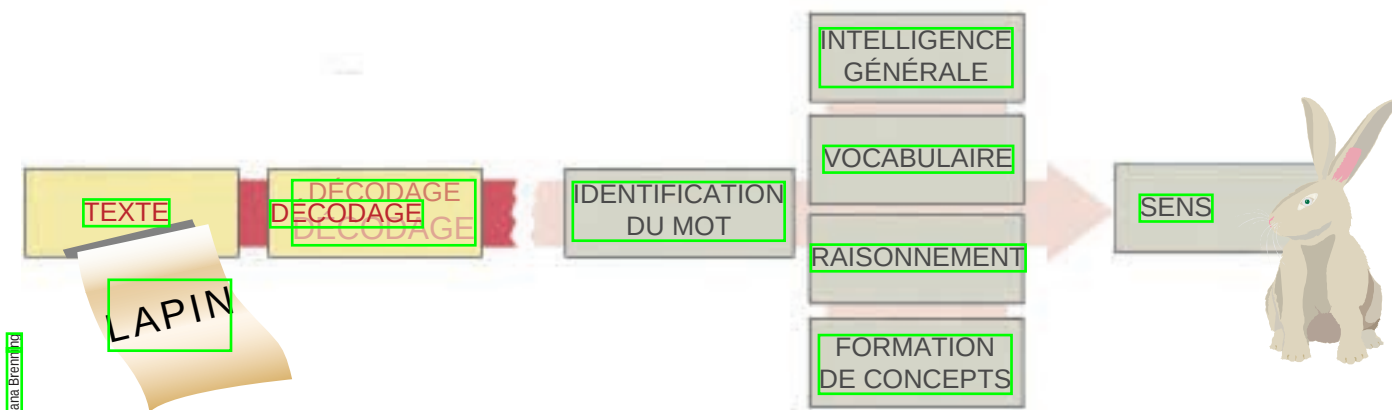


1. LA PAROLE est un acte automatique et inconscient qui résulte de l'activité d'un système cérébral spécifique. Tout d'abord, les structures phonologiques sont sélectionnées et assemblées. Les phonèmes sont ensuite réunis par l'appareil phonatoire (ε désigne le son «in»). Cette articulation groupée permet l'émission rapide de chaînes phonétiques, mais noie les phonèmes individuels dans le flot de paroles.



2. LA LECTURE n'est pas une capacité naturelle. Le lecteur doit comprendre que les lettres sur une page représentent les sons du mot parlé. Pour lire le mot «lapin», le lecteur doit analyser, c'est-à-dire segmenter, le mot en ses éléments phonologiques sous-jacents. Une fois que le mot est sous forme de phonèmes, il peut être identifié et compris. Chez les individus dyslexiques, un module phonologique inefficace produit des représentations qui sont moins claires et, par conséquent, plus difficiles à amener à un niveau conscient.

Van Nieuwenhuis



3. AU COURS DE LA LECTURE, le mot «lapin» est d'abord décodé sous sa forme phonologique [l a p ɛ̃]. Une fois les phonèmes identifiés, des fonctions cognitives supérieures, telles que le raisonnement et le vocabulaire, font comprendre la signification du mot (petit mam-

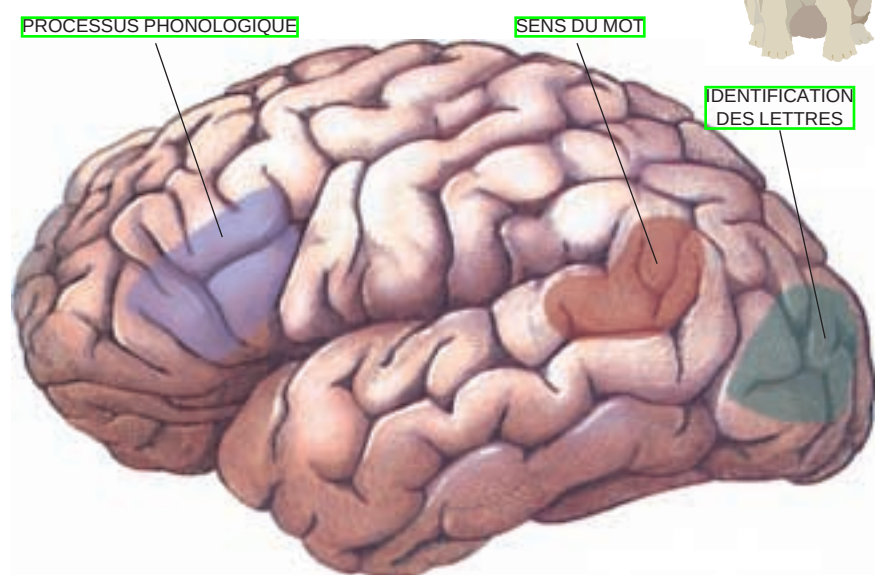
mière avec de grandes oreilles). Dans la dyslexie, une déficience phonologique perturbe le décodage, empêchant le lecteur d'utiliser son intelligence et son vocabulaire pour accéder à la signification du mot.

de la dyslexie : on demande à l'enfant de décomposer les mots en phonèmes et de supprimer ensuite certains phonèmes de ces mots. Par exemple, l'enfant doit prononcer «bleu», sans le [b], ou le mot «sourd» sans [s]. Les résultats à ce test sont étroitement liés à la capacité des enfants de décoder des mots uniques dans des tests standardisés, et ils sont indépendants de leur vocabulaire ou de leurs capacités de raisonnement. Lorsque nous avons ensuite fait passer ce test, et d'autres tests d'analyse des phonèmes, à un groupe d'adolescents de 15 ans, nous avons obtenu des résultats identiques : même pour des adolescents, la conscience de l'existence de phonèmes est le meilleur indicateur de la capacité de lecture.

Si la dyslexie résulte de capacités phonologiques insuffisantes, on devrait observer d'autres conséquences de ce dysfonctionnement phonologique. Or, il y a dix ans, aux Laboratoires *Haskins*, Robert Katz a mis au jour les problèmes que les mauvais lecteurs rencontrent lorsqu'ils nomment des objets dessinés : lorsque des personnes dyslexiques se trompent en nommant des objets, leurs réponses incorrectes ont des caractéristiques phonologiques communes avec la réponse correcte. De surcroît, les erreurs ne résultent pas d'un manque de connaissances. Par exemple, une fillette à qui l'on montre la photographie d'une brouette la nomme «roulette», mais, lorsqu'on lui donne la possibilité d'en dire plus, elle montre qu'elle reconnaît parfaitement l'objet représenté : elle décrit les caractéristiques d'une brouette avec de nombreux détails et désigne d'autres photographies en rapport avec les brouettes. Elle est juste incapable de prononcer le mot «brouette».

Ce résultat et d'autres montrent que les composants linguistiques de haut niveau restent intacts chez les personnes dyslexiques. Les opérations linguistiques qui concourent à la compréhension des mots, de la grammaire et du discours paraissent totalement fonctionnels, mais leur activité est bloquée par le déficit du traitement phonologique. Dans l'une de nos études, Jennifer, une jeune fille brillante avec des difficultés de lecture importantes, nous expliqua tout sur le mot «apocalypse» ; elle en connaissait le sens, les connotations et l'usage correct, mais elle était incapable de reconnaître le mot sur une page imprimée. Comme elle ne pouvait pas décoder ni identifier le mot écrit, elle ne pouvait pas accéder à ce qu'elle en savait.

Naturellement, de nombreux dyslexiques, tel Gregory, apprennent à lire et ont de bons résultats scolaires malgré leur handicap. Les «dyslexiques compensés» obtiennent d'aussi bons résultats que les non-dyslexiques sur des tests de précision des mots, parce qu'ils ont appris à décoder et à identifier les mots, de sorte qu'ils accèdent aux niveaux supérieurs du système linguistique ; cependant, comme leur décodage reste laborieux, ils mettent plus de temps que les autres à lire. Leur capacité à identifier les mots n'est ni automatique ni fluide. Nombre de dyslexiques nous ont signalé à quel point la lecture les fatigue,



4. LES RÉSEAUX NEURONAUX utilisés lors de la lecture ont été révélés par l'imagerie médicale. L'identification des lettres active le cortex extra-strié dans le lobe occipital, le traitement phonologique active la circonvolution frontale inférieure (l'aire de Broca) et l'accès à la signification active les circonvolutions temporales supérieure et moyenne.

parce qu'ils doivent consacrer beaucoup d'énergie à cette tâche. La lenteur des interprétations phonologiques est caractéristique des groupes de dyslexiques compensés. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons étudié le cerveau de ces dyslexiques par des techniques d'imagerie médicale.

Le modèle phonologique suppose, nous l'avons vu, que chacune des opé-

rations en œuvre lors de l'identification d'un mot soit réalisée par un réseau spécifique de cellules nerveuses. Cependant, encore récemment, on comprenait mal comment ces réseaux étaient organisés dans le cerveau humain. Contrairement à de nombreuses autres fonctions physiologiques, la lecture ne peut être étudiée chez l'animal, et, pendant longtemps,

les neurobiologistes ont localisé les centres cérébraux des opérations cognitives supérieures en étudiant des patients ayant survécu à des lésions cérébrales. Cette approche ne permettait pas d'identifier les régions cérébrales activées lors de la lecture, et nous avons espéré beaucoup de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), mise au point à la fin des

Se jouer des difficultés d'apprentissage

La dyslexie est le plus fréquent des troubles de l'apprentissage. Les enfants qui ont des difficultés d'apprentissage sont au centre d'une industrie florissante depuis 1968, année où les autorités américaines ont commencé à attribuer des crédits importants pour les aider. Aux États-Unis, le nombre d'enfants diagnostiqués comme ayant des difficultés d'apprentissage est passé de 780 000 en 1976 à 2,3 millions en 1993. Plus de 50 milliards de francs sont consacrés chaque année, au diagnostic, au traitement et à l'étude de ces difficultés.

La définition et les critères diagnostiques des troubles de l'apprentissage sont souvent subjectifs ou ambigus ; leurs causes sont parfois obscures ou controversées. Par exemple, le psychologue Géraud Coles, de l'Université de Rochester, conteste que 20 pour cent des enfants soient dyslexiques. Les psychophysiologistes et les éducateurs ne croient pas tous à une explication phonologique (ou même biologique) de la dyslexie. En conséquence, l'intérêt des divers traitements est également très controversé. Au cours des années, les éducateurs et les parents ont essayé toutes sortes de techniques qui promettaient d'aider les enfants à surmonter leurs difficultés d'apprentissage, et ils ont été souvent déçus. Néanmoins, les résultats des recherches actuelles sont encourageants.

Les groupes de Paula Tallal, à l'Université Rutgers, et de Michael Merzenich, à l'Université de San Francisco, ont récemment mis au point un traitement intéressant afin d'aider les dyslexiques et aussi, plus généralement, les enfants qui souffrent de troubles du langage. Tous les enfants ayant des troubles du langage ne sont pas dyslexiques, et tous les dyslexiques n'ont pas nécessairement des déficits linguistiques, mais il existe quand même un recouvrement important entre les deux groupes : jusqu'à huit pour cent des enfants auraient des troubles du langage et, parmi eux, plus de 85 pour cent sont également dyslexiques.

P. Tallal est depuis longtemps convaincue que les troubles du langage résultent d'une incapacité à traiter l'information auditive à une vitesse suffisante. Alors que la plupart des enfants sont capables de traiter des phonèmes dont la durée est inférieure à 40 millisecondes, ceux qui ont des déficits linguistiques auraient besoin de 500 millisecondes. Ces derniers sont incapables de faire la distinction entre le mot «pull» et le mot

«bulle». Cette hypothèse serait compatible avec le modèle du déficit phonologique de la dyslexie, mais elle met plus l'accent sur le rôle de la chronologie du traitement des informations dans le cerveau.

P. Tallal pense que les déficits linguistiques sont plus souvent dus à un déficit organique qu'à des facteurs environnementaux ; l'imagerie par résonance magnétique du cerveau a révélé des différences cérébrales claires entre les personnes qui ont des capacités linguistiques normales et celles qui ont des troubles du langage.

Il y a deux ans, elle s'est associée avec M. Merzenich et quelques autres afin de mettre au point une rééducation assistée par ordinateur pour les enfants souffrant de troubles du langage : un logiciel de traitement du langage permet aux chercheurs de modifier l'amplitude et la durée de sons enregistrés.

Dans l'un des logiciels, dont le thème est le cirque, un clown émet deux phonèmes proches, comme [p] et [d]. La durée de ces phonèmes a été allongée de manière que l'enfant les comprennent plus facilement. Lorsque l'enfant fait correctement la distinction entre les deux sons, le clown le félicite.

Lorsque les enfants distinguent bien les phonèmes d'une durée donnée (par exemple, 400 millisecondes), on leur passe des phonèmes plus rapides et plus réalistes. Les enfants écoutent aussi des enregistrements étirés de mots entiers, de phrases et d'histoires. Aidés de ce logiciel, les enfants entraînés ont acquis l'équivalent de deux années d'apprentissage linguistique en un mois seulement. Un groupe de contrôle recevant une thérapie identique, mais sans les phonèmes allongés, n'avait progressé que de l'équivalent de six mois.

La Société *Scientific Learning Principles* commercialise aujourd'hui un CD-ROM interactif qui contient ce logiciel d'exercice. En 1997, le prototype sera testé par quelque 500 enfants qui souffrent de déficits linguistiques, de dyslexie, de troubles de l'attention et d'autres difficultés d'apprentissage.

De nombreuses personnes doutent de la théorie de P. Tallal, mais cette dernière, qui admet que de nombreuses questions théoriques restent ouvertes, pense que seule la recherche empirique produira des améliorations tangibles de la lecture.

John HORGAN



UNE ENFANT DE CINQ ANS interagit avec un programme ludique d'apprentissage du langage.

années 1980. Cette technique mesure les changements d'activité métabolique du cerveau lors d'une tâche cognitive. Non invasive, elle permet l'exploration des capacités cognitives des enfants.

La neurobiologie de la lecture

Depuis 1994, avec plusieurs collègues de l'Université Yale, nous avons analysé le fonctionnement cérébral de la lecture sur plus de 200 enfants et adultes dyslexiques ou non. Aujourd'hui, nous pouvons proposer un schéma cérébral de la lecture. L'identification de lettres active des sites dans le cortex extra-strié du lobe occipital. Le traitement phonologique a lieu dans la circonvolution frontale inférieure et l'accès à la signification sollicite des régions des circonvolutions temporales moyenne et supérieure.

À notre surprise, nous avons observé que la représentation des mots lus s'effectue en des sites différents selon le sexe : chez les hommes, le traitement phonologique met en œuvre uniquement la circonvolution frontale inférieure gauche, tandis que, chez les femmes, il active aussi la circonvolution frontale droite. Ces différences de latéralisation, pressenties à la suite d'études du comportement, n'avaient jamais été démontrées ; c'est même la première preuve concrète de différences liées au sexe pour l'organisation cérébrale d'une fonction cognitive. La bilatéralité des traitements phonologiques chez la femme expliquerait pourquoi, après un accident vasculaire cérébral touchant le côté gauche du cerveau, les femmes ont moins souvent que les hommes des déficits graves de leurs capacités linguistiques, et pourquoi elles compensent mieux leur dyslexie que les hommes.

L'identification des sites cérébraux dévolus au traitement phonologique de la lecture nous donne maintenant une «signature» neurale possible de la lecture : nous pourrions désormais diagnostiquer la dyslexie par imagerie, et nous pourrions également tester les effets des traitements sur les systèmes neuraux responsables de la lecture.

Le déficit linguistique des dyslexiques est souvent accompagné de bonnes capacités de raisonnement, d'une pensée critique et d'un vocabulaire important. Les dyslexiques compensés, tels que Gregory, peuvent ainsi

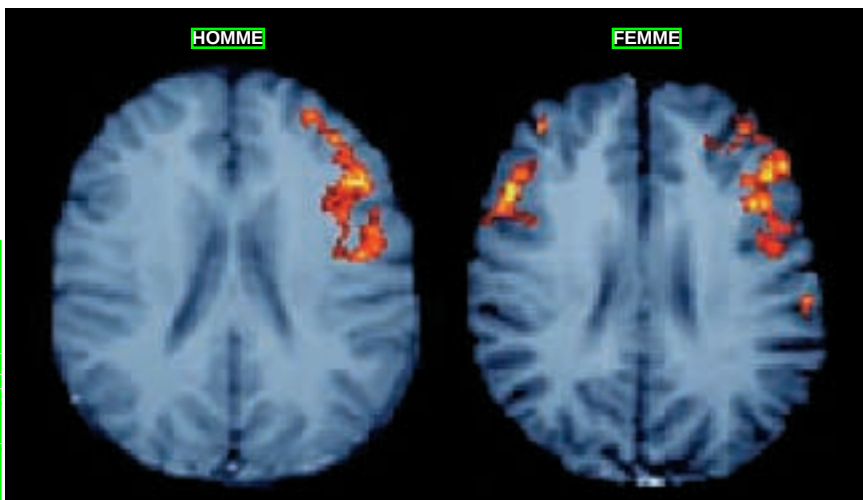


LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapports avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginaire de l'invention mathématique.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



5. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE FONCTIONNELLE a révélé les centres cérébraux de la lecture. Lors du processus phonologique, les hommes ont une activation unilatérale dans la partie inférieure du lobe frontal gauche. Pour les femmes, le processus phonologique active les parties droite et gauche du lobe frontal inférieur.

