

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Février 1998

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Un dinosaure
attaque

La vie sur Mars
en question

Le syndrome
de Williams

Les agrégats
métalliques

Le béton

Les plus hautes
constructions

Les ponts à suspension

Construire des gratte-ciel?

Canada \$8,75

Dossier génie civil

BLOC-NOTES de Didier Nordon



JEU-CONCOURS

Antimagie

par Pierre Tougne

TRIBUNE DES LECTEURS



POINT DE VUE

La castration chimique

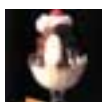
par Philippe Bouchard



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Glace et glaciers

par Jean Martin



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le lait solide

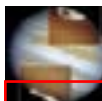
par Hervé This



SCIENCE ET FINANCE

Espérance morale et bijoux de famille

par Christian Walter



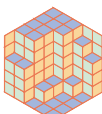
PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Le virus de Hong Kong ■ La vie en accéléré

■ Dent de fer ■ Allergie au latex

■ Brevets en 1996 ■ Turbulence nouvelle ■ Rétrovirus, diabète et sclérose en plaques ■ Aurores joviennes

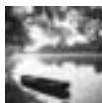
■ Chocs cuivrés ■ Le menu de l'ours ■ Une anomalie génétique du cortex ■ Téléportation quantique



LOGIQUE ET CALCUL

Les preuves sans mots

par Jean-Paul Delahaye



L'EXPÉRIENCE DU MOIS

Bateau à savon

par Martin Shanahan



L'IMAGE DU MOIS

Traînées de navires

par Olivier Boucher



ANALYSES DE LIVRES

■ La Bible : le code secret, de Michael Drosnin

■ Jean Perrin, savant et homme politique,

de Micheline Charpentier-Morize

■ Le jardin du futur, de Philippe Ledieu et Michel Vilain

■ Qoumrân et les manuscrits de la mer Morte.

Un cinquantenaire, ouvrage collectif sous la direction d'Ernest-Marie Laperrousaz

■ Le Soleil en face, de Pierre Lantos

Dossier génie civil

Ce dossier présente quelques-unes des réalisations les plus grandioses du génie civil moderne. L'Asie, dans son développement économique échevelé, a battu des records. En Chine, le colossal barrage des Trois Gorges, sur le fleuve Bleu, rivalise avec d'autres réalisations gigantesques, en Malaisie, au Japon et à Hong Kong. Leurs dimensions inégalées mettent à l'épreuve les producteurs de matériaux comme les cabinets d'ingénieurs. L'imagination reste souveraine, aidée par des limites techniques sans cesse dépassées.

Le béton, matériau moderne

par Bernard Clavaud, François Saucier et Laurent Barcelo

Les bétons modernes sont beaucoup plus résistants que leurs précurseurs antiques, parce que l'on comprend mieux les réactions chimiques qui régissent leur comportement.

Le plus long pont suspendu

par Satoshi Kashima et Makoto Kitagawa

Le pont Akashi-Kaikyo est le plus long pont suspendu jamais construit ; il a pourtant résisté à un séisme, alors qu'il était encore en construction.

Les plus hautes tours du monde

par Cesar Pelli, Charles Thornton et Leonard Joseph

Les tours jumelles Petronas, construites à Kuala Lumpur, en Malaisie, sont un symbole culturel et économique.

Un nouvel accès à la Chine

par John Kosowatz

En Chine, le plus grand projet de génie civil au monde comprend un aéroport, deux très grands ponts et deux tunnels sous-marins, sous le port Victoria.

Les gratte-ciel sont-ils encore nécessaires?

par William Mitchell

Les tours et les gratte-ciel étaient adaptés à l'organisation du travail du XX^e siècle. À l'époque des réseaux de communication numériques, ils semblent obsolètes. Reste leur fonction symbolique.

L'attaque d'un dinosaure

72

par David Thomas
et James Farlow

Un sculpteur et un paléontologue se sont associés pour reconstruire un combat vieux de 100 millions d'années.

**Le syndrome de Williams**

78

par Howard Lenhoff,
Paul Wang, Frank Greenberg
et Ursula Bellugi

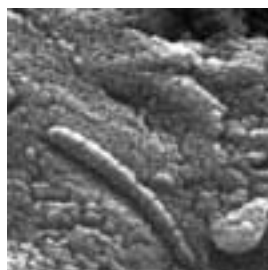
Pour mieux comprendre l'organisation du cerveau, les neurologues s'intéressent à une maladie rare.

**Des fossiles venus de Mars?**

84

par Everett Gibson,
David McKay,
Kathie Thomas-Keppta
et Christopher Romanek

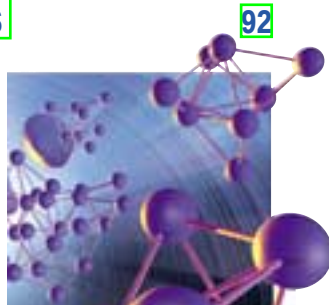
Une météorite découverte en Antarctique renfermerait des indices de l'existence passée d'une vie microbienne sur Mars.

**Agrégats métalliques et nombres magiques**

92

par Matthias Brack

L'observation de minuscules agrégats métalliques révèle pourquoi les solides réagissent différemment des atomes qui les composent.

**Votation sur la génétique**

Admirable démocratie. Les citoyens helvétiques peuvent décider, le 8 juin 1998, de frapper d'interdit toute création d'organismes génétiquement modifiés, qu'il s'agisse de recherches ou de commercialisation, que les transformations génétiques portent sur les animaux ou les végétaux, sur les mouches drosophiles, les souris, et les vermisseaux, ou sur les plantes transgéniques, dont le maïs, qui a défrayé la chronique.

Récurrente inquiétude. L'avenir des découvertes est incertain... Les scientifiques, pensent les inquiets, libéreraient des forces dont ils ne mesureraient ni la puissance ni les possibilités néfastes. Depuis que l'homme a cueilli le fruit de l'arbre de la connaissance, il aménage les lois naturelles en fonction de sa conscience du bien et du mal. Depuis le Néolithique, agriculteurs et éleveurs modifient l'environnement végétal et sélectionnent les meilleures espèces pour leur consommation et leur bien-être. Les «manipulations» génétiques ne sont qu'un prolongement de cette volonté d'alléger le fardeau qui pèse sur l'existence, d'améliorer l'alimentation et le confort, de lutter contre les maladies et de repousser l'échéance finale.

Graves conséquences. L'impact sur les progrès de la médecine de l'interdiction des transformations génétiques a-t-il été correctement évalué? De plus, l'activité des chercheurs doit-elle et peut-elle être surveillée, sans que cette inquisition soit dégradante?

Cette votation suscite un malaise qui n'est pas l'apanage de la Confédération helvétique : la population des pays riches se méfie-t-elle de ses scientifiques? La crainte du futur est plus forte chez les individus qui pensent avoir plus à perdre.

Il ne serait pas étonnant que les tenants de l'interdiction, qui condamnent la pratique des recherches sur les gènes responsables des maladies génétiques (voir *Le syndrome de Williams*, page 78), soient les mêmes personnes qui versent leur obole au Généthon ; il ne serait pas surprenant que les adversaires des améliorations génétiques des céréales versent leur obole pour lutter contre la faim.

La nature n'a pas fait que les pissenlits soient stériles, que la peau soit repoussante pour les insectes, que les transformations de l'ADN soient sans conséquences sur la santé, que les plantes soient lumineuses et éclairent nos jardins. L'état du monde est-il suffisamment bon pour que la recherche de son amélioration soit trop risquée?

Philippe BOULANGER

Savoir-vivre mortifère

Si vous broyez du noir, lisez donc *Mourir aujourd'hui*, petit livre collectif consacré aux nouveaux rites funéraires (éd. Odile Jacob, 1997) : il est bourré de facéties. Involontaires, bien sûr. Sur tout autre sujet, elles passeraient inaperçues. Mais il s'agit de la mort, et la mort ne souffre pas la médiocrité... Voici quelques échantillons, parmi bien d'autres.

«On prend conscience de l'importance accordée par notre société à la question vitale (*sic*) du droit aux obsèques pour tous» (p. 58). Un autre maladroit écrit, (p. 226) : «Aujourd'hui, on n'a plus peur de la mort.» Ne vous réjouissez pas trop vite. Cela ne signifie pas qu'on a cessé de craindre la mort (plût au Ciel...), mais qu'elle n'est plus un sujet tabou – affirmation qui, d'ailleurs, reste à prouver. «D'une manière générale, l'image des professionnels du funéraire dans l'opinion n'est pas bonne», écrit un de ces professionnels (p. 21). Cette animosité l'étonne et le navre : «Cette réalité n'est pas une fatalité», affirme-t-il, affichant l'optimisme de bon aloi propre aux cadres dynamiques. Citons une dernière perle, car l'abus est dangereux pour la santé. Il s'agit d'un jeu de mots qui vraiment n'était pas gagné d'avance, mais qui est brillamment réussi (p. 60). L'auteur de cette page constate que les professionnels du funéraire s'expriment peu : «Le funéraire est une profession tue», écrit-il.

Ecce homo

Lorsque Gustave Flaubert était enfant et qu'un adulte, importuné, lui lançait : «Va donc voir ailleurs si j'y suis», il y allait, le petit Gustave. C'est du moins ce qu'on raconte. Était-il plus bête que la moyenne? Peut-être pas. Que font les hommes modernes, curieux de la possible existence d'extraterrestres, lorsqu'ils envoient des missiles explorer l'Univers, sinon aller voir ailleurs s'ils y sont?

Et pi quoi encore?

Les cinquante milliards de décimales de π que l'informaticien japonais Kanada a calculées exigeraient, pour être couchées sur papier, cinquante mille forts ouvrages. Or une bonne bibliothèque d'un gros laboratoire universitaire ne possède pas plus de vingt ou trente mille ouvrages. Je doute que ce tirage sur papier ait été fait. Autrement dit, lorsque la presse annonce que nous «connaissons» cinquante milliards de décimales de π , il faut comprendre que, quelque part, un disque dur (très dur, même!) a enregistré ces décimales, et qu'on peut l'interroger. Je ne sais si pareille «connaissance» de π fournit un exemple de «réalité virtuelle», mais elle a quelque chose de résolument moderne.

Déjà le bon vieux livre est troublant : lire une page ne peut se faire qu'à condition

que toutes les autres soient cachées. Pour comprendre la page ouverte, je dois me contenter du vague souvenir qu'en laissent les précédentes. En général, cela suffit. Mais une page de décimales de π , je ne puis la comprendre (pauvre chercheur!) que si j'ai parfaitement en tête toutes les pages précédentes, vu que le problème est de rechercher d'éventuelles régularités, lesquelles sont subtiles à déceler.

Travail innommable

Presque personne ne sait plus ce qu'est un bénédictin ni en quoi consistent ses travaux. Mais l'expression «travail de bénédictin» demeure, pour décrire l'exploit de quelqu'un qui s'est astreint à «enfiler une infinité de perles» (suivant le mot de Jules Renard). Un jour, personne ne saura plus ce qu'étaient les ordinateurs. Mais une expression subsistera certainement : «C'est un véritable travail d'informaticien que vous avez accompli là.» Quant au sens que les gens lui donneront, incapable de l'imaginer, je suis ouvert aux suggestions.

Le théâtre des variétés

Dans ses souvenirs, *Un mathématicien aux prises avec le siècle* (éd. Odile Jacob, 1997), Laurent Schwartz ironise sur le manque de rigueur de ses professeurs. Pour les caricaturer, il dit qu'ils s'exprimaient ainsi : «La notion de variété est difficile à définir. Soit V une variété...» Et Schwartz d'ajouter – sur le ton péremptoire d'un ancien membre éminent du groupe Bourbaki : «Après Bourbaki, ces déficiences disparaissent radicalement.»

Or nous ne sommes plus «après Bourbaki» : nous sommes dans l'après-bourbakisme. Nuance! Lisons ce qu'écrit W. Thurston, mathématicien aussi éminent que Schwartz, mais trente ans plus jeune : «Dans les deux premiers chapitres, les variétés sont abordées de façon intuitive, bien que les définitions formelles et les propriétés de base soient présentées seulement dans le chapitre trois.» (*Three-Dimensional Geometry and Topology*, Princeton University Press, 1997).

En mathématiques comme partout, chaque génération reproche ses partis pris à la précédente, et y substitue les siens. Remarque intéressante, mais elle ne nous dit pas toujours pas ce qu'est une variété...

Rhétorique et géométrie

Dans son cours *Géométrie élémentaire* (Hermann, 1997), André Gramain explique pourquoi la parabole, l'hyperbole et l'ellipse s'appellent ainsi. Ces courbes sont le sujet d'un traité d'Apollonius (III^e siècle avant J.-C.). En l'absence de formalisme algébrique, les équations sont décrites par une représentation géométrique. Un produit $a.b$ est la surface du rectangle de côtés a et b . Une équation entre termes du second degré est une égalité entre sommes d'aires de rectangles.

La construction d'un point (x, y) de la parabole d'équation $y^2 = 2p.x$ est équivalente à la construction d'un rectangle dont l'un des côtés est égal à $2p$, dont l'autre côté est l'inconnue x et dont la surface est égale au carré y^2 . La dénomination de parabole vient du nom grec de cette construction : $\pi\alpha\rho\alpha\beta\omicron\lambda\eta$ signifie comparaison.

Pour l'hyperbole d'équation $y^2 = x.(2p + p.x/a)$, il s'agit de la construction d'un rectangle d'aire y^2 , dont les côtés sont l'inconnue x et une longueur z plus grande que $2p$ ($z = 2p + p.x/a$), de sorte que la différence entre ce rectangle $z.x$ et le rectangle $2p.x$ soit un rectangle $(p/a).x.x$ semblable au rectangle donné $p.a$. Le nom d'hyperbole signifie excès. L'ellipse d'équation $y^2 = x.(2p - p.x/a)$, est une application avec défaut. Les solutions de ces problèmes sont dans le livre VI des *Éléments* d'Euclide.

Ainsi, il y a une image commune à cet étonnant double sens des mots parabole, hyperbole, ellipse (à la fois termes de géométrie et figures de style). Mais il faut, pour comprendre, un minimum de mathématiques. C'est pour cela que les dictionnaires étymologiques sont peu explicites sur la question. Misère de la spécialisation...