Les mythes de la dyslexie

L'écriture miroir est un symptôme de la dyslexie.

L'écriture inversée et le retournement des lettres sont courants lors des premiers stades d'apprentissage de l'écriture, aussi bien parmi les dyslexiques que parmi les non-dyslexiques. Les enfants dyslexiques ont des problèmes pour énoncer les lettres, non pour les écrire.

La rééducation visuelle est un traitement de la dyslexie.

Plus de 20 années de recherche ont montré que la dyslexie résulte d'un déficit du langage. Il n'est pas démontré que des exercices visuels compensent ce déficit.

Il y a plus de garçons dyslexiques que de filles dyslexiques.

On identifie plus de problèmes de lecture chez les garçons, mais les statistiques sont biaisées. La prévalence de cette déficience est presque identique pour les deux sexes.

La dyslexie s'estompe avec le temps.

Un suivi annuel d'enfants, du cours préparatoire jusqu'en terminale, a montré que la dyslexie persiste chez l'adulte. Bien que beaucoup de dyslexiques lisent bien, leur lecture reste lente et saccadée.

Les personnes intelligentes ne peuvent pas être dyslexiques.

L'intelligence n'est en aucune façon liée au processus phonologique. Léonard de Vinci, Auguste Rodin, Hans Christian Andersen ou Albert Einstein étaient dyslexiques.

s'aider du contexte pour se souvenir des détails spécifiques. Toutefois, lorsque les détails ne sont pas unifiés par des idées communes ou par des cadres théoriques (par exemple, lorsque Gregory doit mémoriser de longues listes de noms sans rapport entre eux), les dyslexiques sont désavantagés. Même lorsque Gregory réussit à mémoriser ces listes, il a des difficultés à retrouver les noms à la demande, comme il doit le faire lors d'un examen de fin d'année. Le modèle phonologique prédit que la mémorisation et le recouvrement rapide des mots sont particulièrement difficiles pour les dyslexiques ; l'expérience confirme cette prévision.

Même lorsqu'un individu dys-

lexique possède une information, la recherche rapide de cette dernière et son énoncé oral entraînent souvent l'émission d'un phonème apparenté. Les phonèmes correctement retrouvés peuvent aussi être mal ordonnés. Ainsi, les dyslexiques ponctueront leur discours d'un grand nombre de «euh», «ah», et autres signes d'hésitation. Cependant, lorsqu'il n'est pas sommé de produire des réponses rapides, le dyslexique est capable d'une excellente présentation orale. De même, pour la lecture, alors que les lecteurs normaux décodent les mots automatiquement, les personnes telles que Gregory ont souvent besoin du contexte pour identifier des mots. Ce recours les ralentit. En outre, l'absence de contexte qui caractérise les questionnaires à choix multiples pénalise beaucoup les dyslexiques.

Nos expériences indiquent toutefois que nombre de dyslexiques compensés raisonnent et conceptualisent mieux que les non-dyslexiques : un déficit phonologique masque souvent d'excellentes capacités de compréhension. De nombreuses écoles et universités qui commencent à comprendre la nature circonscrite de la dyslexie évaluent aujourd'hui les performances de leurs étudiants dyslexiques par des examens et par des présentations orales avec préparation plutôt que par des tests de mémoire pure ou par des questionnaires à choix multiples. Tout comme les chercheurs ont commencé à comprendre les fondements neurologiques de la dyslexie, les éducateurs reconnaissent les implications pratiques de ce handicap.

Sally SHAYWITZ est codirectrice du Centre pour l'étude de l'apprentissage et de l'attention de Yale.

C.-L. GÉRARD, *L'enfant dysphasique*, éditions de Boeck, 1994.

Isabelle Y. LIBERMAN, Donald P. SHANKWEILER et Alvin M. LIBERMAN, *The Alphabetic Principle and Learning to Read*, in *Phonology and Reading Disability*, sous la direction de D.P. Shankweiler et I.Y. Liberman, University of Michigan Press, 1989.

Learning to Read, sous la direction de Laurence Rieben et Charles A. Perfetti, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J., 1991.

Sally E. SHAYWITZ, Michael D. ESCOBAR, Bennett A. SHAYWITZ, Jack M. FLETCHER et Robert MAKUCH, *Evidence That Dyslexia May Represent the*

Lower Tail of a Normal Distribution of Reading Ability, in *New England Journal of Medicine*, vol. 326, n° 3, pp. 145-150, 16 janvier 1992.

Bennett A. SHAYWITZ, Sally E. SHAYWITZ, Kenneth R. PUGH, R. Todd CONSTABLE, Pawel SKUDLARSKI, Robert K. FULBRIGHT, Richard A. BROWNEN, Jack M. FLETCHER, Donald P. SHANKWEILER, Leonard KATZ et John C. GORE, *Sex Differences in the Functional Organization of the Brain for Language*, in *Nature*, vol. 373, pp. 607-609, 16 février 1995.

G. Reid LYON, *Toward a Definition of Dyslexia*, in *Annals of Dyslexia*, vol. 45, pp. 3-27, 1995.

Des renseignements sur la méthode de P. Tallal sont disponibles sur le Web à l'adresse : <http://www.scilearn.com/>

L'art rupestre d'Afrique australe

ANNE SOLOMON

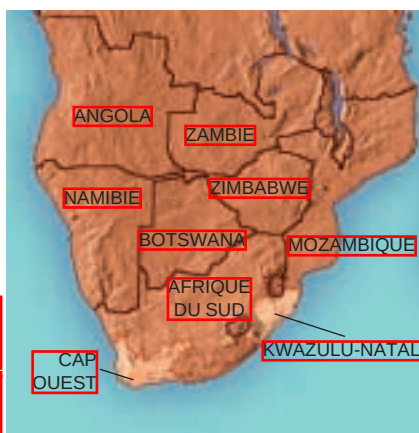
Des peintures et des gravures réalisées par les ancêtres des tribus san retracent l'histoire et la culture d'une société vieille de plusieurs millénaires.

Plus de trois heures durant, Aron Mazel et moi avons parcouru les contreforts herbeux du massif du Drakensberg, en Afrique du Sud, sans rencontrer âme qui vive. Finalement nous arrivâmes à une grotte à moitié masquée par des buissons et par une chute d'eau... qui abritait quelques-unes des plus belles peintures rupestres des anciens San, ou Bochimans, d'Afrique australe : les murs étaient couverts de plus de 1 600 représentations d'humains et d'animaux dans des situations variées. Nous passâmes la nuit dans la grotte et reprîmes notre exploration le lendemain. Sur des sites voisins, nous avons prélevé de minuscules éclats de peinture sur une dizaine d'œuvres pariétales ; puis nous sommes retournés au Cap.

Le pigment utilisé dans l'image d'un éland du Cap (la plus grande antilope africaine) contenait des fibres végétales microscopiques. La datation de ces fibres indiqua que la grotte avait été peinte il y a 400 ans. Une datation directe de ce type est très rare, car la peinture de la plupart des œuvres rupestres, peintes en rouge, en brun ou en ocre (un oxyde de fer hydraté), ne renferme généralement pas de carbone ; on ne peut alors doser le carbone 14, isotope radioactif du carbone. La plus ancienne œuvre rupestre connue en Afrique australe se trouve dans une grotte de Namibie : des dalles y ont été peintes il y a 19 000 à 26 000 ans. Les autres œuvres les plus anciennes d'Afrique australe datent d'une dizaine de milliers d'années.

Les artistes qui ont réalisé ces œuvres appartenaient aux peuples qui colonisèrent l'Afrique australe :

les ancêtres des tribus san actuelles. Le terme «san» désigne les peuples qui parlent les langues san et khoi, anciennement nommées hottentot. Leurs langues font partie du groupe linguistique khoisan, qui comprend plusieurs dizaines de langues et de dialectes apparentés, caractérisés par des claquements de langue. L'économie des chasseurs-cueilleurs san a été beaucoup étudiée, parce qu'on a pensé y trouver un modèle de mode de vie des premiers humains. Les Khoi, en revanche, étaient des pasteurs. Voici 1 500 à 2 000 ans, les bergers Khoi et des groupes d'agriculteurs de l'Âge du fer ont migré vers les territoires san, plus au Sud. Des traces du contact entre les deux cul-



1. DES PEINTURES RUPESTRES, comme cette représentation d'élands du Cap et d'humains (à droite), dans la Réserve naturelle de Kamborg, au Kwazulu-Natal, se rencontrent dans toute l'Afrique australe (ci-dessus). La répartition de ces œuvres révèle l'étendue des régions occupées jadis par les anciennes ethnies san (à l'exception de quelques rares peintures dont le site est précisé, tous les exemples présentés ci-après proviennent du Kwazulu-Natal).



tures se retrouvent dans des peintures de moutons à la queue touffue que les Khoi ont apportés avec eux, ainsi que dans des peintures de bovidés, de sagaies et de boucliers qui appartenaient à la culture des agriculteurs de l'Âge du fer.

L'absence de dates fiables rend toute reconstruction détaillée difficile. On ne connaît l'histoire précise de ce peuple qu'à partir du XV^e siècle, lorsque les Européens s'installèrent en Afrique australe. En 1652, les Hollandais fondèrent Le Cap, première colonie permanente. Cherchant à étendre leur domaine, les nouveaux arrivants eurent des conflits fréquents

avec les autochtones, et le mode de vie des San disparut rapidement. Contre les vols de bétail perpétrés par les San, les Européens usèrent de représailles violentes, massacrant parfois des groupes entiers de San. Les communautés qui survécurent furent finalement absorbées par des sociétés indigènes d'agriculteurs, ou travaillèrent pour les colons européens.

La tradition de l'art rupestre s'est éteinte depuis longtemps. Peu de groupes vivent encore à l'ancienne, excepté dans quelques régions du Botswana et de la Namibie, et, même dans ces contrées reculées, leurs terres et leurs traditions ancestrales sont

menacées. Au cours des dernières années, des mouvements nationalistes se sont opposés aux dépossessions que d'autres Africains, tout autant que les colons européens, ont infligées aux peuples khoisan. Seuls la répartition des sites archéologiques, les noms des lieux et l'art pariétal témoignent encore de l'immensité des régions jadis occupées par ces peuples.

Les archéologues qui étudient l'art san n'ont négligé aucune piste. Ils ont analysé deux types d'œuvres : d'une part, les peintures rupestres, que l'on trouve habituellement dans des grottes et dans des abris exigus et, d'autre part, les gravures sur des



rochers situés dans des zones arides. Encore récemment, les archéologues s'intéressaient peu aux gravures, qui sont plus fréquemment abstraites. Le style et le sujet des peintures varient selon les régions. Parfois, on

trouve plusieurs styles réunis au même endroit, mais on ignore s'il s'agit d'œuvres de différents artistes de la même époque ou de plusieurs périodes historiques. On a d'abord supposé que les peintures les plus

simples, monochromes, étaient les plus anciennes, et que la gamme des couleurs et le style s'étaient progressivement enrichis. Aujourd'hui, nous savons qu'il n'existe aucune corrélation directe de ce genre : certaines des



Anne Scl. Amot



Anne Scl. Amot



Anthony Barnister / AFP

2. LES PEUPLES SAN ont souvent des cérémonies où les individus dansent et chantent en claquant des mains. Parfois, les femmes dansent seules (à gauche) ; certaines sont représentées avec des « tabliers » en cuir, qu'elles portent encore parfois, aujourd'hui. Le détail d'une autre peinture de danses (à droite) représente probablement

œuvres les plus grossières sont probablement les plus récentes ; elles pourraient être l'œuvre de bergers ou d'enfants.

Les sujets les plus représentés sont les êtres humains, habituellement

peints nus et de profil. La plupart semblent être des hommes, mais des recensements ont montré que le sexe de la moitié des personnages au moins ne peut être identifié. Les grands herbivores sont souvent également figu-

rés. Dans toute l'Afrique du Sud prédominent des peintures d'élands du Cap (*Tragelephus oryx*). Au Zimbabwe, on retrouve plus souvent le koudou (*Tragelephus strepsiceros*). Les éléphants sont fréquemment peints dans le Sud-Ouest de la province du Cap, mais rarement dans les montagnes du Drakensberg, dans le Nord-Est.

Les fouilles ont montré que les animaux représentés n'étaient ni les plus abondants ni les plus consommés. Hormis les serpents, les San ont rarement peint des reptiles ou des insectes. L'absence de reproduction de paysages est également mystérieuse.

Pour interpréter l'art pariétal, les archéologues ont la chance de disposer d'une gigantesque collection de témoignages laissés par les peuples de langue san. On a surtout recueilli ces données il y a un siècle, auprès d'une tribu parlant une langue san connue sous le nom de !xam (le point d'exclamation correspond à un claquement de la langue) : en 1870, un groupe de San parlant le !xam fut emprisonné au Cap pour divers délits allant du vol de bétail au meurtre ; le philologue allemand Wilhelm Bleek obtint la garde de ces hommes, qui construisirent des huttes au fond de son jardin, travaillèrent comme domestiques et, surtout, firent le récit de leurs traditions. Alors que Bleek étudiait leur



3. CETTE REPRÉSENTATION d'une cérémonie d'appel de la pluie comporte l'image d'un animal capturé par les faiseurs de pluie ou par des chamans (à gauche). Elle a été peinte en ocre, dans les montagnes du Drakensberg. L'homme accroché à la queue de l'animal est probablement un chaman. Dans la mythologie san, l'éland du Cap est l'animal favori des dieux et possède, tout comme d'autres grands herbivores, le pouvoir de faire venir la pluie.



une cérémonie d'initiation de jeunes filles. La famille !Kung San (ci-dessus) célèbre une chasse dans le Kalahari par des danses nocturnes. On remarque les anneaux en coquille d'œufs d'autruche que porte la femme en bas à gauche ; ils ressemblent aux décorations de points blancs, peintes sur les personnages de la figure de gauche.



langue, sa belle-sœur Lucy Lloyd consigna plus de 10 000 pages de traditions !xam.

Les faiseurs de pluie

Malheureusement, les !Xam ne peignaient plus ou ne gravaient plus, de sorte qu'ils ne purent commenter l'art rupestre qui nous intéresse aujourd'hui. Un seul récit décrit le procédé de peinture. Dans les années 1930, une certaine Mme How localisa un vieil homme du peuple sotho, nommé Mapote, qui avait eu des demi-frères à moitié san ; Mapote raconta à Mme How que, lorsqu'il était jeune, lui et ses demi-frères «avaient l'habitude de peindre à l'une des extrémités d'une grotte, tandis que les vrais Bochimans peignaient à l'autre extrémité». Pour montrer comment il s'y prenait, Mapote utilisa des pinceaux constitués de plumes plantées dans des roseaux et demanda du sang d'éland fraîchement tué pour le mélanger à ses pigments. Il choisit comme sujets des éléphants, des bubales (*Alcelaphus buselaphus*), des lions et des humains. Bien que nous ignorions si ses méthodes étaient les mêmes que celles utilisées dans un passé plus lointain, Mapote fournit un aperçu des procédés utilisés en art rupestre.

Les témoignages !xam révélèrent que les scènes de chasse n'étaient pas

aussi fréquentes que le pensaient les premiers archéologues. Certaines peintures qui semblaient être des scènes de chasse dépeignent probablement un rite destiné à faire tomber la pluie. Les !Xam représentaient les nuages de pluie par des animaux se déplaçant



4. LE THERIANTHROPE, créature mi-humaine et mi-animale, est une figure traditionnelle de la mythologie San. Au commencement, dit le mythe, les animaux et les humains ne faisaient qu'un ; l'homme s'est différencié ensuite. Cette créature semble porter une petite antilope sur son dos.

dans la campagne sur des «pattes» de pluie. Les faiseurs de pluie devaient faire sortir un grand herbivore mythique de son habitat qui était une mare, le mener ensuite sur une hauteur et l'abattre ; la pluie était alors supposée tomber là où avait coulé le sang de l'animal. Ces animaux mythiques ressemblaient à des antilopes ou à des hippopotames, mais présentaient souvent des traits et des proportions étranges. Chez les deux ethnies khoi et san persistent encore des croyances analogues concernant la pluie. Au début de ce siècle, un anthropologue a décrit une cérémonie khoi avec des sacrifices d'animaux ; il a retrouvé de nombreuses caractéristiques mentionnées par les !Xam.

Les peintures représentent-elles ainsi toujours des rites ? Depuis la fin des années 1970, à l'Université de Witwatersrand, David Lewis-Williams soutient que de nombreuses peintures sont des scènes de guérison rituelle. Certaines communautés du Botswana et de Namibie pratiquent encore de telles cérémonies. Au cours d'une danse rituelle qui peut durer toute une nuit, des chamans entrent dans un état de transe déclenché par le rythme de la danse et par le chant puissant des femmes. Dans cet état hallucinatoire, ils accèdent au monde des esprits et acquièrent des pouvoirs surnaturels grâce auxquels ils résol-

5. LES REPRÉSENTATIONS ANIMALES sont nombreuses dans les œuvres san. L'oryctérope (ou cochon de terre) (a), auquel se superposent des créatures humaines, provient de la réserve Giants Castle Game, en Afrique du Sud ; les girafes (b) étaient peintes

dans une grotte des monts Erongo de Namibie ; l'hippopotame (c) est un animal faiseur de pluie très fréquent au Zimbabwe, et le délicat rhébus (d) a été retrouvé dans les montagnes du Drakensberg.