SCIENTIFIC WORD®

NOUVEAU

Version 3.0

Traitement de texte scientifique

Accès direct aux symboles mathématiques

Gestion automatique de la mise en page

Un traitement de texte complet basé sur LaTeX

Interface conviviale à LaTeX

Un LaTeX portable

Impression de qualité professionnelle

Importation de tous les formats graphiques

Version 3.0 pour Windows 95/NT4

Version 2.5 pour Mac OS

SCIENTIFIC WORKPLACE®

NOUVEAU

Version 3.0

Traitement de texte scientifique et calcul mathématique

Inclut Scientific Word 3.0

Inclut le noyau de calcul Maple R4

Accès direct à Internet

Tracé de fonctions numériques ou symboliques en 2D et 3D

Calcul symbolique et numérique interactifs sur des équations intégrées dans du texte

Version 3.0 pour Windows 95/NT4

Version 2.5 pour Mac OS

Livre d'apprentissage en Français



149 FF TTC

L'essentiel de Scientific Word pour Windows

Ed. Global Design/Ritme Informatique
ISBN 2-911502-02-7 - 110 pages

Ritme Informatique

34 Boulevard Haussmann
75009 Paris - FRANCE

Tél. : 01 42 46 00 42

Fax : 01 42 46 00 33

info@ritme.com

http://www.ritme.com



JEU-CONCOURS N° 44

PIERRE TOUGNE

Antimagie

On appelle carré magique d'ordre n , un tableau carré de côté n contenant les entiers de 1 jusqu'à n^2 , de telle sorte que les sommes des lignes, colonnes et des deux diagonales soient égales comme celui d'ordre 3 de la figure 1. Si, de plus, les sommes des diagonales «brisées» (en considérant que les côtés opposés du carré se rejoignent) ont la même valeur que les diagonales, le carré est dit panmagique. Ces carrés ont été étudiés depuis très longtemps et il existe de nombreuses méthodes pour les construire. La permutation de deux nombres détruit l'égalité de ces sommes et il peut sembler facile d'introduire du «désordre».

Cependant introduire un «désordre maximal», au sens où toutes ces sommes sont différentes, est beaucoup plus délicat. On appellera carré antimagique et panantimagique de tels carrés comme le carré antimagique d'ordre 3 de la figure 2. Comme la panmagie, la panantimagie n'est pas réalisable à l'ordre 3, mais le devient pour l'ordre 4 et 5. Sauriez-vous construire des carrés panantimagiques d'ordre 4 et 5?

4	3	8
9	5	1
2	7	6

Figure 1

1	2	3
8	9	4
7	6	5

Figure 2

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 février 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 42

Désignons par A le premier joueur et B le second. Examinons la stratégie du «singe» qui consiste pour le joueur B à jouer systématiquement comme A . Chaque joueur retirant le même nombre d'allumettes, après chaque tour (un coup de A et un coup de B), le nombre d'allumettes restantes du tas ne peut que diminuer tout en restant impair. Dès lors, cette stratégie ne sera possible que jusqu'à ce que le nombre d'allumettes restantes soit 1 ou 3. Si k désigne le nombre d'allumettes prises par chaque adversaire, le nombre d'allumettes du tas de départ sera $2k + 1$ ou $2k + 3$. Si le tas de départ avait $N = 4m + 3$ allumettes et qu'il ne reste qu'une allumette, l'égalité $2k + 1 = 4m + 3$ entraîne que $k = 2m + 1$ impair et B gagne, car A , forcé de prendre l'allumette, en aura un nombre pair.

De même, dans le cas où il reste trois allumettes, l'égalité $2k + 3 = 4m + 3$ entraîne $k = 2m$ pair et B gagne encore, car si A prend deux allumettes, B prend la dernière et s'il n'en prend qu'une, B l'imite, le forçant ainsi à prendre la dernière. En revanche, si $N = 4m + 1$, A gagne toujours en commençant par prendre deux allumettes auquel cas le tas est ramené à $4(m - 1) + 3$ allumettes et A étant en position de deuxième joueur adopte la stratégie du singe. En particulier, 19 est une position gagnante pour B , car $19 = 4 \times 4 + 3$.

Ce jeu est un cas très simple d'une classe de jeux appelés jeux de Nim, pour lesquels il existe une méthode générale d'analyse que le lecteur curieux trouvera dans le livre *Les jeux de Nim* de Jacques Bouteloup, édité par l'A.D.C.S. (BP 222, 80002 Amiens Cedex 1).

Diversité sous-marine

L'article *Vers des mers* (voir *Pour la Science*, octobre 1997) affirme que «le fond des mers serait peuplé de plus de dix millions d'espèces animales». Sur quelle base ce calcul repose-t-il ?

C. MAQUIN, Auvers-sur-Oise

Réponse de Myriam Sibuet, de l'IFREMER

Récemment des biologistes ont démontré que le nombre d'espèces différentes rencontrées augmente proportionnellement à la distance parcourue, le long d'une ligne de 176 kilomètres de long à 2 100 mètres de profondeur. Ceci leur conduit à supposer qu'en domaine sédimentaire profond, la macrofaune est composée de dix millions d'espèces, la plupart nouvelles pour la science. La même méthode étendue aux nématodes donnerait une estimation de l'ordre de 100 millions d'espèces.

Sylviculture très contestée

Georges Touzet, ancien directeur de l'Office national des forêts, exprime-t-il les appréciations des politiques forestières officielles en France (voir *La sylviculture contestée*, *Pour la Science*, juillet 1997) ? Si tel était le cas, on pourrait craindre que les efforts de préservation des forêts d'Europe soient gravement menacés. Il exprime en effet des idées choquantes d'un point de vue scientifique : les forêts naturelles n'existent plus ; elles n'ont d'ailleurs jamais existé car, sans l'homme, la forêt se dégrade irréversiblement ; la forêt a besoin de l'homme pour se régénérer, les réserves biologiques étant remplies de bois mort qui prouve leur mort imminente (elles sont donc une perte financière pour l'État).

C'est oublier que les forêts tempérées sont issues de processus biologiques longs et complexes. Elles se sont constituées dès la fin du Pliocène, il y a deux millions d'années. Éliminées périodiquement (au moins 12 fois) par les glaciations, elles se sont toujours reconstituées à partir de zones refuges.

À la fin de la dernière glaciation, il y a environ 10 000 ans, les forêts tempérées d'Europe ont pris une extension considérable. L'homme les a progressivement détruites, dès le Néolithique. Les forêts résiduelles ont été soumises à des pressions d'exploitation très différentes depuis cette époque. Peut-être certains usages de la forêt ont-ils altéré suffisamment les processus naturels

pour bloquer la régénération mais, laissée à elle-même, la forêt peut le plus souvent reprendre le dessus. Nul besoin de forestier.

Il existe encore en France et en Europe des lambeaux appauvris de notre sylvie primitive, qui sont d'une grande beauté et qui méritent non seulement d'être protégés, mais aussi d'être élargis de plusieurs centaines d'hectares, afin que les générations futures bénéficient de milieux revenus spontanément, comme après la dernière glaciation. Ces forêts, outre leur intérêt scientifique, ont un intérêt éthique : elles sont des sujets de droit sur notre planète. Il est fort dommage que la pérennité des forêts subnaturelles françaises soient sous la dépendance d'institutions à la fois juge et partie.

Annik SCHNITZLER et Didier CARBIENER, France-Nature-Environnement

Réponse de Georges Touzet

Bien entendu, je ne suis nullement habilité à «exprimer les appréciations des politiques forestières officielles en France». Toutefois, j'ai rappelé une évidence constatée par tous les spécialistes de la forêt : il n'y a plus de forêt en France qui n'ait pas subi l'influence de l'homme. En revanche, je n'ai pas écrit que les forêts naturelles n'ont jamais existé.

Que connaissons-nous des forêts du Pliocène et de l'Holocène ? La paléontologie et la palynologie nous donnent des indications sur la présence des espèces, mais non sur la composition et la structure des massifs forestiers. De même, si des lambeaux de forêt peu soumis à l'action de l'homme méritent d'être conservés, il me paraît pour le moins hasardeux de parler de leur esthétique, de leur intérêt éthique, ou d'affirmer que les forêts sont des «sujets de droit». On en arrive au stade où l'écologie devient un danger pour la forêt.

Plus sérieusement, rappelons que la «forêt vierge» est une forêt où l'homme n'est jamais intervenu. Il n'y en a plus en Europe : il ne reste que quelques massifs qui ont été plus ou moins complètement soustraits à l'influence de l'homme depuis deux ou trois siècles au maximum. Souvent, ces massifs dits «naturels» se trouvent dans des situations écologiques spéciales ; l'intervention humaine, la chasse en particulier, n'a jamais été complètement nulle. Leur intérêt esthétique ne m'a jamais frappé, même si leur intérêt scientifique est réel.

Quant aux réserves naturelles, elles permettront de voir si, et dans quels cas, on retrouve un couvert forestier complet au terme d'une évolution de plusieurs siècles. Pour le moment on est, dans les plus anciennes, à un stade aussi peu satisfaisant pour l'esthétique

que pour l'intérêt du promeneur. et l'on sait que dans certains cas, la dégradation est irréversible, par exemple sur les sols très superficiels. Ainsi, la sapinière pyrénéenne évolue-t-elle naturellement vers une lande à buis.

Prévention sismique

Un séisme important, bien modélisé et meurtrier est attendu dans une zone précise de la côte chilienne d'ici dix ans (voir *La préparation d'un grand séisme*, *Pour la Science*, décembre 1997), sans qu'il soit possible d'en prévoir la date exacte. Ne pourrait-on provoquer préventivement, à un moment assez précis, ce cataclysme inévitable ? De même qu'on déclenche parfois préventivement en montagne une avalanche. On pourrait ainsi mettre à l'abri les populations, même nombreuses, ainsi que la plupart des biens menacés.

Pierre de MARNEFFE, Embourg

Réponse d'Armando Cisternas

Depuis longtemps les sismologues ont discuté la possibilité de déclencher les séismes de façon contrôlée. Des espoirs sont apparus, en particulier avec deux observations. La première est celle de sismicité induite après le remplissage de barrages, avec une hauteur d'eau supérieure à 100 mètres : la pression d'eau dans les pores des roches aide à ouvrir les fissures. On a aussi observé une activation de la sismicité après l'explosion de bombes nucléaires.

Ces deux procédures néanmoins ne sont pas bien maîtrisées, et il est difficile d'en connaître à l'avance le résultat. De plus, l'énergie mise en jeu est faible, et l'on ne peut considérer ces interventions que comme des perturbations destinées à déclencher un grand séisme. Par exemple, le séisme attendu au Nord Chili affectera une surface de 200 kilomètres par 450 kilomètres. Il faudrait savoir où une intervention aurait plus de chances de déclencher le séisme, en considérant aussi que la surface de rupture est à 50 kilomètres de profondeur. L'injection de fluides ou les explosions, nucléaires ou chimiques, pour déclencher des séismes contrôlés restent donc du domaine de la prospective.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courriel électronique : 101641.3525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>



La castration chimique

PHILIPPE BOUCHARD

On ne sait pas bloquer efficacement le comportement sexuel sans risque pour l'individu.

Comment juguler les pulsions sexuelles pathologiques des délinquants sexuels ? Dans l'hypothèse simpliste d'une commande du comportement sexuel par les hormones masculines que sont les androgènes, on a parfois évoqué la technique de castration chimique, c'est-à-dire l'administration de composés qui modifieraient le fonctionnement du système hormonal et, de ce fait, inhiberaient le comportement sexuel. Dans quelles conditions administrer de tels traitements ?

En tant que médecin, je me résoudrais difficilement à traiter des personnes qui ne l'auraient pas expressément demandé ou qui n'auraient pas été informées des effets secondaires des traitements : une castration chimique qui aurait été décidée à titre pénal ne pourrait être appliquée par un médecin sans discussion sérieuse des avantages et des inconvénients.

De toute façon, nous verrons qu'une telle éventualité n'est même pas à envisager : si l'on peut bloquer – réversiblement – la production des androgènes ou leurs effets, la castration chimique n'est pas une technique que l'on puisse administrer durablement sans risque.

TRANSSEXUALISME ET CANCER

Une méthode de castration chimique est déjà employée depuis plusieurs années pour traiter les hommes qui veulent changer de sexe ou ceux qui souffrent de cancer de la prostate aggravés par les hormones androgènes (la testostérone, la dihydrotestostérone), sécrétées par les testicules ou métabolisées dans les tissus cibles. On a voulu bloquer l'effet de ces hormones en saturant leurs récepteurs (sans les stimuler) à l'aide d'une molécule nommée acétate de cyprotérone. Toutefois cet «antagoniste des androgènes» a plusieurs défauts graves : il n'est pas constamment efficace dans la suppression d'effets ou de la production des androgènes ; et quand il est

efficace, il engendre notamment une ostéoporose (une fragilisation des os) qu'on sait encore mal combattre. De surcroît, l'absence d'androgènes expose à un risque encore mal évalué d'atteintes cardiovasculaires, de sorte que le traitement ne peut être administré longtemps sans risques. Or à quoi servirait une castration chimique qui ne s'exercerait que pendant quelques mois ? Pour être utile, elle devrait rester efficace le temps qu'un traitement psychiatrique ait fait son effet, c'est-à-dire pendant plusieurs années.

CONTRÔLE SUPÉRIEUR

Une autre technique, plus régulièrement efficace, est l'utilisation d'«agonistes de la GnRH», c'est-à-dire de molécules qui se lient aux récepteurs de l'hormone GnRH (gonadotropin releasing hormone, ou «hormone de libération des gonadotrophines») et inhibent les effets de cette dernière. Sécrétée par l'hypothalamus, la GnRH agit normalement sur l'hypophyse. Ses agonistes bloquent la libération des hormones gonadotrophines que sont la FSH (folliculin stimulating hormone, ou «hormone de stimulation des follicules») et surtout la LH (luteinizing hormone, soit «hormone lutéinisante») ; sans ces hormones, les testicules ne sécrètent pas les androgènes, et le comportement sexuel est supprimé tant que le traitement est suivi.

Toutefois, les expériences sur les personnes qui veulent changer de sexe ont montré que seules de fortes doses d'agonistes suppriment les effets des hormones FSH et LH : la vie sexuelle disparaît, mais la technique est coûteuse, et elle n'évite pas les graves effets à long terme discutés précédemment.

Ces problèmes sont bien connus chez les femmes qui souffrent d'un cancer du sein. Dans ce cas, on effectue une «suppression ovarienne adjuvante ou palliative», afin d'éviter que les ovaires sécrètent des estrogènes qui provoquent la croissance des cellules du sein et favorisent le cancer : selon les cas, on éli-

mine les ovaires par chirurgie ou par radiothérapie, ou bien l'on utilise des agonistes de la GnRH pour provoquer une ménopause clinique. De même, chez les femmes souffrant d'autres maladies bénignes, dépendantes des hormones (fibromes utérins ou endométriose), on limite l'administration des agonistes de la GnRH à trois mois environ ou bien on propose un traitement de remplacement par des estrogènes à petites doses, afin de pallier les effets délétères de la suppression hormonale complète.

Le problème de l'homme traité par des antagonistes de la synthèse de la testostérone est identique : la technique est au point, mais la prise en charge et les risques à long terme sont insuffisamment évalués. Comme pour le cas de traitements féminins, on pourrait éventuellement, dans le cadre d'essais thérapeutiques, évaluer la quantité de testostérone que l'on pourrait administrer, en même temps que des agonistes de la GnRH, afin d'éviter les effets secondaires que provoque la privation d'androgènes ; toutefois la testostérone augmente la libido, de sorte qu'on ignore à ce jour si un tel traitement aurait l'objectif castrateur cherché et quel seuil de testostérone est efficace.