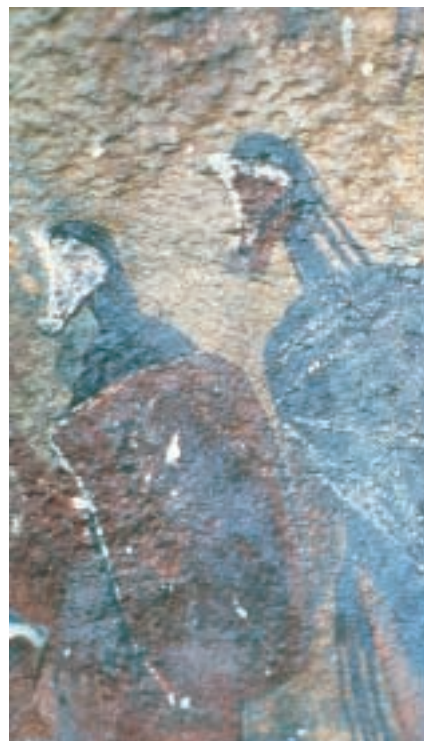
vent les problèmes de la communauté ; ils guérissent notamment les malades.

Diverses représentations pariétales sont interprétées comme des références au chamanisme. Certains personnages humains sont représentés avec des marques rouges sous le nez ; or, les chamans en transe saignent parfois du nez. Selon D. Lewis-Williams et ses collègues, les hallucinations chamaniques pourraient avoir suscité les premières œuvres rupestres : puisque tous les humains ont les mêmes cir-

cuits neurologiques, les hallucinations visuelles seraient identiques quelle que soit l'époque, et les dessins géométriques réalisés en Europe, à l'ère paléolithique et à l'Âge du bronze, tout comme l'art rupestre des Indiens d'Amérique du Nord, seraient aussi des retranscriptions d'expériences hallucinatoires.

Je pense plutôt que la diversité des œuvres artistiques reflète une variété de sources d'inspiration. Plusieurs anthropologues ont noté d'extraordinaires similitudes entre les

mythologies de divers groupes san, très éloignés les uns des autres dans l'espace et dans le temps. Toutes les ethnies san mentionnent une époque primitive où les animaux étaient des humains ; une différenciation, après un événement de création, conduisit à des hommes primitifs, qui restaient stupides et sans coutumes. Puis une seconde création aurait transformé ces hommes en San modernes (un mythe rapporte qu'il aurait fallu une seule création pour engendrer les hommes, mais deux pour les femmes).



6. LES ETRES HUMAINS sont représentés de diverses manières par les artistes san. Les femmes voluptueuses (*ci-dessus, à gauche*) proviennent des montagnes du Drakensberg, ainsi que les grands hommes filiformes portant sur leur dos des carquois remplis de flèches (*au centre*). Les personnages de droite, vêtus de capes de cuir nommées *kaross*, décorées de perles de coquilles d'œufs d'autruche, ont d'étranges visages concaves.



De nombreuses légendes relatent les activités des hommes-animaux. Certaines expliquent l'origine du feu, des corps célestes et d'autres phénomènes physiques. Elles racontent pourquoi les fesses des babouins sont glabres, pourquoi les humains se marient et pourquoi la mort est inéluctable. D'autres thèmes narratifs abordent des rencontres avec des tribus guerrières voisines ou avec de dangereux carnivores.

La nourriture est une préoccupation permanente, avec un nombre étonnant d'histoires d'«autophagie», c'est-à-dire de créatures dévorant leur propre corps. Ce thème pourrait être lié à la grande valeur symbolique attribuée à la viande. Les légendes mentionnent les dilemmes de l'existence auxquels sont confrontés les chasseurs-cueilleurs sans, insistant sur les thèmes de la mort et de la régénération.

La croyance en un état semi-animal, semi-humain permet une interprétation des thérianthropes, créatures à la fois humaines et animales. Ces images, et celles d'autres êtres fantastiques, pourraient figurer des entités d'un monde primitif ou, encore, dépeindre l'expérience chamanique de la transformation physique au cours de la transe, lorsque les chamans pénètrent dans le royaume des esprits de

L'acte de peindre

La comparaison ethnographique des peintures éclaire l'étude de l'art préhistorique européen, sans pour autant apporter la clé de son interprétation. Cette comparaison permet de poser de nouvelles questions, d'orienter les recherches en invitant le chercheur à élaborer des modèles dont il s'efforce ensuite d'établir la validité. Par exemple, D. Lewis-Williams interprète des peintures de Pech Merle (Lot) comme étant d'origine chamanique. Selon lui, les peintures de chevaux ponctués seraient produits par des peintres en état de conscience altérée ou illustreraient les visions qu'ils ont eu pendant la transe.

L'interprétation chamanique des peintures rupestres d'Afrique australe par D. Lewis-Williams a suscité un vif débat international, car il prétend que cette origine a

été rapportée par les Bochimans eux-mêmes, dont les derniers représentants sont malheureusement tous morts.

Pour vérifier cette interprétation, nous avons tenté de reproduire ces peintures avec des méthodes employées dans les sociétés traditionnelles (comme les aborigènes australiens). Nous avons montré que les pigments utilisés contenaient de l'oxyde de manganèse, produit toxique pouvant conduire à des hallucinations et à un état de transe. Au cours de la réalisation de son œuvre, le peintre met des pigments dans sa bouche et les crache contre le mur pour produire de petits points (méthode du crachis). En peignant, le peintre se projeterait ainsi dans l'animal qu'il peint : l'acte de peindre était un rite en lui-même.

Michel LORBLANCHET, CNRS, Toulouse



Anne Scl. unior



POUR LA SCIENCE 1997

la mort. Le monde mythique étant connu de tous, les artistes n'étaient probablement pas tous des chamans.

Une fenêtre ouverte sur la culture

De nombreuses créatures mentionnées par les mythes n'apparaissent pas dans l'art rupestre. D. Lewis-Williams explique que l'art reflète plus les rites que la mythologie, mais maints récits abordent la relation entre notre monde et celui des esprits, et décrivent comment les San percevaient le monde. Bien que l'art ne soit pas une illustration directe des mythes, il se fonde sur la même gamme de croyances religieuses. La mythologie fournit ainsi un contexte à la fois aux rites et à l'art. De nombreux sites auraient été peints durant des rites ou d'autres événements importants, ou bien en relation avec ces événements.

L'un des sites que nous fouillons dans le Sud-Ouest de la province du Cap représente principalement des femmes. Cette prédominance inhabituelle indiquerait que le site aurait abrité des rites exclusivement féminins, tels des rites d'initiation, qui

étaient célébrés lorsque les filles atteignaient la puberté. Cette découverte montre que, contrairement à une opinion répandue, l'art pariétal ne représente pas essentiellement des hommes.

Les San supposaient que les femmes pubères pouvaient menacer la communauté par leurs pouvoirs. Par exemple, les !Xam croyaient que la femme initiée pouvait, d'un simple regard, changer un homme en pierre ou en arbre. Cependant, malgré la crainte de ces pouvoirs dangereux, toute jeune femme atteignant la puberté était l'objet d'une initiation. L'initiation des hommes semble avoir constitué un rite beaucoup moins important.

Les sociétés san sont égalitaires, car l'accès aux ressources est partagé entre tous. Cependant, dans tous les groupes étudiés par les anthropologues, les hommes ont des privilèges. Leur statut est supérieur, car ils fournissent la viande, alors que les femmes s'occupent de la récolte de racines et de fruits. Seuls des hommes semblent avoir été des «faiseurs de pluie» et, dans les groupes san modernes, les chamans sont plus souvent des hommes que des femmes. La plupart

des sites riches en peintures sont pauvres en silhouettes féminines. Les sites comportant des représentations où prédomine l'un ou l'autre sexe semblent avoir été peints au cours de rituels conduits exclusivement par des individus de ce sexe.

Des interprétations périmées

Les peintures et les gravures figurant les colons européens peuvent être des témoignages d'événements réels, plutôt que de rituels. De surcroît, les représentations révèlent les interactions entre les San et d'autres ethnies. Ainsi, les empreintes de mains trouvées le long de la côte Sud-Ouest, qui prédominent habituellement dans l'art plus ancien, pourraient être l'œuvre de bergers khoi. Les représentations du bétail introduit par les bergers et les agriculteurs émigrés, ainsi que des objets en fer, des épis de maïs et des colliers en perles de verre trouvés lors de fouilles sont autant d'éléments indiquant que les San commerçaient avec d'autres peuples.

Les préhistoriens ont de grandes difficultés pour reconstituer l'histoire de



Anthony Barnister / Getty

7. LES GRAVURES, que l'on trouve dans des régions arides, sont extraordinairement variées. Un rocher gravé d'antilopes a été trouvé au Nord-Ouest de la Province du Cap (à l'extrême gauche). En haut à gauche, un couple d'Européens filiformes a sans doute été ajouté postérieurement. Des animaux divers sont également ciselés sur des rochers à Khorixas, en Namibie (au centre). De nombreuses gravures, telles celles qui ont été découvertes dans le désert du Sud de la Namibie (en haut), présentent des dessins abstraits. On pense que ces motifs ont été inspirés par des expériences hallucinatoires.



8. LA RENCONTRE avec les Européens, avec leurs armes et leurs chevaux, est dépeinte dans l'abri de Beersheba, dans les montagnes du Drakensberg. Les San, qui occupaient autrefois toute l'Afrique australe, sont aujourd'hui confinés dans quelques régions qui ne cessent de se réduire.

ces peintures, principalement parce qu'elles sont mal datées. Les matières organiques présentes sous forme de traces, dans le liant qui a été mélangé aux pigments, permettent parfois de dater les peintures. Toutefois, les échantillons sont souvent contaminés par de la matière organique plus récente, et les artistes san n'ont pas toujours utilisé de liants. Les informations les plus fiables sont fournies par des matières tombées des parois d'une grotte et intégrées dans les couches archéologiques du sol. À partir du charbon de bois et d'autres substances organiques présentes dans les couches, les datations au carbone 14 indiquent l'âge des dépôts.

Ainsi Royden Yates et Antonietta Jerardino, de l'Université du Cap, ont récemment déterré, dans une grotte de la côte Ouest, des fragments de peinture datant avec certitude de 3 500 ans. Outre la grotte que A. Mazel et moi-

même avons visitée au Kwazulu-Natal, un autre site a été bien daté : dans le Sud-Ouest de la province du Cap, les archéologues de l'Université du Cap ont étudié une peinture en noir d'une figure humaine ; comme la peinture était probablement à base de charbon de bois, elle renfermait suffisamment de carbone pour une datation et se révéla remonter à environ 500 ans (plus ou moins 140 ans).

Témoignage extraordinaire du passé, l'art rupestre san est un élément important de la culture d'Afrique australe. Toutefois, les peintures se décolorent lentement, s'écailent ou sont recouvertes de graffiti, et les rochers gravés disparaissent peu à peu. Grâce aux efforts combinés d'un ensemble de spécialistes, nous espérons que l'art rupestre subsistera comme un testament de cette ancienne culture qui a malheureusement disparu.

Anne SOLOMON travaille à l'Université du Cap.

J.D. LEWIS-WILLIAMS et J. CLOTTES, *Les chamanes de la préhistoire*, éditions du Seuil, 1996.

Michel LORBLANCHET, *Les grottes ornées de la préhistoire*, éditions Errance, 1995.

J.D. LEWIS-WILLIAMS et A.T. DAWSON, *L'art des Bochimans : peintures et gravures d'Afrique australe*, in *Grand Atlas Universalis de l'Art*, Encyclopædia Universalis, 1992.

J. David LEWIS-WILLIAMS, *Believing and Seeing : Symbolic Meanings in Southern San Rock Paintings*, Academic Press, 1981.

W.H.I. BLEEK, L. LLOYD et G.M. THEAL, *Specimens of Bushman Folklore*, George Allen, Londres, 1911

Alan BARNARD, *Hunters and Herders of Southern Africa*, Cambridge University Press, 1992.

Miscast : Negotiating the Presence of the Bushmen, sous la direction de Pippa Skotnes, University of Cape Town Press, 1996.

Le pinceau du peintre

FRANÇOIS PEREGO

Cette touffe de poils a des propriétés physico-chimiques que les peintres apprennent à maîtriser pour créer des effets spéciaux.

O bjet anodin, ravalé au rang de simple touffe de poils par ceux qui ne le manient pas souvent, le pinceau cache tant de subtilités qu'il figurait parmi les sept trésors du lettré chinois. Une série d'observations et de manipulations simples nous montrera comment la physico-chimie aide à l'employer habilement.

L'acte de peindre fait intervenir le pinceau, mais aussi le fluide véhiculé et un support sur lequel ce fluide est étalé. Commençons par analyser le pinceau, dont l'anatomie est rudimentaire : une touffe de poils ordonnés est liée à un manche par une monture (plume, ficelle, virole métallique...). Les caractéristiques de la touffe de poils, partie active du pinceau, dépendent de la longueur des poils, de leur forme (cylindrique, conique ou fusiforme), de leur nature et de leur finesse.

Pour les peintres, le type de poils d'un pinceau, naturel ou synthétique, est fondamental. Est-ce justifié ? Les poils

naturels sont exclusivement d'origine animale : les poils à base de fibres végétales ne sont plus utilisés, bien que les Égyptiens les aient employés pour créer des chefs d'œuvre, dans l'Antiquité. Aussi les poils naturels sont soit des poils fins à fleur unique (la fleur est l'extrémité effilée du poil), tels les poils de martre kolinski, de blaireau, de putois, d'écureuil petit-gris, de chèvre, etc. ; soit des soies à fleur multiple, de porc ou de sanglier. La fleur multiple donne un toucher doux à ces poils raides et nerveux, tout en augmentant la capacité de la touffe. Un poil dont la fleur a été coupée, tel celui du poney, ne peut pas former de pinceau faisant aussi bien la pointe.

Pourquoi les manuels de peinture recommandent-ils tantôt les poils blancs, plus souples, tantôt les poils foncés ? Parce que la composition et la structure du poil déterminent ses propriétés. Tous les poils naturels sont composés de kératine, une protéine hydrophile, qui se ramol-

lit à l'eau, mais est insensible aux solvants organiques. Cette kératine est incrustée de mélanine, en quantité variable et sous une forme et une répartition variables ; la mélanine rigidifie la structure et détermine ainsi la nervosité et l'élasticité du poil. De plus, des écailles qui recouvrent la cuticule de kératine accroissent la rétention capillaire, c'est-à-dire la quantité de liquide qui monte dans la touffe sous l'action des forces capillaires.

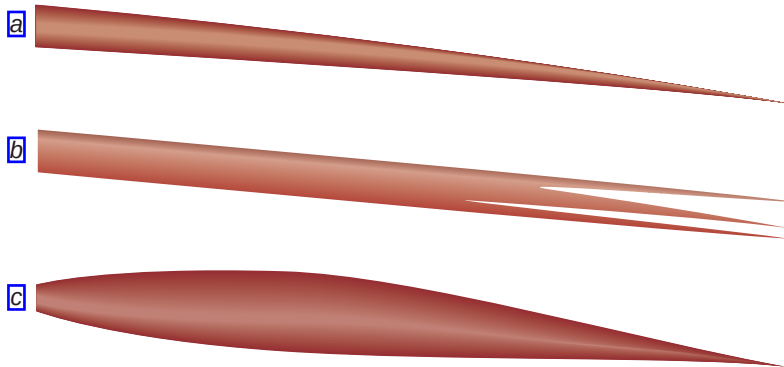
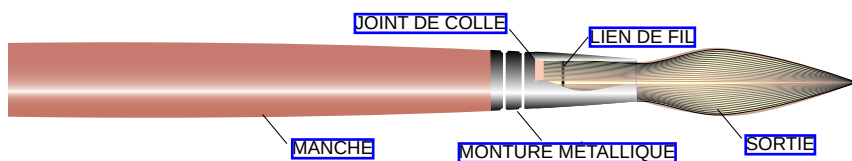
Les poils synthétiques, en polyamide ou en polyester, imitent autant que possible la forme des poils naturels, mais leur nature chimique les rend insensibles à l'eau (hydrophobes, ils ne s'y ramollissent donc pas), et sensibles aux solvants organiques.

Les critères de choix d'un pinceau comprennent également le module d'élasticité du poil : ce nombre qui mesure la rigidité d'un poil est d'autant plus faible que le diamètre est faible (ce diamètre n'est pas régulier, sur toute la longueur du poil et, pour les poils naturels, il peut varier selon les poils du pinceau). Le module d'élasticité des poils détermine la rigidité de la touffe et, de ce fait, conditionne aussi le contact avec le support (le pinceau pousse davantage le fluide dans les creux si les poils sont fermes).

Enfin la forme de la touffe ajoute à la complexité inattendue de ce pinceau qui semblait si simple : la section peut être ronde ou plate, et de dimensions variées ; l'extrémité peut être pointue, carrée ou bombée ; et le profil peut être droit, former un ventre ou partir en éventail. Que de variantes possibles ! Une dizaine de formes, une vingtaine de sortes de poils différents, qui peuvent d'ailleurs être mélangés, divers types de montages des poils sur le pinceau, une sortie (longueur de poil utile qui dépasse de la virole) allant du simple au décuple, dépassant 150 millimètres pour certains poils et n'atteignant pas deux millimètres pour certains pinceaux, enfin une section comprise entre un millimètre et plusieurs centimètres.

PEINTURE, PÂTE ET POUDRE

Cet outil complexe n'est pas cantonné au travail des peintures : on l'utilise aussi pour déposer des liquides, des pâtes ou des poudres. Là encore, la diversité est plus grande que ne le soupçonnent les néophytes : les liquides sont plus ou moins visqueux, homogènes ou chargés de grains de tailles variées ; les pâtes et les gels peuvent être plastiques ou thixotropes (nous verrons plus loin ce dont il s'agit) ; les poudres peuvent être



1. Le type de trait formé par un pinceau dépend de composition et de la forme de la touffe, mais aussi de la structure des poils : fins à fleur unique (a), soie à fleur multiple (b) ou fusiformes (c).

constituées de particules régulières ou non, sphériques, en aiguilles ou lamellaires, impalpables ou grossières. Et tous ces matériaux peuvent être hydrophiles ou hydrophobes...

Pour maîtriser l'application des peintures, il est utile de reprendre la distinction des physiciens : les fluides «newtoniens», tout d'abord, s'écoulent à une vitesse proportionnelle à la contrainte appliquée ; les fluides non newtoniens, d'autre part, ont des comportements plus complexes. Par exemple, les fluides plastiques, ne s'écoulent que lorsque la contrainte devient supérieure à un seuil ; les fluides élastiques reviennent à leur position d'origine dès que la contrainte n'est plus suffisante. Naturellement, plus un liquide est visqueux, moins il s'écoule spontanément de la touffe ; les pâtes peuvent même être prises avec le plat d'une brosse en soies, et tenues en toutes positions sans se déformer.

Pour ces pâtes, une caractéristique physique fréquemment rencontrée est la thixotropie : ces pâtes, qui sont en fait des gels, ont la faculté de passer à l'état fluide sous la contrainte, un peu comme la mayonnaise, qui est ferme quand elle repose dans un bol, mais fluide quand elle passe en bouche. La nature thixotropique de certaines pâtes permet d'appliquer une peinture apparemment épaisse avec un pinceau relativement souple. Grâce à la thixotropie, certains peintres, tel Petrus Paulus Rubens, ont posé des touches sur des fonds frais, sans que les couleurs se mélangent : par exemple, pour peindre des tournesols jaunes sur un ciel bleu, soit on attend que le bleu du ciel sèche, soit on applique une peinture thixotropique, dont la fluidité provoquée par le mouvement du pinceau évite l'entraînement de la couleur bleue du fond déjà posé.

Le support, enfin, intervient par sa rugosité, qui retient mécaniquement le fluide, par son affinité physico-chimique vis-à-vis du fluide et par sa porosité. Pour y déposer la quantité de peinture appropriée, le peintre en bâtiment, comme l'artiste génial et inspiré, maîtrise l'angle que forme le pinceau avec le support, la pression sur la touffe (qui détermine la déformation) et la vitesse d'étalement (la réaction rhéologique). La façon de charger le pinceau ou de l'essorer sont également importantes. Il est passionnant, du reste, de comparer l'évolution des outils et l'histoire des techniques ; c'est un autre sujet, mais on observe que les utilisateurs ont sélectionné, durant plus de deux millénaires, les outils qui convenaient le mieux à leur tâche.

TOUT EST PHYSIQUE

Examinons le problème de la peinture par les phénomènes physiques qui régissent les rapports entre le pinceau, le fluide et le support : ces phénomènes sont la capillarité, la rigidité mécanique du poil (caractérisée par le module d'élasticité), l'affinité physico-chimique, la viscosité et l'absorbance du support.

Un pinceau est un distributeur de liquide, de pâte ou de poudre. L'analyse de son fonctionnement comprend donc celle des mouvements du fluide, lors de la prise de celui-ci, puis du déchar-

gement vers le support. Pour comprendre ces mouvements, il est utile de comparer le pinceau à une pompe aspirante-refoulante.

Pour un liquide de viscosité pas trop élevée, le phénomène de capillarité est prépondérant : le liquide monte entre les poils en raison des forces capillaires qui s'exercent au contact des surfaces. La loi due au médecin et physicien anglais James Jurin (1684-1750) stipule que la hauteur à laquelle s'élève un liquide dans un tube capillaire varie en raison inverse du rayon du tube à l'endroit où s'arrête le liquide et en proportion directe de la



François Perard

2. Cette peinture hollandaise du XVII^e siècle est un bel exemple de peinture où l'artiste joue à la fois avec le pinceau et avec la consistance de la pâte. L'agrandissement inférieur montre l'œil du brochet. On voit que le cerne ocre le plus proche de l'œil fut réalisé (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) avec un coup de pinceau tiré d'abord assez lentement, puis plus rapidement. Les rehauts blancs, près de l'œil, sont travaillés avec une pâte onctueuse, posée calmement ; quelques petits traits allongés sont tirés plus rapidement. L'écaille beige pâle, en haut à droite, est exécutée avec une brosse gorgée de peinture pressée contre le support.

tension superficielle. La viscosité ne modifie pas cette hauteur, mais elle peut ralentir le mouvement, jusqu'à l'immobiliser complètement : du miel d'acacia s'écoule facilement dans un entonnoir, mais difficilement dans une seringue munie d'une aiguille fine.

Comment utiliser cette loi dans le cas des pinceaux ? L'espace entre les poils fait office de capillaire, de sorte que la montée capillaire dans un pinceau dépend de la finesse des poils : plus ils sont fins, plus l'espace entre eux peut être petit, et mieux le liquide monte. La hauteur atteinte dépend également de la tension superficielle du liquide, de sa densité et de sa viscosité. Je vous engage ainsi à mettre en contact la pointe d'un pinceau en poils fins (d'écureuil petit-gris, par exemple) avec de l'eau : celle-ci monte jusqu'en haut de la touffe. L'ascension a

lieu parce que les poils sont parfaitement mouillés par le liquide : l'eau ne monterait pas si les poils étaient en Téflon, par exemple. De surcroît, l'eau favorise la formation d'une pointe : elle ramollit les poils naturels, qui suivent alors plus facilement les mouvements imposés par le fluide, et elle rapproche les poils les uns des autres, par réaction : si les poils attirent l'eau, l'eau attire aussi les poils.

Cette brève analyse montre que le mythe du pinceau à un seul poil ne tient pas (certains ont prétendu que les traits fins de certaines miniatures ont été faites avec des pinceaux à un poil) : pour disposer d'une réserve capillaire, le peintre doit avoir au moins deux poils à son pinceau.

La maîtrise de cette réserve capillaire permet des effets remarquables. Ainsi certains peintres chinois et japonais char-

gent leur pinceau de plusieurs couleurs (par exemple un jaune dans la touffe et un noir sur la pointe), afin que les liquides se déchargent ensuite dans l'ordre inverse de leur montée capillaire, ce qui permet d'obtenir des tracés en dégradé (voir la figure 6).

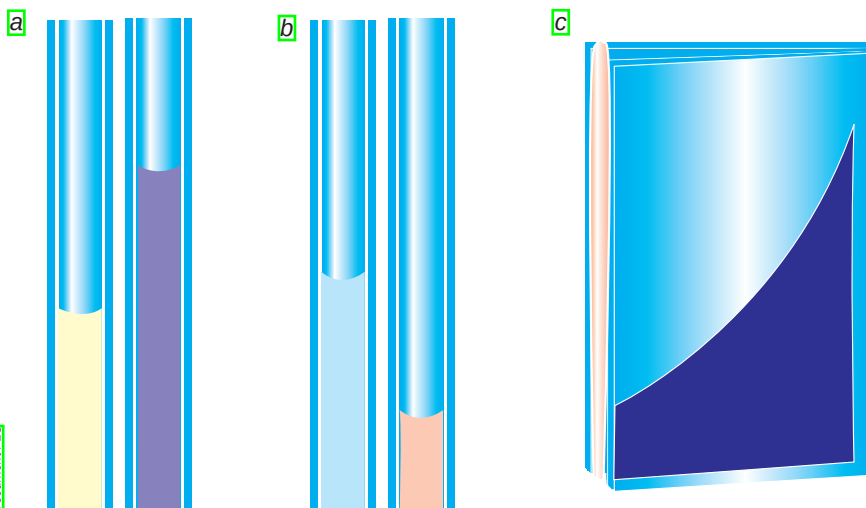
Comment utiliser correctement un pinceau pour les traits plus familiers ? Je vous invite à observer ce qui se passe quand vous trempez complètement dans de l'eau la touffe d'un pinceau en poils fins naturels : ceux-ci, du fait de leur faible densité et de leur souplesse, s'écartent ; puis, lorsqu'on retire doucement le pinceau de l'eau, ils gardent une quantité de liquide supérieure à celle qu'ils auraient pris par simple montée capillaire, emprisonnant une grosse goutte dans une cage de poils. Toutefois une chiquenaude fait perdre cet embonpoint. Un pinceau aux poils raides (une brosse en soies de porc, par exemple) ne manifeste pas ce comportement. La montée capillaire et la capacité de réserve sont donc, pour un liquide donné, supérieures pour un pinceau aux poils fins.

Toutefois, si les poils sont trop serrés, la réserve est réduite. Inversement, en jouant sur la géométrie du poil, par exemple avec un poil en fuseau comme celui de la martre kolinski, on obtient une forte réserve à la base et une pointe fine, grâce à la fleur effilée, rigidifiée de surcroît, par les forces capillaires, qui y sont plus intenses. Notons que la réserve disponible d'un pinceau est nécessairement inférieure à la quantité totale de liquide qui y est chargé : une partie nécessaire au mouillage des poils n'est plus disponible. C'est la «part du pinceau» (plus les poils sont fins, plus la surface développée est importante) qui, évidemment, force le peintre à revenir plus souvent à sa palette. «Bien prendre pour bien donner» serait la devise du pinceau idéal.

DU PINCEAU AU SUPPORT

Le pinceau étant chargé, posons-le contre le support : si celui-ci a une affinité physico-chimique pour le liquide et s'il est assez poreux, la capillarité tend à faire descendre une partie du liquide. Cette concurrence capillaire peut être très forte : essayez de peindre des briques au pinceau avec une peinture liquide ! La peinture imbibe si vite la brique que l'on doit recharger aussitôt le pinceau. Parfois, au contraire, la faible affinité du support pour la peinture gêne le travail : essayez de couvrir régulièrement une vitre, voire du Téflon !

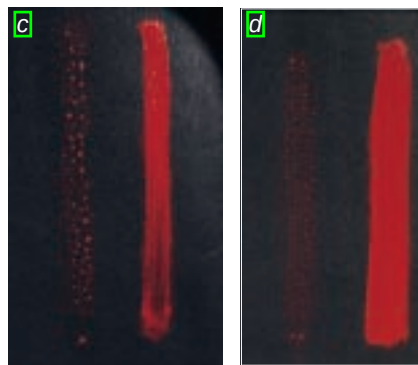
Lors de l'application de la peinture, la loi de Jurin s'applique encore, mais la gravité aide en outre le pinceau à se



3. Si l'on compare la montée capillaire de quelques liquides, on met en évidence les paramètres de la loi de Jurin : deux liquides de densité voisine, mais de tensions superficielles différentes (a), telles la morpholine et l'eau, atteignent des hauteurs très différentes. Deux liquides de tensions superficielles voisines, mais de densités différentes, tels le dichlorométhane et le benzène (b), montent également différemment. L'écart de la montée capillaire est proportionnel aux différences observées entre les densités ou les tensions superficielles. En (c), l'encre monte moins haut entre les lames de verre à l'endroit où elles sont écartées par une bande de plastique. La viscosité ralentit le mouvement de montée, mais elle ne modifie pas la hauteur maximale atteinte. Ces trois expériences révèlent le mécanisme du pinceau : la montée capillaire dans le pinceau dépend de la finesse des poils (plus ils sont fins, mieux le liquide monte), de la tension superficielle du liquide, de sa densité et de sa viscosité (trop visqueux, le liquide ne monte pas).



4. La vitesse du pinceau détermine la qualité du trait. Sur la partie gauche de la figure, on a indiqué les traces laissées par de la peinture fluide (peinture à l'eau). À droite, c'est de la peinture épaisse (à l'huile). Les deux traces supérieures ont été déposées lentement, les deux tracés inférieurs plus rapidement.



5. La fluidité de la peinture et la nature du support déterminent le type d'effet réalisé par les peintres et imposent le choix du pinceau. Les traces (a) et (b) ont été appliquées sur du papier, respectivement avec un pinceau de poils fins et un pinceau de poils durs. Ci-dessus, de même sur du Téflon (c et d). À gauche de chaque série, on a utilisé une aquarelle très fluide : à droite, de la peinture à l'huile en pâte.



6. Les peintres d'Extrême Orient exploitent la montée capillaire jusqu'au point de placer plusieurs couches superposées dans la touffe du pinceau. Ils obtiennent ainsi des traces de plusieurs couleurs fondues, qui sortent dans l'ordre inverse de leur chargement.

décharger s'il est tenu la pointe en bas. Au total, si le support est gourmand, la réserve de peinture est rapidement épuisée ; on résout ce problème en corrigeant la viscosité du liquide, mais il faut tenir compte de cette modification dans le choix du pinceau. D'autre part, comme le contact avec le support vide une partie de la réserve capillaire, on peut reprendre, ailleurs sur le support, du liquide avec un pinceau pas trop chargé. Cette propriété est utilisée en aquarelle : par exemple, lors de la réalisation d'un ciel bleu, l'aquarelliste qui a déposé tout le bleu de fond nécessaire peut décharger son pinceau sur un papier absorbant, et repomper localement un peu de la peinture déjà posée pour créer quelques nuages.

Le peintre qui veut maîtriser son art doit aussi considérer la déformation de la touffe en fonction du mouvement : lorsqu'on l'écrase ou qu'on la plie, les poils se resserrent et la réserve capillaire diminue. C'est ainsi que l'on essore un pinceau sur le bord d'un pot de peinture. La touffe peut être déformée de plusieurs manières, même par torsion. La déformation est réversible tant que les poils peuvent glisser les uns sur les autres, mais un fluide trop vis-

queux rigidifie la touffe, ce qui en fixe les déformations.

L'ANGLE ET LA VITESSE

On se doute que la position du pinceau par rapport au support est déterminante. L'angle et la pression interviennent tous deux dans la déformation de la touffe, ainsi que dans l'aire de la surface de contact de la touffe et du support. L'entraînement visqueux, le laminage du bourrelet de fluide entre la touffe et le support, et l'étalement capillaire dépendent étroitement de ces facteurs. Essayez des pinceaux de divers poils, plus ou moins fins ou nerveux, différents supports, et des fluides de viscosités variées. Vous noterez que l'angle ne pourra pas être identique pour un pinceau pointu ou à bout carré, un pinceau rond ou un pinceau plat : le contact de la fleur du poil avec le substrat n'est alors pas la même.

Avec l'angle, la nature du fluide détermine la vitesse de défilement maximale du pinceau. Un fluide visqueux, par exemple, ne s'écoule plus à partir d'une certaine vitesse d'écoulement : la perte de charge due aux frottements et aux turbulences devient supérieure aux

forces qui provoquent l'écoulement. Alors le pinceau décroche, reprend contact avec le support un peu plus loin, et ainsi de suite, ce qui crée des variations périodiques d'épaisseur du film appliqué (voir la figure 4). Chaque matière impose une vitesse optimale : trop lent, le pinceau qui court sur un fond vierge dépose une couche trop mince, tirée ; trop rapide, il n'étale pas bien, et peut même « surfer » sur la matière (il flotte presque au-dessus de la couche peinte, et ne modifie que la couche superficielle de la peinture appliquée). Enfin la porosité du support et la vitesse de réaction du fluide aux contraintes déterminent la vitesse d'étalement optimale. C'est ainsi que le peintre joue avec les molécules. Comment doit-il s'y prendre ?

Examinons d'abord le cas d'un fluide très visqueux, voire pâteux : la montée capillaire peut être nulle, et le pinceau agit plus, alors, comme une truelle : sous l'effet de la pression, la pâte se charge entre les poils, qu'elle écarte. La touffe ainsi chargée peut être vidée par une déformation, et c'est la viscosité de la pâte qui la fait adhérer au support lorsque le peintre tire le pinceau. Le pinceau peut même ne prendre la pâte que sur la surface de la touffe, à la manière d'un



François Perego

7. Certains gels «thixotropes» peuvent passer de l'état gel à l'état fluide quand ils sont soumis à des contraintes (la photographie montre un gel thixotrope avant et après agitation).

couteau pour tartiner. La brosse, pinceau dur en soie de porc, pose, appuie, racle, pousse, tire la pâte sur le support. Son poil, s'il était trop mou, n'aurait pas une résistance suffisante. Il n'est d'ailleurs parfois plus indispensable d'utiliser un pinceau : pensons à la peinture au couteau, ou avec les doigts.

Avec les brosses en poils raides, tels les soies de porc, les poils dans le côté sous pression de la courbure concave s'écartent de la touffe à la base, augmentant ainsi la réserve de peinture à cet endroit. Mais aussi, lors de la relaxation de la contrainte, une partie de la pâte remonte à la surface de la touffe, pour former un bourrelet. Le peintre doit régulièrement récupérer cette peinture. Une pâte thixotrope accentue le phénomène : cette partie de la touffe se déforme peu, donc les mouvements de fluide y sont lents. La pâte gélifie et ne redescend plus dans la touffe.

Le peintre choisit ainsi ses pinceaux en fonction de la consistance de la pâte qu'il travaille : un poil fort pour une pâte, avec une sortie courte pour des pâtes plus épaisses ; un poil fin et souple pour les peintures plus fluides et un bon réservoir si nécessaire, car, dans ce cas, on peut jouer avec les phénomènes de capillarité. Il existe une différence importante entre les brosses de porc rudes et courtes utilisées par Van Gogh ou Monet, et les pinceaux en petit gris ou en martre employés par les aquarellistes. Inversement il est impossible de peindre comme Van Gogh avec des pinceaux en petit gris, ou de travailler comme Van Eyck avec des brosses en porc.