Plus généralement, le mécanisme du comportement sexuel reste mal connu. Si les systèmes hormonaux n'en sont pas une clef absolue, comment est-il commandé ? Serge Stoléru, à l'Hôpital de Bicêtre, examine aujourd'hui les centres cérébraux qui sont activés lors des excitations sexuelles, mais la physiologie du phénomène reste énigmatique.

Au total, nous n'avons pas aujourd'hui de médicament qui bloque la vie sexuelle sans effets secondaires. On ne peut donc envisager de castration chimique sans tenir compte de ces risques à long terme.

Philippe BOUCHARD est chef du service d'endocrinologie de l'Hôpital Saint-Antoine, à Paris.

Glace et glaciers

JEAN MARTIN

Avant l'avènement de la glace artificielle, la glace naturelle était conservée pendant plusieurs mois dans des glaciers, constructions isolantes en pierre ou en brique.

«Vous en telle ou meilleure pensée réconfortez votre malheur, et buvez frais si peut se faire.»

Rabelais, *Gargantua*.

Aujourd'hui, les réfrigérateurs sont universels, à tel point que l'on s'interroge : comment vivait-on sans eux ? On utilisait la glace naturelle (ou la neige), conservée du mois de décembre au mois d'octobre dans des glaciers, parfois nommées puits à neige.

Des tablettes en écriture cunéiforme datant de 2 000 ans avant notre ère indiquent que des glaciers existaient déjà dans la région de l'Euphrate. Le roi Zimri-Lim d'Assyrie (-1775- -1760) aurait été l'inventeur de glaciers construits à Terqua. Des textes mentionnent l'existence de telles glaciers dans l'ancienne capitale des Hittites, Hattusas, ainsi que dans l'actuel Iraq, voire plus au Sud.

Aux environs de -1000, le Chinois Shi Ching signale des dépôts souterrains de la précieuse glace, en précisant qu'elle est distribuée uniquement aux personnes aisées. Les Grecs utilisent la glace : pour ne pas trop souffrir du climat lors

du siège de Pétra, Alexandre le Grand se fait préparer des mélanges de fruits et de miel réfrigérés avec de la neige conservée dans une trentaine de fosses qu'il a fait construire à cet effet.

Certains auteurs anciens, tel Hippocrate, condamne l'usage de la «glace pleine d'impuretés» préjudiciable à la santé par temps de canicule. Malgré ces avertissements, les Grecs consomment de la glace, comme en témoignent de nombreux rafraîchissoirs. Ancêtres des bouteilles thermos, ces rafraîchissoirs étaient des récipients à double paroi, la boisson à rafraîchir étant au centre et la glace entre les deux parois.

Les Romains consomment aussi de la glace. Ils conservent ainsi certains aliments, surtout des huîtres, dont ils sont friands. Toutefois, la quantité de glace disponible est limitée, et le séchage, le fumage et la salaison sont déjà – et seront longtemps – les seules techniques de conservation utilisées.

Si certains aiment à prendre des bains refroidis par de la glace dans les *fridaria*, d'autres, comme Sénèque, lui attribuent des vertus médicinales. Ainsi, l'empereur Hadrien (76-138), atteint d'hydropisie, s'ap-

plique sur le cœur de la glace contenue dans une vessie de porc ; cela soulage la douleur qui lui étreint la poitrine et atténue ses angoisses. La glace est utilisée pour arrêter des hémorragies rebelles, pour soulager des coliques hépatiques, des fièvres, des gangrènes, etc.

Après les invasions barbares, aux IV^e et V^e siècles, l'usage de la glace semble disparaître en Occident, mais il est maintenu dans le monde musulman, comme en atteste le sorbet offert par Saladin, sultan d'Égypte et de Syrie, à l'empereur Richard Cœur de Lion, au XII^e siècle.

C'est sans doute par l'Espagne, en contact avec le monde musulman, et par les croisades que la glace naturelle réapparaît en Occident. En 1533, Henri II épouse Catherine de Médicis : la reine apporte d'Italie le secret des sorbets, et l'on recommence à conserver la glace. Pour fabriquer les sorbets, on ne se contente pas de glace pure : on mélange du salpêtre ou du sel à la glace, car la température de ces mélanges réfrigérants est inférieure à celle de la glace pure (la dissolution de ces sels nécessite de la chaleur qui est prélevée au milieu, ce qui en abaisse la température).

Henri III, puis Louis XIV sont friands de sorbets ; toute la cour et de nombreux bourgeois les imitent. L'usage de la glace naturelle augmente à partir du XVII^e siècle. Le commerce de la glace s'intensifie, surtout dans le Sud de la France, et y restera florissant jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Vers 1860, on découvre comment fabriquer la glace artificielle : c'est le crépuscule de la glace naturelle. Restent deux questions : d'où venait cette glace et comment la conservait-on ?

L'APPROVISIONNEMENT

La glace naturelle était produite, l'hiver, sur des lacs, des étangs, des bassins, des douves, des canaux, etc. On creuse aussi des bassins, dits de congélation, spécifiquement destinés à la production de glace ; ils sont profonds d'environ 50 centimètres, très étendus et alimentés par de petits cours d'eau.



Ramassage de glace sur un étang du bois de Boulogne. Après avoir été «récoltée», la glace était transportée dans des charrettes jusqu'à des glaciers toutes proches ; construites au milieu du XIX^e siècle, ces glaciers assuraient l'approvisionnement de Paris en glace.

En France, de tels bassins ont été creusés en Provence dans le massif de la Sainte-Baume au XVII^e siècle et dans les Alpes de Haute-Provence au XIX^e siècle. Certains glaciers de montagne, qui descendent à relativement basse altitude, comme dans les Alpes du Nord, à Argentières ou aux Bossons, par exemple, ont été exploités assez tardivement, de la fin du XIX^e siècle jusqu'au début du XX^e.

Certaines grottes, très froides, ont également fourni de la glace naturelle, notamment dans le Jura ou en Auvergne, mais cette production était marginale. La neige a été une source de froid, surtout dans des régions montagneuses de moyenne altitude, comme la Montagne Noire, au Sud du Massif central. Tassée, elle donnait une glace dite «bulleuse», de moins bonne qualité que celle des bassins.

Jusqu'au XVI^e siècle, seuls quelques privilégiés utilisent de la glace. Puis le commerce se développe. Il est réglementé à partir de Louis XIII et sous Louis XIV. Privilège royal, le droit de commercialiser la glace est distribué avec parcimonie, surtout à des nobles.

Plus tard, le privilège de la distribution de glace est progressivement racheté par des grandes villes et, parallèlement à ces privilèges royaux, deux systèmes juridiques coexistent : un commerce libre et un fermage, qui doit assurer un approvisionnement de glace régulier et garantir la stabilité des prix. Toutefois, des conflits éclatent, des procès interminables sont intentés et une contrebande s'installe. Certains glaciers s'enrichissent. À la Révolution, le commerce de la glace devient libre.

LES DIFFICULTÉS DU STOCKAGE

On parvient à conserver la glace naturelle en raison de la valeur élevée de sa chaleur latente de fusion : la quantité de chaleur qu'il faut fournir pour faire fondre un kilogramme de glace est égale à 330 kilojoules, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un litre d'eau pour élever sa température de 0 à 80 °C.

Néanmoins, toute la difficulté est de conserver cette glace pendant plusieurs mois : le secret de la conservation réside dans son stockage. La glace doit

être isolée de l'extérieur et de l'eau de fonte, soigneusement évacuée.