Pour que le trait ou l'aplat soit régulier, l'écoulement doit être continu, ce qui dépend de la capacité du pinceau à délivrer le fluide, de la vitesse d'éta-

ment, de la nature du fluide et de l'absorbance du support. D'autant qu'un pinceau ne sert pas seulement à étaler une matière, mais aussi à la travailler, à la lisser, la structurer, fondre deux teintes, etc. Certains pinceaux, même, ne permettent pas de prendre de la peinture : on les réserve pour retravailler une peinture déjà appliquée.

Cet univers du pinceau est plein de mystères. Il est parfois difficile de nettoyer un pinceau à fond : il reste souvent de la peinture à la base de la touffe entre les poils, ce qui forme un talon, gêne le nettoyage et finit par abîmer le pinceau. Une conception nouvelle de pinceau résoudra-t-elle ce problème ? D'autre part, les poils synthétiques s'usent en se courbant et en se bouclant vers l'extérieur, contrairement aux poils naturels ; les fabricants utilisent de plus en plus les mélanges de poils synthétiques et naturels, mais quelles sont les proportions idéales et pour quels rapports de diamètres de poils ?

Les poils naturels ne poussent pas toujours droit, de sorte qu'ils sont souvent redressés, durant leur préparation, mais il arrive souvent que des poils sortent du gabarit idéal de la touffe. Existe-t-il un système de «mise en plis» qui moulerait la touffe dans une forme quasi parfaite, sans dénaturer les capacités du poil ? La section des poils synthétiques, comme celle des poils naturels, est cylindrique : une autre section accroîtrait-elle la réserve, le nerf, la conduite capillaire ou la douceur du toucher sans compliquer le nettoyage ? Outil millénaire, le pinceau n'a pas fini d'évoluer.

François Perego est peintre restaurateur à Bécherel (Ille-et-Vilaine).

Le Monopoly revisité

IAN STEWART

Le jeu est équitable, mais, à long terme, toutes les cases ne sont pas équiprobables.

En juin 1996, nous avons examiné un modèle mathématique du jeu de *Monopoly*. Au début du jeu, lorsque tous les joueurs sortent de la case *Départ*, en lançant une paire de dés, ils ont des probabilités variées d'atteindre les douze premières cases. En utilisant des objets mathématiques nommés «chaînes de Markov», nous avons vu que la répartition initiale des probabilités d'occupation des cases se nivelait progressivement, et nous avons conclu que le jeu est équitable : tous les joueurs ont la même probabilité d'occuper une case quelconque et d'acheter la rue qui lui correspond. Toutefois ce résultat n'est vrai qu'au prix de simplifications, et les adeptes du *Monopoly* m'ont fait remarquer que, dans le vrai jeu, la répartition à long terme n'est pas équiprobable.

Quelle est la véritable répartition ? La méthode des chaînes de Markov s'applique également au véritable jeu, mais l'analyse est complexe et impose un recours à l'aide informatique. Avant tout, revoyons comment les chaînes de Markov s'appliquent au *Monopoly*. Un joueur peut être sur n'importe laquelle des 40 cases du plateau que, par commodité, nous numérotions dans le sens des aiguilles d'une montre, de 0 pour la case *Départ*, à 39 pour la *Rue de la Paix*.

Entre deux cases A et B, la probabilité de transition est le nombre qui exprime la probabilité qu'un joueur partant de A atteigne B à son prochain lancer des dés. Si le déplacement est impossible, la probabilité de transition est nulle.

Il existe 40×40 , soit 1 600 probabilités de transition, que l'on représente dans une matrice carrée M (un tableau de nombres) à 40 lignes et à 40 colonnes. Par exemple, le coefficient de la sixième ligne et de la dixième colonne est la probabilité de passer de la *Gare Montparnasse* à l'*Avenue de la République* en un coup. Les probabilités d'occupation initiales, pour tout joueur, sont égales à 1 pour la position 0, et à 0 pour les autres cases ; on peut les représenter par un vecteur $v = (1, 0, 0, \dots, 0)$.

La théorie des chaînes de Markov indique que l'évolution de cette répartition de probabilités est donnée par la suite de vecteurs $v, Mv, M^2v, M^3v, \dots$, où chaque lancer de dés correspond au produit de M par le vecteur précédent de la suite. Les programmes d'ordinateur calculent de telles suites, ainsi que les valeurs propres et vecteurs propres des matrices. Un vecteur u est un vecteur propre de M , associé à la valeur propre c , si Mu est égal à cu : le produit d'une matrice par un vecteur propre donne un vecteur proportionnel au vecteur propre. Le théorème

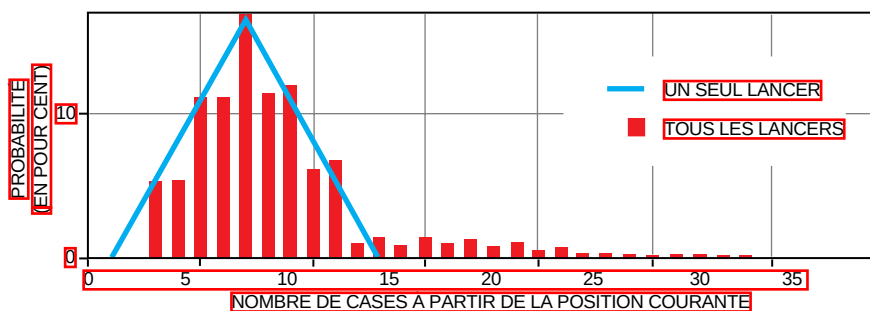
central de Markov stipule que la répartition à long terme est donnée par le vecteur propre dont la valeur propre a la plus grande valeur absolue. Ainsi, pour savoir si le *Monopoly* est équitable, il suffit d'explicitier la matrice M et d'appliquer l'analyse matricielle. C'était particulièrement facile, dans mon modèle simplifié du jeu, mais, dans le jeu réel, il faut tenir compte des rôles multiples des dés, des cases spéciales telles que *Allez en prison*, et des instructions données par les cartes qui tirent les joueurs quand ils arrivent sur une case *Chance* ou *Caisse de communauté*.

De nombreux lecteurs m'ont fait part de leur analyse du jeu ; examinons une synthèse de leurs résultats (tous les modèles de *Monopoly* simplifient le jeu ; les différences entre les hypothèses ne sont pas importantes).

LES DOUBLES ET LA PRISON

La première modification de mon modèle initial est la prise en compte des règles relatives aux dés : si les dés marquent deux valeurs identiques, le joueur rejoue, mais trois doubles consécutifs l'envoient en prison. Le lancement des dés est, à lui seul, une petite chaîne de Markov, qui doit être traitée par la méthode usuelle. Le résultat est un graphe de la probabilité de déplacement d'une distance quelconque à partir de la position initiale (voir la figure 1). Notez que la distance la plus probable est 7 et qu'un joueur peut se déplacer au maximum de 35 cases (en lançant $6 + 6, 6 + 6, 6 + 5$). En outre, les déplacements de plus de 29 cases sont si peu probables qu'ils ne sont pas visibles sur un graphe à cette échelle. On incorpore ces résultats dans la matrice M en ajustant chaque coefficient.

Incluons ensuite l'effet du *Allez en prison*. Les règles carcérales posent un problème, car un joueur peut choisir d'acheter sa liberté, ou de rester en prison et d'essayer de lancer des doubles qui l'en sortiraient (ou encore, lorsque la prison devient un refuge contre des loyers élevés, de rester en prison et d'espérer n'obtenir aucun double). Les probabilités associées à ces choix dépendent de la psychologie des joueurs, champ que les chaînes de Markov décrivent mal. La plupart des lecteurs qui m'ont écrit ont contourné cette difficulté en supposant que le joueur n'achète pas sa liberté. La case *En prison* n'est alors plus une simple case, mais un sous-processus markovien : une suite de trois cases (virtuelles) où les joueurs vont de *Juste en prison*, à *En prison depuis un tour* et à



1. La probabilité de déplacement d'un nombre de cases en un lancer, compte tenu des règles de lancement des dés, est maximale pour le déplacement de sept cases. Quand un joueur tire un double, il relance les dés ; trois doubles consécutifs l'envoient en prison.

Sortie de prison au prochain tour. La probabilité d'occupation de la case *Allez en prison* est nulle, puisque personne ne l'occupe.

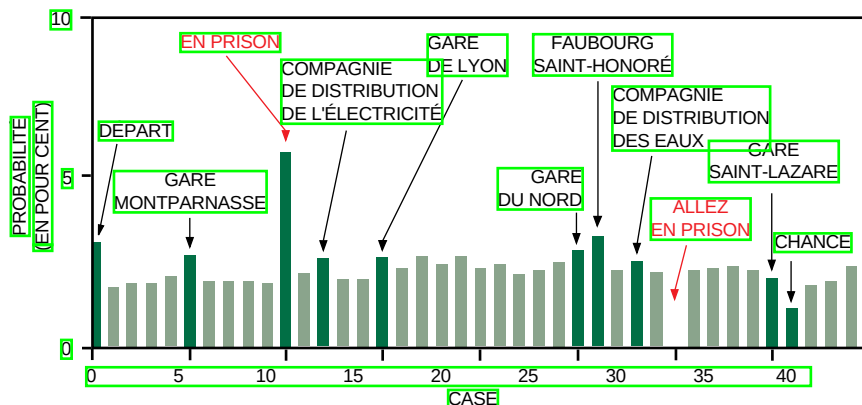
L'étape suivante de la description consiste à modifier la matrice M afin de tenir compte des cases *Chance* et *Caisse de communauté*, qui peuvent envoyer un joueur en prison ou sur toute autre position du plateau. On peut incorporer ce raffinement en comptant la proportion de cartes qui envoient les joueurs sur les diverses cases. La probabilité associée est alors ajoutée au coefficient correspondant de la matrice.

La matrice de transition ainsi précisée, on détermine les probabilités à long terme, soit en calculant numériquement ses valeurs propres et ses vecteurs propres, soit en calculant l'effet d'un grand nombre de mouvements à partir des matrices M^2 , M^3 , M^4 ... Le théorème général de Markov indique que ces méthodes sont mathématiquement équivalentes.

Les probabilités à long terme d'occupation des diverses cases sont indiquées sur la figure 2. On voit que les joueurs risquent deux fois plus d'occuper la case *En prison* (5,89... pour cent) que n'importe quelle autre case. La case la plus probable, après la prison, est le *Faubourg Saint-Honoré* (3,18... pour cent). La *Gare du Nord* est la plus fréquentée de toutes les gares (3,06... pour cent), tandis que la *Gare Saint-Lazare* est largement désaffectée (2,44... pour cent) : aucune carte *Chance* ne lui est associée. Parmi les services, la *Compagnie de distribution des eaux* (2,81... pour cent) l'emporte de peu sur la *Compagnie de distribution de l'électricité* (2,62... pour cent). La case *Départ* est la troisième case la plus probable (3,11... pour cent), et la troisième case *Chance* (0,87... pour cent) est la moins probable de toutes, la prison exceptée (0 pour cent, pour les raisons évoquées précédemment).

INVESTISSEMENTS

Un ingénieur de la Société *Boeing*, Thomas Friddell, a poussé l'analyse plus loin et a analysé le marché des propriétés. Il voulait trouver le seuil de rentabilité pour acheter des maisons, c'est-à-dire le niveau à partir duquel les revenus deviennent supérieurs aux coûts, et déterminer les meilleures stratégies pour les achats de maisons et d'hôtels. Les exigences du marché des propriétés dépendent du nombre de joueurs et de la version des règles qu'ils adoptent. Si l'on admet que les maisons peuvent être achetées dès le début du jeu, l'analyse dégage plusieurs principes généraux. Bien que l'achat d'une maison, au début du jeu, soit plus gênant, le seuil de



2. La répartition des probabilités à long terme montre que la case *En prison* est celle dont l'occupation est la plus probable.

Réaction

Les sculptures d'Alan Saint George (voir *La sculpture et les nombres*, Pour la Science, août 1996) m'ont valu un courrier abondant : de nombreux lecteurs se sont demandé comment réaliser des objets tridimensionnels à base de polyèdres réguliers. William Sheppard, de Columbus (Ohio), m'a fait parvenir les détails de son astucieuse méthode de découpe de tétraèdres ou d'octaèdres réguliers dans du bois, en ajoutant que «des modèles solides, pleins, sont préférables à ceux que l'on obtient en collant des triangles équilatéraux». Il avait publié ses méthodes dans le *Journal of Chemical Education* (vol. 44, p. 683, novembre 1967).

Norman Gallatin, de l'Iowa, a étudié les solides platoniciens pendant un quart de siècle et réalisé de remarquables sculptures, parfois à l'aide de miroirs. L'image ci-contre représente une projection tridimensionnelle d'un hypercube quadridimensionnel ; un astucieux usage de réflexions crée un effet complexe à partir de composants simples. D'autres sculpteurs ou fabricants d'objets mathématiques ont-ils des réalisations aussi étonnantes?



Vue de l'Hypercube III

rentabilité est plus vite atteint. Trois maisons procurent un net avantage. Entre *Départ* et *Boulevard Malesherbes*, la case de meilleur rapport pour trois maisons est *Place Pigalle*. Les propriétés au-delà du *Boulevard Malesherbes* ne furent pas évaluées : T. Friddell m'a écrit qu'il avait arrêté ses calculs, parce qu'il craignait que les résultats ne soient pas publiés. Pour quelqu'un qui évalue des probabilités, ce n'est pas fort !

Nombre d'autres lecteurs ont fait des observations intéressantes. Ainsi le jeu reste équitable bien que les probabilités d'occupation des cases ne soient pas égales, puisque la répartition calculée est identique pour tous les joueurs.

Vous avez peut-être déjà eu l'impression que les cases *Avenue Mozart*, *Boulevard Saint-Michel* et *Place Pigalle* sont particulièrement intéressantes, en raison de la forte probabilité de les atteindre en sortant de prison. Cette

impression est confirmée par les calculs, qui montrent que ces trois propriétés sont parmi les douze meilleures. Un lecteur m'a reproché d'avoir insinué que les propriétés bon marché furent placées près du *Départ* pour répartir plus également les chances. Il a signalé que, dans la plupart des tournois de *Monopoly*, les propriétés bon marché sont stratégiquement importantes : comme les propriétés lucratives sont coûteuses à l'achat et à la construction, on ne peut les posséder sans des revenus provenant de propriétés bon marché. Je l'admets, bien que je persiste à signaler que le placement d'une propriété lucrative dans la première moitié du plateau aurait créé des inégalités, en vertu du critère selon lequel aucun joueur ne peut gagner un grand avantage purement par chance. Et je ne suis guère convaincu qu'acheter un grand nombre de propriétés bon marché, puis de les louer, soit une stratégie de pauvre !

Obsession de π

JEAN-PAUL DELAHAYE

Grâce à une nouvelle formule pour π , on sait calculer (en base 2) le 400 milliardième chiffre de π sans connaître les autres.

En 1995, nombreux étaient ceux qui pensaient qu'il n'y avait plus grand-chose de spectaculaire à attendre concernant π : sans doute allait-on continuer à progresser dans le calcul des décimales, mais cela se ferait au rythme régulier du perfectionnement des machines, et non pas grâce à des avancées mathématiques nouvelles. La découverte d'une nouvelle formule pour π par une équipe canadienne de l'Université Simon Fraser, à Burnaby, en Colombie-Britannique, et les conséquences de cette découverte prouvent que π reste à la fois riche et énigmatique.

On sait calculer aujourd'hui presque aussi loin que l'on veut les chiffres du nombre π (hélas, en binaire ou en base 16, pas encore dans le système décimal).

LES MACHINES... NE FONT PAS TOUT

Un livre d'histoire sur le calcul de π énonçait, en 1970, qu'il n'y aurait plus rien de nouveau concernant le quadrimillénaire nombre π . Or, dès 1975, la découverte de nouveaux algorithmes de calcul de π et l'application des méthodes de multiplication rapide donnaient un coup d'accélérateur au calcul des décimales de π , ce qui permettait, en quelques années, de passer du million de déci-

males connues (record atteint, en 1973, par les Français Jean Guilloud et Martine Bouyer) aux six milliards quatre cents millions de décimales en 1995 (record actuel du Japonais Yasumasa Kanada).

Les progrès des microprocesseurs seuls auraient permis de passer de 1 à 500 millions, au mieux, entre 1973 et 1995. L'histoire de π l'avait déjà montré : le progrès mathématique est essentiel pour aller plus loin dans le calcul de ses chiffres, et c'est ce qui donne du sens à cette course (outre l'utilité parfois évoquée de ces calculs pour tester les ordinateurs et leurs logiciels). La méthode que nous allons examiner est d'une nature bien différente, et plus révolutionnaire encore que les méthodes de multiplication rapide : elle est fondée sur la découverte d'une formule qui permet le calcul des chiffres de π très loin sans avoir à calculer ceux qui précèdent.