La conservation est meilleure quand la masse de glace est importante et homogène. Les pertes thermiques se produisent à l'interface entre la glace et l'air ou entre la glace et l'eau. Ainsi, on doit minimiser le rapport de la surface de la glace sur son volume. Or, dans le cas d'une forme sphérique, par exemple, la surface est proportionnelle au carré du rayon, tandis que le volume est proportionnel au cube du rayon. On minimise les pertes en augmentant le rayon : pour des volumes inférieurs à 50 mètres cubes, près de 90 pour cent de la glace risquent de fondre

en moins de six mois. Au contraire, pour des volumes supérieurs à 50 mètres cubes, et pour des glaciers bien conçus, on peut conserver 80 pour cent de la glace pendant six mois. Sur les très grands volumes, la glace peut même être conservée deux, voire trois ans.

Les premières glaciers ont été de simples anfractuosités naturelles, où l'on entassait de la neige compactée, ou de la glace, et que l'on recouvrait de branchages. La glace se conservait mal.

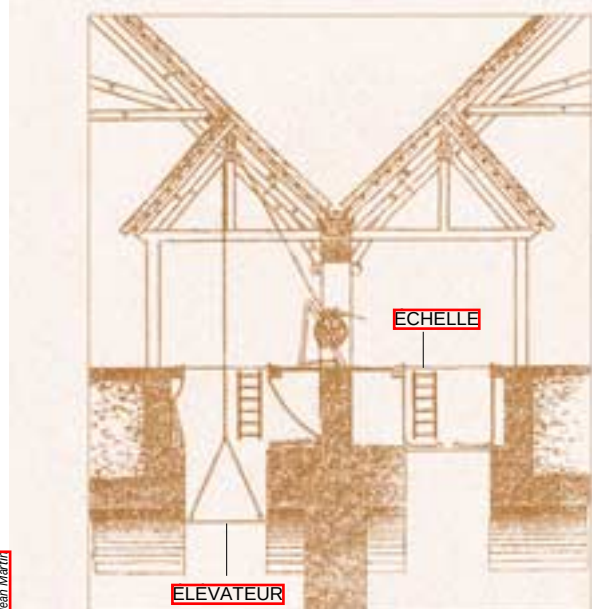
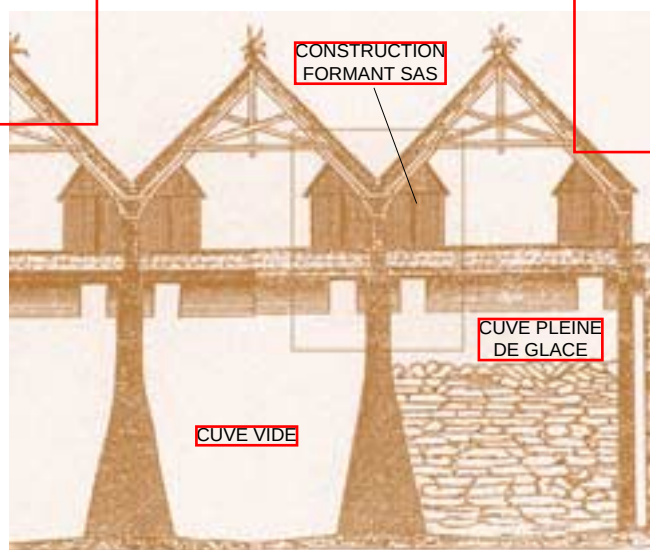
Des constructions plus élaborées apparaissent vers le XV^e siècle avant notre ère, en Iran notamment. Elles sont constituées de fosses artificielles, revêtues de briques et coiffées d'une couverture conique en argile. À l'origine, elles ne sont pas équipées de drains pour évacuer la glace fondue, et la conservation de la glace reste médiocre.

En France, les glaciers les plus anciennes, souvent partiellement détruites, datent du XII^e siècle ; elles étaient alors essentiellement à usage médical. Au XVII^e siècle, le domaine royal en abritait plusieurs : à Saint-Germain-en-Laye et surtout à Versailles, au potager, ou encore au Parc-aux-cerfs, à Satory. La plupart des glaciers bien conservés datent des XVIII^e et XIX^e siècles.

LA MAÇONNERIE

Au XVIII^e siècle, de très nombreux châteaux en sont pourvus, mais la glace reste un produit réservé à des privilégiés, sauf peut-être en Provence et dans le Languedoc, où les glaciers abondent et où la concurrence est forte. Au XIX^e siècle, une population moins fortunée commence à utiliser la glace, et la construction de très grandes glaciers fait baisser les prix.

Les glaciers sont constituées d'une cuve, plus ou moins enterrée, maçonnée, le plus souvent de forme circulaire, cylindrique ou tronconique, surmontée d'une coupole, où sont percés un ou plusieurs orifices d'accès latéraux munis de portes formant sas. Les matériaux utilisés sont la pierre de pays ou la brique, parfois les deux simultanément. La porte extérieure de chargement est orientée au Nord pour éviter que le Soleil n'y darde ses rayons.



Les glaciers du bois de Boulogne étaient constituées de dix cuves de stockage creusées dans le sol. Les cuves étaient recouvertes de bâtiments en bois. On pénétrait dans les cuves en passant par une petite construction qui servait de sas et améliorait l'isolation. La glace était descendue au moment du stockage et remontée au moment de l'extraction par des élévateurs. Les ouvriers descendaient dans les cuves par des échelles. La partie inférieure de ces plans est un agrandissement du cadre dessiné sur le schéma du haut.



Les glacières que l'on retrouve en France datent généralement des XVII^e et XVIII^e siècles. Celle de Satory-Versailles (à gauche) date de la fin du XVII^e siècle. D'une capacité de 750 mètres cubes, elle a une porte de chargement (à gauche sur la photographie) et deux portes de déchargement (l'une d'elles est à droite sur la photographie).



Une des glacières de Pivaut, dans le Var (à droite), date du XVIII^e siècle ; elle a une capacité de 900 mètres cubes, des murs de deux mètres d'épaisseur et un unique accès pour la manutention de la glace.

Jean Martin

Parfois, des ouvertures supplémentaires, situées au sommet de la coupole, servent au chargement de la glace, ou à l'éclairage. Quelques glacières, très anciennes, n'ont que cet orifice, comme à l'abbaye de Maillezais, en Vendée (XIII^e siècle).

Sous la cuve, on creuse un puisard ou une rigole, avec une canalisation qui évacue l'eau de fusion. Le sol est parfois suffisamment perméable pour absorber l'eau de fonte. Le fond de la cuve est pourvu d'un platelage de bois, qui évite le contact direct de la glace avec la maçonnerie et qui assure la dispersion de l'eau de fonte (un platelage est constitué de deux couches de poutres formant un plancher ajouré). Il est parfois recouvert de branchages et de paille.

L'ensemble de l'édifice a souvent l'apparence d'une butte de terre où poussent des arbustes, des taillis, voire des arbres. Parfois l'ensemble est placé dans un bâtiment, comme aux abbayes de Jumièges et de Maillezais, ou dans une cave, comme à Crécy-Couvé (dans l'Eure). Des tours, à murs épais et trapus, servaient de glacières en Provence.

Les cuves ont un diamètre variant de moins de deux mètres à 18 mètres, avec des capacités de 3 à 4 500 mètres cubes. Les glacières à usage privé ont des diamètres compris entre 4 et 5 mètres, et un volume de 50 à 100 mètres cubes. En revanche, les glacières royales atteignent 10 mètres de diamètre et 700 mètres cubes de volume. Au début du XIX^e siècle, on construit plutôt des cuves parallélépipédiques de grandes dimensions, afin de stocker davantage de glace et de satisfaire la demande croissante.

La glacière du bois de Boulogne avait été construite par la ville de Paris en 1857 pour approvisionner la capitale en glace, laquelle était récoltée sur les étangs du Bois. Cette grande glacière était constituée par deux rangées de cinq cuves cubiques de 12 mètres de côté chacune,

en béton, creusées dans le sol et accolées. L'ensemble, qui avait une capacité totale de 16 000 mètres cubes, était couvert de plusieurs bâtiments en bois, où l'on entreposait les voitures et les engins de manutention de la glace ; chaque cuve avait son propre élévateur. Cette glacière fut détruite par le feu en 1868!

A Paris, vers 1860, la capacité de stockage atteint 46 000 tonnes, grâce aux glacières du bois de Boulogne, de Vincennes, de Gentilly, etc.

Pour compléter l'approvisionnement, notamment lors des hivers doux, on importe, à partir de 1873, de la glace des pays nordiques (surtout de Norvège). Cette glace débarque au Havre, à Rouen et à Bordeaux. Vers 1890, la quantité importée atteint 50 000 tonnes par an. Les glacières des Alpes de Haute-Provence, avec un bassin de congélation de 20 hectares, complètent l'approvisionnement de la Côte d'Azur. À cette époque, la glace des grandes glacières de Sylans, dans l'Ain, dont la capacité est de 50 000 tonnes, est expédiée par chemin de fer jusqu'en Algérie.

REPLISSAGE ET EXTRACTION DE LA GLACE

Les glacières étaient remplies en hiver, dès que la quantité de glace formée était suffisante. La «récolte» devait être rapidement menée, car le temps risquait de se radoucir ; on utilisait alors une main-d'œuvre abondante. Les blocs de glace arrivaient par chariots, ou à dos d'homme dans des hottes ; ils étaient soigneusement empilés, les morceaux les plus irréguliers étaient cassés ; de temps à autre, on arrosait les blocs d'eau froide afin de souder les morceaux de glace et de former un bloc plus homogène. Lorsque le niveau supérieur de la cuve était atteint, on étalait un épais matelas de paille, lui-même recouvert de madriers. Le déchargement, en principe effectué de

nuit, était généralement étalé de mai à octobre, selon les besoins. Un ou deux ouvriers pénétraient dans la cuve par un sas, retiraient partiellement la couverture isolante et brisaient la glace à l'aide d'un ciseau d'acier ; les morceaux prélevés étaient remontés dans le sas à l'aide de cordes et de poulies. Les blocs de glace, tassés, étaient enveloppés dans de grosses toiles, puis chargés à l'extérieur sur des chariots garnis de paille ; ils gagnaient alors leur lieu d'utilisation.

Une pièce était parfois construite à l'extrémité du sas : nommée l'avant-glacière, elle servait au chargement de la glace dans les chariots. En dehors des périodes d'utilisation, on y conservait diverses denrées. Toutefois, la viande n'y était pas entreposée longtemps, car, dans une glacière, la température n'était jamais inférieure à 0 °C, la température de la glace fondante.

À la fin du XIX^e siècle, la glace artificielle, produite en toute saison, s'est substituée à la glace naturelle, et les glacières ont été définitivement abandonnées après 1914. Aujourd'hui, seules subsistent des glacières maçonnées, mais de nombreuses glacières étaient tout en bois. C'était généralement un bâtiment rectangulaire, construit au-dessus du sol et à double paroi ; l'espace libre était laissé vide, ou rempli de sciure ou de copeaux, et la glace était placée dans la chambre intérieure.

Les glacières, abandonnées, tombent en ruine. Ces édifices sont récemment sortis de l'oubli ; certains sont restaurés, et l'histoire de ces constructions et celle du commerce de la glace naturelle, qui a duré plusieurs siècles, commencent à ressurgir.

Jean MARTIN a étudié les glacières et publié *Les glacières françaises. Histoire de la glace naturelle*, aux éditions Errance, 1997.



Le lait solide

HERVÉ THIS

Comment faire gélifier le lait sans risque.

Entement, au fil des siècles, la cuisine a appris à confectionner des aliments solides à partir du lait liquide. Les fromages, tout d'abord, sont des «conserves» de lait que l'on obtient en déstabilisant le lait et en éliminant l'eau de ce dernier sous la forme du petit lait. Les yaourts s'obtiennent par chauffage de laitensemencé par des bactéries *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus* : les micro-organismes transforment le principal sucre du lait, le lactose, en acide lactique, qui acidifie le milieu et provoque la formation d'un réseau dans tout le liquide (d'un point de vue physique, le yaourt est un gel).

Ces dernières années, l'industrie agro-alimentaire a perfectionné les fermentations, ainsi que le caillage, et elle a découvert que le procédé exact de solidification détermine la texture, ce qui lui permet de proposer des plats lactés variés. À l'aide de composés gélifiants ou épaississants, qu'elle emploie pour la confection de sauces, elle a inventé des desserts lactés... mais des accidents inexplicables se produisent : quand on ajoute de la gélatine à du lait chaud, par exemple, un déplaisant grumelage a souvent lieu. À l'INRA de Nantes, Jean-Louis Doublier, Sophie Bourriot et Catherine Garnier montrent que tous les épaississants et gélifiants déstabilisent le lait, quand leur concentration est excessive.

Pourquoi ce comportement commun alors que les épaississants et gélifiants agro-alimentaires sont variés ? La gélatine est extraite des os d'animaux ; les amidons des graines et des tubercules, les carraghénanes et les alginates sont tirés des algues ; les galactomannanes (gommes guar, gomme de caroube, par exemple) proviennent de graines ; les pectines de végétaux, et la gomme xanthane est obtenue par fermentation d'amidon.

L'examen chimique de ces divers composés révèle des points communs : à l'exception de la gélatine, tous sont des polysides, des composés de la même famille chimique que les sucres ; les nombreux groupes hydroxyle (-OH) de ces molécules assurent l'épaississement des solutions en se liant à de nombreuses molécules d'eau.

Dans le lait, toutefois, les polysides interagiraient également avec diverses

protéines dissoutes et avec les protéines nommées caséine, qui se regroupent en micelles ; celles-ci sont soit dispersées dans le lait, soit à la surface des gouttelettes de matière grasse. Pourquoi observe-t-on alors une déstabilisation quand des forces entre polysides et caséine devraient, semble-t-il, lier les polysides aux micelles et aux gouttelettes de matière grasse ?

J.L. Doublier et ses collègues ont exploré cette question à l'aide de la technique de la microscopie confocale à balayage laser, qui n'examine les objets



Un mélange de gomme guar (en rouge) et de caséine (en vert) est homogène et stable quand la concentration en guar est faible (en haut), instable sinon (en bas) : le guar se sépare de la caséine.

qu'à une distance précise de l'objectif et sur une épaisseur réduite. À l'aide de marqueurs de la caséine, d'une part, et des polysides, d'autre part, ils ont cherché des zones riches en polysides et les zones riches en protéines, même dans des mélanges où aucune déstabilisation n'apparaissait à l'œil nu... et ils ont ainsi découvert que tous les polysides conduisent à une séparation de phases, quand leur concentration est notable ; les polysides se rassem-

blent dans certaines zones de la solution, et la caséine dans d'autres zones. Pis encore : pour certains polysides, cette séparation se produit parfois à partir d'une concentration très faible, mais elle n'est pas immédiate ; elle est d'autant plus lente que le milieu est visqueux, de sorte que l'industriel qui la négligerait risquerait de voir ses produits se dissocier entre le moment où il les fabrique et celui où ils sont consommés.