Selon Stan Wagon, ce nouveau progrès constitue un changement de direction radical dans le cours d'une histoire pourtant aussi ancienne que celle des mathématiques. Il y a quelques mois, si vous aviez demandé à un mathématicien s'il jugeait possible de sauter au dix-milliardième chiffre de π sans avoir à en calculer les précédents, il vous aurait ri au nez : pour tout le monde.

c'était impossible. Les mathématiciens sont parfois persuadés, sans véritable preuve, mais en s'appuyant sur leur fameuse et trop commode intuition, de certaines impossibilités qu'un illuminé ou simplement un mathématicien génial sans complexe vient balayer d'un revers de main.

En 1989, les frères Borwein, grands spécialistes des méthodes de calcul de π (voir *Les mathématiciens, Pour la Science*, 1996), écrivaient : « Il est raisonnable de spéculer que calculer le n -ième chiffre de π n'est pas vraiment plus facile que calculer tous les chiffres jusqu'au n -ième. » Il est amusant de remarquer que l'un des frères Borwein appartient à l'équipe qui a démenti ce jugement!

UNE FORMULE NOUVELLE

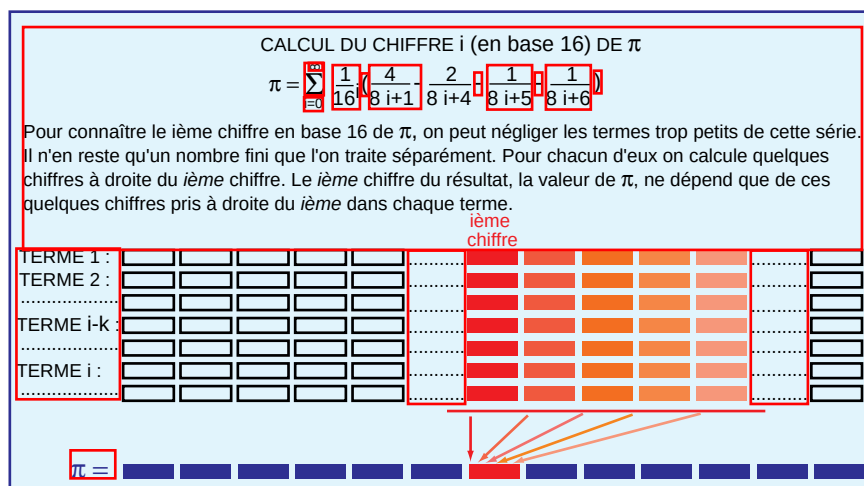
La découverte de la nouvelle formule est datée avec une grande précision (sans doute grâce aux sauvegardes des fichiers informatiques contenant les traces des calculs qui ont conduit à sa découverte) : le 19 septembre 1995, à 0h29, Simon Plouffe, après un mois de recherche à tâtons, dans le cadre de travaux menés avec David Bailey et Peter Borwein, en s'aidant du programme de calcul formel PSLQ, mais pleinement conscient de ce qu'il cherche (l'utilisation de moyens informatiques pour faire des mathématiques ne signifie pas que le mathématicien devient idiot!). trouve que :

$$\pi = \left(\frac{4}{1} - \frac{2}{4} - \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{16} \left(\frac{4}{8+1} - \frac{2}{8+4} - \frac{1}{8+5} + \frac{1}{8+6} \right) \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{16^i} \left(\frac{4}{8i+1} - \frac{2}{8i+4} - \frac{1}{8i+5} + \frac{1}{8i+6} \right)$$

Cette fantastique formule permet de calculer n'importe quel chiffre de π en base 2 : vous pouvez calculer directement le 40 milliardième chiffre de π sans calculer les précédents. D'ailleurs, l'équipe canadienne l'a calculé : c'est un '1' suivi de 0010010. Aujourd'hui, personne n'a calculé les 40 milliards de chiffres binaires de π qui précèdent (on y arrivera sans doute dans quelques années, mais, pour l'instant, c'est impossible ou d'un coût tellement énorme que personne ne peut se payer cette folie).

Tout récemment, le 7 octobre 1996, Fabrice Bellard, de l'IRISA, à Rennes, en utilisant les mêmes techniques, a réussi à atteindre le 400 milliardième chiffre binaire de π , qui est aussi un '1' suivi cette fois de 001110000111000.

Pour le calcul de tous les chiffres de π , la nouvelle formule n'est pas exceptionnelle (comparée à d'autres, par exemple, dues à Ramanujan). Voici ce qu'on trouve



en calculant la somme $P(n)$ des n premiers termes de la somme infinie :

$P(1)=3.141422466422466422466422...$
 $P(2)=3.141587390346581523052111...$
 $P(3)=3.141592457567435381837004...$
 $P(4)=3.141592645460336319557021...$
 $P(5)=3.141592653228087534734378...$
 $P(50)=3.141592653589793238462643383279502884197.$

LES CHIFFRES, MAIS PAS LES DÉCIMALES

Indiquons tout de suite qu'aucune formule analogue à celle-ci n'a été trouvée permettant d'accéder rapidement aux chiffres décimaux (c'est-à-dire en base 10) de π indépendamment les uns des autres.

Si c'est π en base 10 qui vous intéresse, rien ne vous permet encore de connaître la quarante milliardième décimale sans avoir calculé celles qui précèdent et donc, à moins de battre très sensiblement le record actuel, cette quarante milliardième décimale vous restera inconnue. En revanche, le passage de la base 2 à la base 4 ou 8 (ou plus généralement 2^n) peut se faire par petits bouts (on regroupe les chiffres), et inversement de la base 2^n à la base 2. Les premières tentatives (déjà très sérieuses) pour trouver une formule analogue à la nouvelle, mais adaptée à la base 10, ont pour l'instant échoué.

En décembre 1996, une méthode de calcul individuel des chiffres décimaux de π n'utilisant que très peu de mémoire (comme celle détaillée ici pour les chiffres binaires) a été proposée par S. Plouffe. Cette astucieuse méthode est fondée sur une ancienne formule de calcul de π et sur des propriétés particulières des coefficients du binôme de Newton. Avec cette méthode, la consommation d'une petite quantité de mémoire doit malheureusement se payer par une durée de calcul bien plus grande qui en empêche l'utilisation pratique pour battre de nouveaux records. Des améliorations de la méthode ne sont toutefois pas impossibles : en ce qui concerne la base 10, les espoirs se concrétisent.

La formule de Bailey-Borwein-Plouffe (que nous appellerons BBP) aurait pu être découverte depuis des siècles, notamment par Euler, qui en a trouvé tant de merveilles. En effet, rien dans sa démonstration n'est délicat ni extraordinaire : la difficulté était d'imaginer l'existence d'une telle formule, et de l'écrire. Il a fallu attendre 1995.

La formule BBP connue, d'autres formules analogues ont été découvertes en quelques mois, pour toutes sortes de constantes mathématiques : comme bien souvent dans le domaine scientifique, quand un coin du voile a été soulevé par

une équipe, géniale ou chanceuse, tout un pan de montagne nouveau apparaît. C'est un véritable filon qu'a détecté l'équipe de l'Université Simon Fraser, et l'on n'a pas fini de faire marcher la pelle et la pioche. Peut-être d'ailleurs que ce filon contient des diamants plus gros que celui déjà extrait : l'effervescence règne.

Nous allons expliquer pourquoi la formule BBP permet le calcul du 400 milliardième chiffre binaire de π sans avoir à calculer ceux qui précèdent. Pour la comprendre, il suffit de savoir compter et de maîtriser le jeu des retenues dans une addition.

Comme nous sommes plus habitués à manipuler des nombres écrits en base 10 qu'en base 2 ou 16, nous expli-

querons les idées du calcul avec des exemples en base 10. Évidemment ces explications s'adaptent à toutes les autres bases, et c'est en définitive en base 16 (et donc 2) qu'elles sont vraiment utiles.

COMMENT ON UTILISE LA FORMULE BBP

L'explication s'organise autour de quatre idées.

Idée 1. Lorsque l'on additionne de très grands nombres (par exemple, deux nombres de 200 chiffres chacun), on peut savoir ce qui se passe vers le milieu sans avoir à calculer beaucoup : le calcul d'une seule addition des deux chiffres en position 100 ne sera pas toujours suffisant,

NOM	DATE	NOMBRE DE DÉCIMALES
Babyloniens	2000 av. J.C.?	3,125 (3+1/8) 11
Égyptiens	2000 av. J.C.?	3,16045 (16/9) ² 11
Chine	1200 av. J.C.?	3 1
Bible	550 av. J.C.	3 1
Archimède	250 av. J.C.	3,14185 3
Liu Hui	264	3,14159 5
Al-Kashi	1429	14
Van Ceulen	1609	34
Sharp	1699	71
Machin	1706	100
De Lagny	1719	127 calculées, 112 exactes
Rutherford	1824	208 calculées, 152 exactes
Strassnitzky, Dase	1844	200
Clausen	1847	248
Lehmann	1853	261
Rutherford	1853	440
Shanks	1874	707 calculées, 527 exactes
Ferguson	1-1947	710
Ferguson et Wrench	9-1947	808
Smith et Wrench	1949	1 120
Reitwiesner et al (ENIAC)	1949	2 037
Nicholson et Jeanel	1954	3 092
Felton	1957	7 480
Genuys	1-1958	10 000
Shanks et Wrench	1961	100 265
Guilloud et Bouyer	1973	1 001 250
Miyoshi et Kanada	1981	2 000 036
Tamura et Kanada	1982	8 388 576
Kanada, Yoshino et Tamura	1982	16 777 206
Gosper	1985	17 526 200
Bailey	1-1986	29 360 111
Kanada, Tamura, Kobo et al.	1-1987	
Chudnovsky	6-1989	134 217 700
Chudnovsky	11-1989	525 229 270
Kanada et Tamura	5-1994	1 073 741 799
Chudnovsky	10-1995	4 044 000 000
Kanada	1996	6 442 450 938
Bailey-Borwein-Plouffe	1996	en base 2, sans calculer tout ce qui précède : 40 milliardième
Bellard	10-1996	en base 2, sans calculer tout ce qui précède : 400 milliardième

mais il n'y a pas besoin de grand-chose de plus.

Imaginons que nous voulions connaître le chiffre en position 100 de l'entier obtenu en additionnant le nombre de 200 chiffres $X = \dots a b c \dots$ qui comporte les chiffres décimaux a, b et c en position 100, 101 et 102 avec le nombre $Y = \dots a' b' c' \dots$ qui, lui, possède les chiffres décimaux a', b' et c' en position 100, 101 et 102.

$$\begin{array}{r} \text{+} \quad \dots a \ b \ c \ \dots \\ \text{+} \quad \dots a' \ b' \ c' \ \dots \\ \hline \text{= } \dots ? \ \dots \end{array} \quad \begin{array}{r} \text{+} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline a & b & c \\ \hline \end{array} \\ \text{+} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline a' & b' & c' \\ \hline \end{array} \\ \hline \text{= } \begin{array}{|c|c|c|} \hline a'' & b'' & c'' \\ \hline \end{array} \end{array}$$

101 102 103

Tout est une question de retenues. Supposons qu'on calcule la somme des deux entiers abc et $a'b'c'$ comme on le ferait pour une addition habituelle de deux nombres entiers à trois chiffres et qu'on obtienne $a''b''c''$. Posons-nous la question : quand a'' est-il bon ? C'est-à-dire : quand a'' est-il le chiffre qu'on obtiendrait en position 100 en faisant complètement l'addition des 200 chiffres de X et des 200 chiffres de Y ?

La réponse est simple : a'' sera bon sauf si $b + b' = 9$ et $c + c' = 9$, car alors, tout dépendra de ce qui se passe à droite dans la grande addition. S'il y a une retenue à reporter, celle-ci se propagera jusqu'au $a + a'$ qu'il faudra changer, sinon elle ne se propagera pas. De cela, il résulte que, sauf malchance (au plus une fois sur 100), on tombera sur le bon chiffre a'' dans l'addition en se contentant de calculer avec trois additions de deux chiffres. De plus, si malchance il y a, on le saura et on pourra donc aller voir un peu plus à droite et calculer avec quatre ou cinq chiffres pour être certain d'avoir le bon a'' .

Donc, à condition d'aller voir un peu à droite (mais pas bien loin), on est certain de ce qu'on calcule au milieu de la grande addition sans avoir à la faire entièrement.

Ce principe s'applique aussi quand on additionne successivement plusieurs grands entiers ou quand on multiplie un grand entier par un petit entier (on appelle ainsi un entier de quelques chiffres, 30 ou 50 au plus) : on sait avec certitude ce qui se passe au milieu en se contentant de calculer un peu à droite de ce qui nous intéresse. «Un peu», en pratique, signifie quelques dizaines de chiffres, mais qu'est-ce qu'un calcul sur 30 chiffres ou 50 chiffres lorsqu'on évite la manipulation de milliards de chiffres.

Nous venons de voir qu'on peut additionner localement de grands entiers ou multiplier localement un grand entier par un petit. En revanche, ce n'est pas vrai pour la multiplication de deux grands entiers ou pour la division (sinon, il y a

longtemps qu'on saurait calculer les chiffres de π par le milieu).

Idée 2. On peut calculer le n -ième chiffre (pensez à n égal à 10 milliards), d'un nombre de la forme $1/(k 16^i)$ en base 16 en ne faisant qu'une série de petits calculs.

Pour faciliter la compréhension, comme précédemment, nous nous plaçons en base 10, et nous allons expliquer comment on peut calculer le n -ième chiffre décimal de $1/(k 10^i)$ en ne faisant que des petits calculs. Prenons $n = 1\ 000$ (pour alléger un peu), $i = 35$, $k = 49$. Nous voulons calculer le 1 000^e chiffre décimal de $1/(49 10^{35})$.

Chacun sait que, pour multiplier un nombre décimal par 10, il suffit de décaler la virgule d'un chiffre vers la droite. Donc, le 1 000^e chiffre décimal de $1/(49 10^{35})$ est le 999^e chiffre de $1/(49 10^{34})$, qui est le 998^e de $1/(49 10^{33})$, etc. Donc, finalement, on a à calculer le 965^e chiffre de $1/49$.

En utilisant encore le principe du décalage, on trouve que ce chiffre est le même que le premier chiffre après la virgule de $10^{964}/49$.

Imaginons que nous réussissions à calculer le reste r de la division de 10^{964} par 49 sans avoir à manipuler de grands nombres (c'est l'idée 3), alors : $10^{964} = 49 q + r$, avec q entier et $r < 49$, et donc : $10^{964}/49 = q + r/49$.

Puisque q est un entier, le premier chiffre après la virgule de $10^{964}/49$ est le même que le premier chiffre après la virgule de $r/49$, ce qui est facile à déterminer (car $r < 49$) en faisant la division (qui est une division entre petits entiers).

Donc, au total (sous réserve qu'on puisse facilement calculer le reste de la division de 10^{964} par 49), nous savons comment calculer le 1 000^e chiffre décimal de $1/(49 10^{35})$ et, plus généralement, n'importe quel chiffre isolé, même très loin en base p , d'un nombre de la forme $1/(n p^i)$ si n est un petit entier.

Idée 3. Le calcul du reste de la division de 10^{964} par 49 est facile et peut se faire sans avoir à manipuler de grands nombres.

Pour calculer ce reste, on utilise «l'arithmétique modulo 49», qui consiste à soustraire 49 autant de fois que c'est nécessaire dès qu'on l'a dépassé. Par exemple, $35 + 45 = 80 = 31$, $3 \times 45 = 135 = 37$, etc.

Le calcul du reste de la division de 10^{964} par 49 est alors ramené au calcul de 10^{964} dans cette «arithmétique modulo 49» où le module d'une somme est la somme des modules, etc., et l'on procède comme suit.

Calcul de proche en proche de 10^2 , 10^4 , 10^8 , etc., modulo 49 :
 $10^2 = 100 = 2$; $10^4 = 2^2 = 4$; $10^8 = 4^2 = 16$;

$10^{16} = 16^2 = 256 = 11$; $10^{32} = 11^2 = 121 = 23$; $10^{64} = 23^2 = 529 = 39$; $10^{128} = 39^2 = 1521 = 2$; $10^{256} = 2^2 = 4$; $10^{512} = 4^2 = 16$.

Décomposition de 964 en somme de puissance de 2 :

$$964 = 512 + 256 + 128 + 64 + 4$$

$$10^{964} = 10^{512 + 256 + 128 + 64 + 4} =$$

$$16 \times 4 \times 2 \times 39 \times 4 = 25.$$

On n'utilise que des petits nombres, et aucune manipulation n'est vraiment longue (même si, à la place de 1 000, on avait mené les calculs avec dix milliards).

Idée 4. On exploite maintenant la formule BBP, qui nous indique que le nombre π est une somme de termes dont pour chacun il est facile (d'après ce qu'on vient de voir) de connaître le 10-milliardième chiffre en base 16.

$$\pi = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{16^k} \left(\frac{4}{8i+1} - \frac{2}{8i+4} + \frac{1}{8i+5} - \frac{1}{8i+6} \right)$$

Il semble qu'il y ait quand même une difficulté, car cette somme est infinie. Mais $1/16^i$ diminue très rapidement quand i augmente, et donc seuls les premiers termes de la série ont à être pris en compte (bien sûr, tout cela est soigneusement évalué). En définitive, connaître le dix-milliardième chiffre en base 16 de π a été ramené à une suite de petits calculs sur de petits entiers et on n'a jamais eu à mémoriser des milliards de chiffres comme cela était le cas pour toutes les méthodes de calcul de π jusqu'à présent (y compris la méthode du compte-gouttes).

Pour terminer le calcul et avoir les chiffres binaires de π , on utilise la connaissance du n -ième chiffre en base 16 de π . Ce n -ième chiffre donne les chiffres binaires de π de rang $4n - 3$, $4n - 2$, $4n - 1$ et $4n$ par remplacement de chaque chiffre en base 16 par quatre chiffres binaires en suivant la règle :

0 $\rightarrow$ 0000, 1 $\rightarrow$ 0001, 2 $\rightarrow$ 0010, 3 $\rightarrow$ 0011, 4 $\rightarrow$ 0100, 5 $\rightarrow$ 0101, 6 $\rightarrow$ 0110, 7 $\rightarrow$ 0111, 8 $\rightarrow$ 1000, 9 $\rightarrow$ 1001, A $\rightarrow$ 1010, B $\rightarrow$ 1011, C $\rightarrow$ 1100, D $\rightarrow$ 1101, E $\rightarrow$ 1110, F $\rightarrow$ 1111.

Voici quelques résultats donnés par D. Bailey, P. Borwein et S. Plouffe dans leur article sur la nouvelle formule et ses extensions. Précisons que D. Bailey fut le premier à atteindre 29 millions de décimales en 1986 (sa plaque minéralogique de voiture, paraît-il, est P314159) et que P. Borwein est connu pour avoir trouvé avec son frère de nombreuses et très efficaces formules de calcul de π , dont certaines sont utilisées par le Japonais Y. Kanada pour atteindre ses records (A = 10, B = 11, ..., F = 15).

π en base 16 à partir de la position :
 10^6 : 26C65E52CB4593
 10^7 : 17AF5863EFED8D
 10^8 : ECB840E21926EC

10^9 : 85895585A0428B
 10^{10} : 921C73C6838FB2

Les auteurs ont programmé ces calculs sur les ordinateurs de la NASA, où D. Bailey travaille. Comme s'ils craignaient qu'on ne les accuse de dilapider l'argent du contribuable américain dans des calculs absurdes, ils précisent qu'ils n'ont utilisé les machines que pendant qu'elles étaient inoccupées.

LES CLASSES DE COMPLEXITÉ ET π

D'un point de vue théorique, qu'est-ce qu'apportent la nouvelle formule pour π et les formules du même genre trouvées depuis? Plusieurs choses importantes.

La classe de Steven SC_2 est celle des nombres dont on peut calculer les chiffres binaires en «temps polynomial» et en «espace log-polynomial». Lorsqu'un nombre est dans SC_2 , pour en connaître le n -ième chiffre binaire, on doit calculer pendant (par exemple) n^2 secondes et utiliser $\log n$ mémoires : le temps de calcul augmente, en fonction du numéro n de la décimale qu'on veut connaître, au plus comme un polynôme en n , et la mémoire nécessaire au calcul augmente au plus comme un polynôme en $\log(n)$ (c'est-à-dire lentement, car $\log_{10}(10) = 1$, $\log_{10}(100) = 2$, $\log_{10}(1000) = 3$, etc.).

La nouvelle formule pour π ne permet pas de calculer le n -ième chiffre plus rapidement que les méthodes connues avant elle (et qui nécessitaient toutes le calcul des chiffres précédents) ; en revanche, elle permet de calculer ce n -ième chiffre sans avoir à utiliser et gérer une trop importante quantité de mémoire (ce qui est l'obstacle factuel pour ces calculs) : la nouvelle formule montre que π appartient à la classe de Steven SC_2 , ce que tout le monde ignorait avant (et jugeait même improbable).

La découverte de S. Plouffe, en 1996, devrait permettre d'étendre le résultat théorique à la base 10 et à toute base. Pour la base 2, il y a une conséquence pratique remarquable : pour calculer des millions de chiffres de π , il n'est plus nécessaire de programmer des calculs en arithmétique exacte, c'est-à-dire de développer de longs programmes spécialisés dans la manipulation des entiers de très grande taille. En utilisant les méthodes décrites plus haut, on peut se contenter de l'arithmétique de base de l'ordinateur (arithmétique d'une ou deux dizaines de chiffres bien souvent) et donc, avec un programme court de quelques dizaines de lignes, on calcule les chiffres binaires de π très très loin. Ce qui, en définitive, autorise l'accès à des chiffres binaires de π que personne, avant, ne connaissait.

Bien sûr, d'autres limites (celles dues au temps de calcul) bornent encore l'endroit qu'on peut atteindre dans π : π est infiniment long, et nous n'en connaissons jamais qu'une infime partie!

L'exploitation de la nouvelle formule de π n'est pas terminée. Programmée plus soigneusement encore qu'elle ne l'a été depuis les quelques mois qu'elle est connue, ou en utilisant des ordinateurs parallèles, il est certain qu'elle va donner des chiffres bien au-delà du

400 milliardième. D'après S. Plouffe, on devrait rejoindre la 10^{15e} position binaire de π dans un proche avenir, ce qui, il n'y a pas longtemps, était considéré comme définitivement impossible ou réservé à nos arrière-petits-enfants! Le fractionnement du travail de calcul sur une multitude de petites machines, qu'autorise la nouvelle formule, rend facile l'établissement de nouveaux records, et cela même si l'on exige de ne prendre en

LA DÉSESPÉRANTE BANALITÉ DE π

En 1995 le Japonais Kanada a calculé 6 442 450 000 décimales de π . En prenant en compte les 6 milliards premières, on a trouvé les apparitions suivantes des différents chiffres :

0 : 599 963 005	1 : 600 033 260
2 : 599 999 169	3 : 600 000 243
4 : 599 957 439	5 : 600 017 176
6 : 600 016 588	7 : 600 009 044
8 : 599 987 038	9 : 600 017 038

La vitesse avec laquelle les fréquences approchent de $1/10$ est conforme à ce qu'on obtiendrait avec un tirage au hasard. L'écart doit diminuer comme $1/\sqrt{n}$, ce qui semble être le cas puisque la fréquence du '7' par exemple est :

0	pour les 10 premières décimales
0,08	pour les 100 premières décimales
0,095	pour les 1000 premières décimales
0,097	pour les 10000 premières décimales
0,10025	pour les 100000 premières décimales
0,0998	pour les 1000000 premières décimales
0,1000207	pour les 10000000 premières décimales

Avec les 10 millions premières décimales de π , on peut engendrer deux millions de séries de 5 chiffres qu'on peut assimiler à des mains de Poker. On calcule quel est le nombre statistiquement attendu de certaines configurations de Poker pour des mains tirées au hasard (si on jouait avec un jeu ayant 10 sortes de cartes différentes au lieu de 13). On s'aperçoit alors que ce qu'on trouve pour les mains de poker tirées des décimales de π ressemblent à celles qu'on aurait par de véritables tirages aléatoires.

	Nombre attendu	Nombre trouvé
les 5 décimales distinctes	604 800	604 976
2 décimales identiques (une paire)	1 008 000	1 007 151
deux paires	216 000	216 520
3 décimales identiques (brelan)	144 000	144 375
un full (paire + brelan)	18 000	17 891
un carré	9 000	8 887
5 décimales identiques	200	200

D'autres études ont été faites et personne jusqu'à présent n'a jamais trouvé de propriété statistique remarquable des décimales de π , qui apparaissent donc désespérément banales.

Le nombre π semble aléatoire. Mais ce serait aller trop vite en besogne que de conclure cela car :

- d'une part, rien n'est démontré : on ne sait même pas si tous les chiffres sont utiles (personne n'a prouvé que π ne se termine pas par 2020020002...);
- d'autre part, satisfaire certaines propriétés statistiques n'est pas suffisant pour être considéré comme aléatoire. Le nombre de Champernowne, 0,123456789101112131415..., n'est pas du tout aléatoire et pourtant il est normal en base 10 et donc il satisfait aussi les tests de fréquence envisagés plus haut.

La nouvelle formule de Bailey Borwein et Plouffe pour la première fois depuis des siècles offre une perspective de progrès dans la connaissance des propriétés générales des chiffres binaires de π .

compte que les chiffres dont on connaît tous les chiffres précédents.

Plus important encore, la formule BBP ouvre la porte à une étude mathématique générale des chiffres de π qui est restée décevante jusqu'à présent. La seule chose démontrée concernant les chiffres de π est que jamais ils ne se répètent périodiquement : sinon, π serait rationnel (rapport de deux entiers), ce qui n'est pas le cas, comme on le sait depuis 1766 grâce à une démonstration du mathématicien Lambert. Rien d'autre n'est connu sur les propriétés des chiffres de π (le fait qu'il soit transcendant, comme l'a montré Lindemann en 1882, ne fournit aucune propriété intéressante de ses chiffres).

Parce qu'elle donne un accès plus immédiat aux chiffres de π que toutes les formules connues jusqu'à présent, la nouvelle formule permettra peut-être de prouver que les chiffres de π sont équitablement répartis (un tel nombre est appelé normal), ce qui a été constaté, mais jamais démontré. Ce serait une avancée remarquable. À défaut, peut-être pourra-t-on trouver des motifs réguliers dans ces chiffres ou une certaine structure, éventuellement complexe, mais différente de celle d'une suite aléatoire. Ce serait formidable, car tous les tests statistiques faits jusqu'à présent sur les chiffres binaires ou décimaux de π n'ont amené que la conclusion qu'ils étaient d'une désespérante banalité.

S. Plouffe juge possible une telle avancée : «Je crois que la preuve que $\log(2)$ ou π sont normaux en base 2 n'est pas loin et je n'écarte pas même une formule directe qui donnerait la n -ième position de $\log(2)$ en binaire en temps linéaire.» D'autres mathématiciens, tels D. Bailey et J. Shallit, croient aussi à une avancée proche sur ces questions bloquées depuis deux siècles.

Des formules analogues à celle trouvée par S. Plouffe ont été découvertes, qui montrent, par exemple, que π^2 , $\pi\sqrt{2}$, $\log(2)$ sont dans la classe de Steven SC_2 . Pour les logarithmes, quelque chose d'étonnant se produit : on a trouvé des formules pour $\log(2)$, $\log(3)$, ..., $\log(22)$, mais pas pour $\log(23)$. Il se peut que, pour une majorité d'entiers, $\log(n)$ soit dans SC_2 . Peut-être même le sont-ils tous, mais cela reste à prouver.

La passion que S. Plouffe éprouve pour π n'est pas nouvelle. En 1975, il avait mémorisé 4 096 décimales de π (le record actuel est de plus de 42 000). Il figurait à ce titre dans le *Livre des records*. Il est amusant de voir que, 20 ans après, il participe à une découverte de premier ordre concernant π .

Pour mémoriser les décimales de π , il raconte qu'il les prenait par groupes

de 100, les écrivait plusieurs fois et réussissait ainsi à les connaître grâce à sa mémoire photographique des chiffres. Pour ne pas oublier les décimales apprises, il s'isolait régulièrement dans le noir pour les réciter. Après son record de 4 096, il réussit à atteindre 4 400, et décida alors de s'arrêter. Cette connivence avec les chiffres rappelle celle d'Euler et de Ramanujan.

LES MATHÉMATIQUES EXPÉRIMENTALES

L'équipe de l'Université Simon Fraser qui a découvert la nouvelle formule pour π participe et anime un groupe de mathématiciens qui préconisent une nouvelle pratique des mathématiques. Pour eux, les mathématiques à la fin du XIX^e siècle sont devenues abstraites parce que tout (ou presque) ce qui pouvait être trouvé «à la main» l'avait été. Ils soutiennent qu'avec les ordinateurs une nouvelle ère de mathématiques concrètes et expérimentales doit se développer.

L'interaction entre un logiciel de calcul numérique ou formel et un mathématicien permet d'explorer des domaines où la longueur et la complexité des manipulations symboliques ne sont plus des obstacles. L'ordinateur assiste le mathématicien en effectuant des tâches fastidieuses comme la dérivation, le calcul de primitives, la factorisation des polynômes, etc. La recherche de mises en correspondance numériques peut être menée à grande échelle, et la démonstration automatisée de formules intermédiaires complexes est confiée à des programmes.

Même si la formule de D. Bailey, P. Borwein et S. Plouffe avait pu être découverte sans ordinateur, elle l'a été avec ! C'est à la suite d'une exploration consciente menée par Simon Plouffe que la formule est apparue, exploration où l'intelligence du mathématicien et le pouvoir de manipulation symbolique extraordinaire des programmes informatiques ont travaillé en symbiose. Une fois la formule trouvée, il fallait la démontrer. Cela aurait pu être fait à la main, mais l'aide d'un programme rendit la tâche plus facile (précisons toutefois que la démonstration trouvée a été vérifiée sans ordinateur).

Aujourd'hui, ces mathématiciens qui préconisent l'utilisation de l'ordinateur pour trouver de nouvelles «vérités» mathématiques poursuivent des travaux qui avaient été plus ou moins abandonnés à cause de la complexité de calculs qu'il n'était pas envisageable de poursuivre à la main. Le grand mathématicien indien Ramanujan, qui avait un don mathématique exceptionnel pour trouver des formules (dont certaines

concernent π), avait réussi à aller un peu plus loin que ses prédécesseurs ; aujourd'hui, grâce aux ordinateurs et aux mathématiciens expérimentateurs, son travail se poursuit.

ORDINATEURS ET VÉRITÉS MATHÉMATIQUES

Ces recherches posent de nouveaux problèmes à la philosophie des mathématiques, car, par exemple, il arrive qu'une formule soit découverte par interaction avec l'ordinateur sans qu'on réussisse à en donner la preuve. Dans un tel cas, les mathématiciens expérimentateurs ne considèrent pas que la formule est vraie : ils acceptent la distinction classique entre *vérité prouvée* et *vérité constatée* (distinction qui n'existe sans doute pas en physique). Leur conception expérimentale des mathématiques ne préconise donc pas d'identifier mathématiques et physique.

L'ordinateur est une aide, mais c'est au mathématicien humain, aujourd'hui encore, de dire si une affirmation mathématique a été prouvée ou non, et cela (1) même lorsque c'est un ordinateur qui a permis de formuler cette affirmation ; (2) même s'il est intervenu de manière essentielle dans l'élaboration de la preuve ; (3) même si, pour des raisons de complexité, on ne peut se passer de calculs ou de raisonnements faits par ordinateur pour mener à terme la démonstration. Aucun des mathématiciens du domaine ne démontrera seul, à la main, le théorème tout nouveau que «le 400 milliardième chiffre binaire de π est un 1», mais c'est eux qui décident de la vérité d'une telle affirmation.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.
e-mail delahaye@lfl.fr

V. ADAMCHIK et S. WAGON, *Pi : a 2000-Year Search Change Direction*, Manuscrit, 1995.

D.H. BAILEY, P.B. BORWEIN et S. PLOUFFE, *On the Rapid Computation of Various Polylogarithmic Constants*, Manuscrit, 1996.

D.H. BAILEY, J.M. BORWEIN, P.B. BORWEIN et S. PLOUFFE, *The Quest for Pi*, Manuscrit, 1996.

S. PLOUFFE, *Sur la n-ième décimale des nombres transcendants ou la 10 milliardième décimale (hex) de π est 9*, Manuscrit de notes pour une conférence, 1996.

I. STEWART, *Les algorithmes compte-gouttes*, in *Pour La Science*, n° 215, septembre 1995.

Pierre Curie

Marie Curie (nouvelle édition augmentée). Éditions Odile Jacob, collection Opus, Paris, 1996.

Voici enfin la réédition du livre essentiel de Marie Curie sur Pierre Curie. Écrit en 1922-1923 et publié alors par les Éditions Payot, il avait été réédité en 1955, mais était resté épuisé pendant de longues années.

Ce livre, illustré par quelques photographies, est important, non seulement pour la biographie de Pierre Curie, mais également pour ce qu'il révèle de la personnalité de Marie Curie et de son activité, qui apparaissent à travers cet ouvrage.

Ce petit recueil contient également une analyse très précise (et compétente !), par leur fille Irène Joliot-Curie, des carnets de laboratoire de Marie et Pierre Curie, de décembre 1897 à 1900 et, pour la première fois, le journal intime inédit (1906-1907) de Marie Curie.

Marie Curie a clairement écrit ce journal intime, qui n'était certainement pas destiné à être publié, pour donner libre cours à son chagrin et à son désespoir après la mort accidentelle de Pierre Curie en avril 1906, et fixer ses derniers souvenirs de l'être cher. Demeurant seule avec leurs deux petites filles, Irène et Ève, et avec l'œuvre scientifique commune en cours, c'est un long cri de détresse, écrit de la manière dont s'exprimaient les écrivains de l'époque. Certains détails sont si personnels que la famille n'avait pas souhaité, jusqu'à présent, en favoriser la communication.

Revenons au texte principal, la biographie de Pierre Curie. Il ne s'agit pas, bien entendu, d'une analyse, par un historien des sciences, de la vie et de l'œuvre du physicien. Sentiments et souvenirs tiennent une place importante. Sa femme – et collègue de travail – décrit les qualités de Pierre. Elle expose, d'une manière vivante et précise, les résultats obtenus par le physicien avant 1897, puis par tous deux à partir de cette date. Elle ne décrit pas en détail les travaux des contemporains, que ce soient Henri Becquerel ou Ernest Rutherford et Frédéric Soddy ; ce n'est pas là son propos. Elle désire nous faire connaître le cheminement de la pensée de Pierre Curie, l'atmosphère familiale qui l'entourait, les années passées ensemble, les conditions – aussi bien les difficultés que les joies – de leur travail en commun, l'importance des résul-

tats obtenus, en notant au passage la reconnaissance bien tardive du grand savant par les autorités académiques. Le lecteur partage leur émotion : « Il nous arrivait de revenir le soir après dîner pour jeter un coup d'œil sur notre domaine. Nos précieux produits pour lesquels nous n'avions pas d'abri étaient disposés sur des tables et sur des planches ; de tous côtés on apercevait leurs silhouettes faiblement lumineuses, et ces lueurs qui semblaient suspendues dans l'obscurité nous étaient une cause toujours nouvelle d'émotion et de ravissement. »

Nous voyons les conditions matérielles très difficiles dans lesquelles Pierre et Marie Curie ont dû évoluer pendant la période couvrant les débuts des travaux de Marie, à la fin de 1897, dans le hangar et l'atelier désaffectés mis à sa disposition par le directeur de l'École de physique et chimie, leur découverte commune du polonium et du radium en 1898, leur travail sur la radioactivité induite en 1899, enfin la détermination du poids ato-

mique du radium en vue de la thèse de doctorat de Marie, soutenue en 1903. Sont relatés aussi l'apport de leurs premiers collaborateurs et l'aide fournie par des industriels comme Armet de Lisle.

A partir du début de l'année 1900, comme l'explique la biographie, les chemins scientifiques de Pierre et de Marie Curie se sont quelque peu séparés. Tandis que Pierre cherchait en particulier à comprendre le phénomène de la radioactivité induite, puis s'intéressait aux applications de la radioactivité, notamment en physiologie et en médecine, tout en consacrant une grande partie de son temps à l'enseignement, Marie réussit, grâce à un effort considérable, dans des conditions physiques extrêmement dures, à isoler l'élément radium à l'état de chlorure d'abord, puis de métal pur, seul moyen à l'époque pour placer le radium dans le tableau périodique des éléments et convaincre les derniers chimistes incrédules. Marie Curie explique aussi comment la publicité résultant de l'heureux



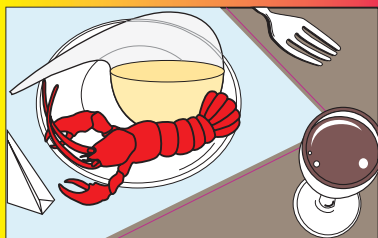
Pierre Curie.

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 28 janvier 1997.

FRANCE

info

événement que constitua pour eux l'attribution du prix Nobel de physique «pésait aussitôt très lourdement sur un homme qui n'y était ni préparé ni habitué». Le récit se termine par l'émotion que provoqua le décès prématuré de Pierre et par quelques témoignages.

Ce livre émouvant se lit d'une traite. Il est particulièrement bien écrit. Tous ceux qui s'intéressent aux personnalités de Pierre et de Marie Curie, ainsi qu'aux débuts de la science de la radioactivité, tiendront à l'avoir dans leur bibliothèque.

Pierre RADVANY

Philosophie

Dieu de l'Univers, Science et foi

Jean-Marie Pelt. Éditions Fayard, 1996.

Sensationnelles découvertes sous le scalpel de J.-M. Pelt : «L'homme possède la capacité de s'élever au-dessus de la condition animale, grâce aux structures spécifiques de son cerveau.» Et le botaniste de disséquer l'organe suspect. Le cerveau gauche produit la Science, le cerveau droit la Poésie. L'Occident tire sur le cerveau gauche, d'où la migraine de notre civilisation. Heureusement, le bon docteur dispose de l'aspirine : traversons le corps calleux et chevauchons le cerveau droit, car pour J.-M. Pelt, le salut vient de l'autre côté, celui des croyances qu'il faut unir dans une «synthèse des religions», fédérées sous la bannière du Christ.

Si nous regrettons la soupe aux légumes qu'il concoctait jadis, rattrapons-nous sur la franche hilarité que nous réserve le sympathique jardinier transformé en spécialiste du cerveau, doublé d'un docteur ès religions. Inspiration subite ou lecture inspirée ? Épluchant une subtile bibliographie, il emprunte une amnésique démarche intellectuelle : disparus, les travaux de Baillarger, von Economo, Brodman et l'école allemande qui démontra l'importance du cortex. Pour J.-M. Pelt, *exit* le cortex. Cela lui vaudra-t-il excommunication ou la charité s'imposera-t-elle ?

L'auteur dresse le bilan de la science : notre civilisation a pratiqué le déicide. Comment s'en sortir ? D'un coup de pioche prosélyte, le voici qui détache une motte d'universalité : «nous choisirons délibérément des références claires puisées aux sources des valeurs du christianisme.» Surgit une lecture de Genèse

néo-romantique valant béatification à son inventeur qui découvre que «Genèse est riche d'enseignements pour qui sait en décrypter le sens caché». Grâce à lui, nous savons que la *Bible*, rédigée en une langue moins profane que le grec, ne saurait végéter dans la foi privée d'intellect. Le ratissage des plates bandes divines se poursuit, et notre herboriste de comparer les religions à des espèces végétales. Le judaïsme serait «un immuable Ginkgo Biloba». L'islam, une «jacinthe d'eau, reine des envahisseuses». Tandis que le «christianisme s'est imposé par la non-violence, à la manière des noix de coco»... Le judaïsme, figé, alors que le Talmud exige l'adaptation au présent ? L'islam, une fleur envahissante ? Mais de quel délicieux nectar la symbiose judéo-arabe parfuma-t-elle l'Espagne jadis éclairée des lumières d'Orient ! Ce miracle prit fin lorsque le «pacifique cocotier chrétien» inventa l'Inquisition.

Pour les idées – quand elles sont justes –, l'œil de notre auteur s'égare sur deux livres de chevet : *La Synthèse des sciences* (éditions Olivier Orban) et *La Face cachée du Cerveau*, de D. Aubier, (éditions Sévèyrat 1989, Dervy 1992). Cependant il arrive que J.-M. Pelt ait une réflexion personnelle : le «message biologique» certifierait que les religions soient mortelles et, pour retarder leur extinction, le retour aux textes fondateurs s'imposerait. Ignore-t-il le *Traité de botanique*, sous la direction de P.-P. Grassé (éditions Masson 1963, page 449) ? «À la fin d'une espèce, il survient un appel au type ancestral. Mais quand un caractère évolue dans un sens déterminé, il continue toujours d'évoluer dans le même sens ; il ne revient jamais réellement au type antérieur.» Comment le retour aux modalités anciennes pourrait-il constituer un projet civilisateur, si la loi évolutive prévoit la «surévolution» et «interdit l'impasse des expressivités périmées» ? L'humanité, conditionnée par le projet dont elle est porteuse, la conscience poussant à son élucidation, vivrait tout attardement de la pensée dans des reliquaires en crime contre l'esprit. C'est la douleur même de l'intégrisme.

J.-M. Pelt invite les représentants des cultes à «une déclaration universelle qui exprimerait le tronc commun de valeurs». Comment les religions rédigeraient-elles ce «texte clair», si «le vocabulaire religieux est chimiquement incompatible avec la modernité» ? J.-M. Pelt désire concilier la diversité des croyances, dégager le «code universel fondateur des rites». Annonçons-lui la bonne nouvelle : ce travail est déjà fait dans le livre même qu'il cache sous l'oreiller : *La face cachée du cerveau*. Il n'y est pas question de foi.

mais de la redoutable précision de l'esprit. Le motif unique, d'origine systémique, à la base des rites et traditions est connu depuis 1989. Secret de Polichinelle ! Et c'est, hélas pour J.-M. Pelt, précisément sur le modèle d'une structure *corticale* qu'ont été conçus les mythes fondateurs.

Dominique BLUMENSTILH-ROTH

Astronomie

Voyage dans le Système solaire

Serge Brunier. Éditions Bordas, 1996.

Le livre de Serge Brunier, *Voyage dans le Système solaire*, porte bien son nom. À l'image des sondes spatiales *Voyager*, qui explorèrent successivement les planètes géantes, de Jupiter à Neptune, l'auteur nous invite à un voyage qui nous fait découvrir, du Soleil jusqu'aux confins du Système solaire, les différents mondes qui le peuplent.

À partir d'une riche iconographie, largement empruntée à la documentation obtenue par les sondes spatiales, dans un langage simple et clair directement accessible à tous ses lecteurs, S. Brunier nous propose une description précise et bien documentée des planètes, satellites, astéroïdes et comètes rencontrés au cours de notre périple. Cette méthode pédagogique a le mérite de mettre en évidence à la fois l'unicité et la diversité des objets du Système solaire : plus notre connaissance de ces objets s'affine, plus leurs différences apparaissent au sein d'une même classe. Que l'on songe seulement aux évolutions radicalement différentes subies par les planètes telluriques Vénus, Mars et la Terre, pourtant parties de conditions initiales relativement proches, au cours de leur histoire... Le voyage auquel l'auteur nous invite dans le Système solaire lui permet ainsi de replacer la Terre dans son contexte astronomique et de tracer une évolution comparative des planètes telluriques, thème d'étude particulièrement cher aux planétologues d'aujourd'hui.

Le livre a l'immense mérite d'apporter une information exacte, simple et claire, qui tient compte des découvertes les plus récentes. Cette information est plus descriptive qu'explicative : l'auteur a pris le parti de nous montrer les astres du Système solaire tels que nous les connaissons actuellement. Il ne cherche pas à retracer comment notre connaissance du

Système solaire s'est peu à peu forgée, et ne s'attarde pas toujours à apporter l'explication physique des phénomènes qu'il décrit. Il préfère emmener son lecteur en voyage et le fascine en déroulant sous ses yeux une succession d'images plus étonnantes les unes que les autres, appuyées par un texte précis. À ce titre, ce livre est une excellente introduction pour les néophytes, mais il plaira aussi au public plus averti, soucieux de faire le point. Les lecteurs curieux ne manqueront pas, grâce à la bibliographie présentée à la fin du livre, d'aller chercher dans d'autres ouvrages les réponses à leurs questions.

La sortie d'une nouvelle édition de ce livre initialement paru en 1993 illustre la vitesse à laquelle notre connaissance du Système solaire évolue, au rythme des missions spatiales et des développements techniques de l'astronomie au sol. Qu'avons-nous appris depuis 1993 ? Du côté de la mécanique céleste, nous avons eu la chance d'assister en direct à un événement rarissime, la collision d'une comète, Shoemaker-Levy 9, avec la planète Jupiter ; ce phénomène remarquable a fait l'objet d'une immense campagne d'observation, à partir du sol et de l'espace. Plus récemment, la nature nous a offert la venue de deux comètes exceptionnellement brillantes, Hyakutake et Hale-Bopp. Du côté des missions spatiales, la sonde *Magellan* a achevé la cartographie radar de la surface de Vénus ; la sonde *Clementine* a photographié celle de la Lune ; la sonde *Ulysses* a poursuivi, au cours de son voyage hors de l'écliptique, l'étude de la magnétosphère solaire ; la sonde *Galileo*, après avoir survolé deux astéroïdes et découvert un satellite autour de l'un d'entre eux, est enfin arrivée auprès de Jupiter et a largué une sonde dans son atmosphère ; le télescope spatial *Hubble* nous a offert des images planétaires d'une qualité inégalée. Du côté de l'astronomie au sol, la mise au point des récepteurs de plus en plus sensibles, installés sur des télescopes de plus en plus grands, a reculé les limites de détectabilité des objets les plus faibles. Il en est ressorti la découverte d'une nouvelle classe d'objets, évoqués par S. Brunier à la fin de son ouvrage : les objets de la ceinture de Kuiper, ou objets transneptuniens, dont l'existence était depuis longtemps soupçonnée.

Autre progrès notable lié aux évolutions des techniques d'astrométrie : la découverte de planètes autour d'un nombre croissant d'étoiles de type solaire. Il est probable que les années qui viennent verront la découverte de nombreux autres objets. Le débat est donc relancé : sommes-nous seuls dans l'Univers ? En bon scientifique, S. Brunier se garde d'ap-

ARCHIMEDE

Le magazine scientifique d'ARTE



AU MOIS DE JANVIER :

Mardi 7 janvier à 20 h :

La force de la pensée.

La recherche de soi.

Portrait : Gert Tiethmuller.

Mardi 14 janvier à 20 h :

Les bulles des dauphins.

Expériences

avec des stalactites.

Les évolutions du calendrier.

De nouveaux éléments

chimiques.

Le mètre étalon.

Mardi 21 janvier à 20 h :

La dynamique d'une flamme.

Les forces de Van der Waals.

La photocopie.

Le mythe de la surpopulation.

Stalactites et climat.

Mardi 28 janvier à 20 h :

Les magiciens préhistoriques.

Le chamanisme aujourd'hui.

Nos ancêtres néandertaliens.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)
<http://www.arte-tv.com>

arte

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Bettina Debû, Paul Decaix, François Fantin, Jean-François Fauvarque, Olivier Giraud, Arnaud de Guerra, Jules Hoffmann, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Lazar, Marie-France Le Heuzey, Marc Leparoux, Claude Olivier, Guy Paulus, Isabelle Saillot, Christophe Salomon, Monique Touzin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degutus.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

Tél. (1) 46 34 21 42.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

porter une réponse, mais la question est posée. Et le débat vient de connaître un regain de vitalité avec la découverte, sur une météorite d'origine martienne, de structures pouvant peut-être s'interpréter comme des traces de vie fossile. La vie serait-elle apparue sur Mars, pendant la courte période de son histoire où la planète disposait d'eau liquide et d'une température propice ?

On le voit, le Système solaire n'a pas fini de nous surprendre ni de nous fasciner. Le livre de S. Brunier est une merveilleuse introduction pour le profane, et un ouvrage de grande qualité, scientifique, pédagogique et artistique, pour tous les lecteurs, initiés ou non. Un ouvrage idéal pour nous faire rêver sur ces mondes qui nous entourent, familiers ou étrangers, proches comme la Lune ou lointains comme Pluton.

Thérèse ENCRENAZ

Histoire

Calendriers et chronologie

J.-P. Parisot et F. Suagher. Éditions Masson, 1996.

S'il existe un domaine, aux frontières de l'astronomie et de l'histoire, où le manque de littérature se fait cruellement sentir, c'est bien celui des calendriers. Ce rectangle de carton que l'on achète tous les ans est le résultat de plus de 2 000 ans d'évolution scientifique, de crises politiques, religieuses et sociales. On peut affirmer que, globalement, l'origine de notre calendrier est le résultat d'une lutte contre la corruption, celle des pontifes romains qui allongeaient ou raccourcissaient la durée de l'année pour favoriser telle ou telle magistrature. Autrement dit, la gestion sociale du temps était devenue, chez les Romains, un pilier de la société, dont le caractère astronomique (maintenir le début des saisons sensiblement à la même date) n'était que très secondaire. Jules César, assisté d'un astronome, réforma donc le système en 46-45 avant notre ère, ce qui engendra le calendrier julien et ses années bissextiles.

Comme dans bien d'autres domaines, les petites causes produisent à long terme de grands effets ; le calendrier julien n'échappe pas à cette règle. La longueur de l'année adoptée par César était en avance de 11 minutes environ sur l'année des saisons, ou année tropique. De sorte qu'au cours des siècles, les dates

de début de saison dérivèrent lentement, tombant, au XVI^e siècle, dix jours plus tôt que ce qui leur avait été assigné. Ainsi, lors du concile de Trente, l'équinoxe de printemps tombait vers le 10-11 mars au lieu du 21. Or l'émergence du christianisme, au IV^e siècle, s'est accompagnée de la mise en correspondance de fêtes mobiles comme Pâques et de phénomènes astronomiques. Il était donc inacceptable que le calendrier continue de dériver indéfiniment, ce qui donna lieu à la deuxième grande réforme du calendrier, celle du pape Grégoire XIII et de sa commission d'astronomes. La réforme consista à supprimer dix jours dans l'histoire et trois années bissextiles en quatre siècles, afin de maintenir les dates des saisons en conformité avec le ciel.

Toutefois, cette histoire ne concerne que l'Occident : les Musulmans, les Juifs, les Chinois, les Hindous, les Papous, les Esquimaux, etc. usent certes de notre calendrier dans leurs relations internationales, mais possèdent leur propre calendrier civil ou religieux, qui a sa propre histoire. De plus, tous les calendriers n'utilisent pas le Soleil pour décompter le temps. Il est ainsi facile de constater, par exemple, que chaque année, le mois de Ramadan ne tombe jamais à la même date : cela est dû au caractère lunaire du calendrier musulman, qui compte 354 jours en moyenne.

Non seulement chaque peuple a son calendrier, mais aussi sa chronologie. Si, là encore, l'ère chrétienne est utilisée dans les relations internationales, les Musulmans comptent les années depuis l'Hégire (ils sont actuellement en 1417), les Juifs depuis la Fondation du Monde (ils sont en 5757).

Calendriers et chronologie traite de tous ces problèmes et constitue une excellente synthèse qui remplacera avantageusement les ouvrages un peu vieillissés que l'on trouve encore dans le commerce. On appréciera le chapitre introductif sur les notions d'astronomie ainsi que le traitement de calendriers historiques (mayas, grecs, gaulois, républicains...).

Les auteurs l'avouent, ils ne sont pas historiens, et l'on regrettera que certains points ne soient pas actualisés et d'autres (comme la chronologie) partiellement abordés. Car la recherche sur les calendriers – sujet qui lie intimement astronomie et histoire des sciences – n'est pas figée ; depuis une quinzaine d'années, par exemple, nos connaissances sur le calendrier pré-julien ou sur la chronologie de l'antiquité tardive ont notablement progressé. Néanmoins, cet ouvrage fait une synthèse presque exhaustive du sujet et constitue une très bonne introduction.

Denis SAVOIE