Les physico-chimistes japonais S. Asakura et O. Oozawa ont identifié le mécanisme de déplétion-floculation, qui se produit dans les suspensions de particules et semble avoir lieu dans le lait. Des particules sont en équilibre quand elles se repoussent (par des forces électrostatiques, entre les molécules électriquement chargées de leur surface) plus qu'elles ne s'attirent. Toutefois cet équilibre est rompu par la présence d'un polymère si gros qu'il ne peut se disposer entre les particules voisines : la concentration en polymère est nulle dans cet espace, nommé zone de déplétion.

Or par diffusion des molécules dans les solutions, les concentrations en chaque type de molécules tendent à s'égaliser. Comme les polymères ne peuvent migrer vers la zone de déplétion, ce qui augmenterait leur concentration, c'est l'eau qui quitte cette zone, afin de réduire la concentration en polymère à l'extérieur des zones de déplétion ; lorsque l'eau diffuse ainsi, les particules sont rapprochées. Dans le lait, les particules de caséine «floculent» ainsi, formant les zones observées... et les grumeaux redoutés.

Ce phénomène très général explique que l'on retrouve les mêmes instabilités pour le lait additionné des divers polysides. La seule façon de le circonvenir consiste à utiliser aussi peu de polysides que possible.

Les marins disent que «trop fort n'a jamais manqué» : il faudrait surdimensionner la coque, les cordages, le mat et les espars pour éviter la rupture. En matière d'agro-alimentaire, cette idée ne vaut rien.

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

Espérance morale et bijoux de famille

CHRISTIAN WALTER

La satisfaction tirée d'un gain est moindre si vous êtes riche : quel bonheur d'être pauvre...



Les consommateurs cherchent à maximiser leur bien-être, les producteurs, à maximiser leur profit. Mais augmenter sa richesse de 10 000 francs n'a pas la même valeur selon que l'on possède déjà un million de francs ou seulement 1 000 francs. Ainsi, pour déterminer si une décision économique est bonne, il ne suffit pas de connaître l'espérance mathématique de la richesse future, c'est-à-dire la valeur financière associée aux conséquences de chaque décision, il faut aussi connaître la valeur relative accordée à cette richesse.

Vers 1730, Daniel Bernoulli (1700-1782) et Gabriel Cramer (1704-1752) ont distingué l'espérance mathématique de la richesse et l'espérance mathématique de la satisfaction produite par cette richesse, qu'ils ont appelée « espérance morale ». Les agents économiques ne prennent pas leurs décisions en maximisant des espérances de richesse future, mais des espérances morales.

Comment apprécier cette satisfaction ? Dans son mémoire à l'Académie des Sciences de Saint-Petersbourg, Bernoulli estime que la satisfaction produite par la richesse est mesurée par le logarithme de la quantité d'argent. Aujourd'hui, les financiers sont moins rigides et supposent que les fonctions d'utilité sont concaves, ce qui signifie simplement que, plus on devient riche, et plus il faut gagner pour obtenir une augmentation de satisfaction identique. Avec la fonction logarithme de Bernoulli, on double sa satisfaction en passant de 10 francs à 100 francs, mais si l'on veut une augmentation de satisfaction identique, il faut passer de 100 francs à 1 000 francs, puis de 1 000 francs à 10 000 francs etc. : le plaisir coûte de plus en plus cher...

La concavité de la fonction de satisfaction exprime une réticence de l'individu devant la prise de risque. Êtes-vous prêt à acheter 10 000 francs un billet de loterie sachant que vous pouvez perdre 5 000 francs ou gagner

5 000 francs ? Selon Bernoulli, vous ne le ferez pas : la satisfaction produite par 10 000 francs est $\text{Log} 10\,000 = 9,21$, tandis que l'espérance morale est $(0,5 \times \text{Log} 5\,000 + 0,5 \times \text{Log} 15\,000) = 9,07$. L'espérance morale est inférieure à la satisfaction que vous retirez du montant certain. Vous n'accepterez de jouer que si l'on compense cette différence de satisfaction, qui vient du risque pris. Vous ne jouerez que si l'espérance mathématique de gain est de 11 180 francs. Les 1 180 francs représentent une prime de risque issue de la forme concave de la fonction de satisfaction logarithmique. Vous n'acceptez de jouer – de prendre un risque – que si l'on compense cette prise de risque en la payant.

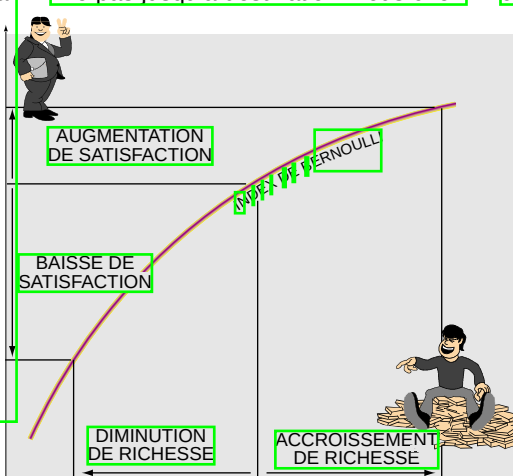
Une application du principe de l'espérance morale est l'évaluation du prix que l'on est prêt à payer pour assurer un bien (un bien qui vous est cher !). Imaginons que vous disposiez d'un capital de 100 000 francs, et que l'on vous annonce que vous allez hériter d'un bijou de famille d'une valeur de 10 000 francs. Ce bijou va être envoyé par la poste, mais il y a une chance sur cent pour qu'il n'arrive pas jusqu'à destination. Vous cher-

chez à faire assurer le bijou en cas de perte. Quel prix acceptez-vous de payer pour le contrat d'assurance ?

Appliquons le principe de l'espérance morale, en utilisant la fonction de satisfaction de Bernoulli. La satisfaction produite par le capital initial et la détention du bijou est $\text{Log}(100\,000 + 10\,000)$, soit 11,6082. Cette situation arrivera dans 99 pour cent des cas. Dans un pour cent des cas, le bijou de famille est perdu. La satisfaction produite par le capital initial seul est $\text{Log} 100\,000 = 11,5129$. La satisfaction espérée, mesurée par l'espérance morale, laquelle tient compte des probabilités de chaque situation, est alors égale à $11,6082 \times 0,99 + 11,5129 \times 0,01 = 11,6073$. Ce niveau de satisfaction est celui qui aurait été produit par une quantité d'argent de $\exp(11,6073) = 109\,895,21$ francs. Il est donc indifférent d'avoir de manière certaine 109 895,21 francs, ou, de manière probable, 110 000 francs à 99 pour cent et 100 000 francs à un pour cent. La prime d'assurance que vous serez donc prêt à payer est $110\,000 - 109\,895,21 = 104,82$ francs. Si un assureur vous vend un contrat à ce prix, vous l'achetez.

Or, pour l'assureur, qui applique la loi des grands nombres, l'espérance mathématique du sinistre est égale à 100 francs. La différence de 4,82 francs vient précisément de ce que votre espérance morale n'est pas égale à l'espérance mathématique. L'assureur décharge l'assuré de son risque, en encaissant la prime de risque égale à la charge affective négative que l'assuré supporterait par la perte du bijou de famille. Avec ces 4,82 francs, l'assureur fait un bénéfice qui lui permet de continuer à assurer des bijoux de famille.

Moralité : plus un bien vous est affectivement « cher », plus il vous en « coûtera » de le perdre, et plus vous serez prêt à payer pour « profiter » de son usage. Ainsi le veut l'espérance morale.



La fonction de «satisfaction» caractérise la valeur affective de l'argent. À chaque niveau de richesse est associée une valeur de satisfaction. La satisfaction croît moins vite que l'augmentation de la richesse.

Le virus de Hong Kong

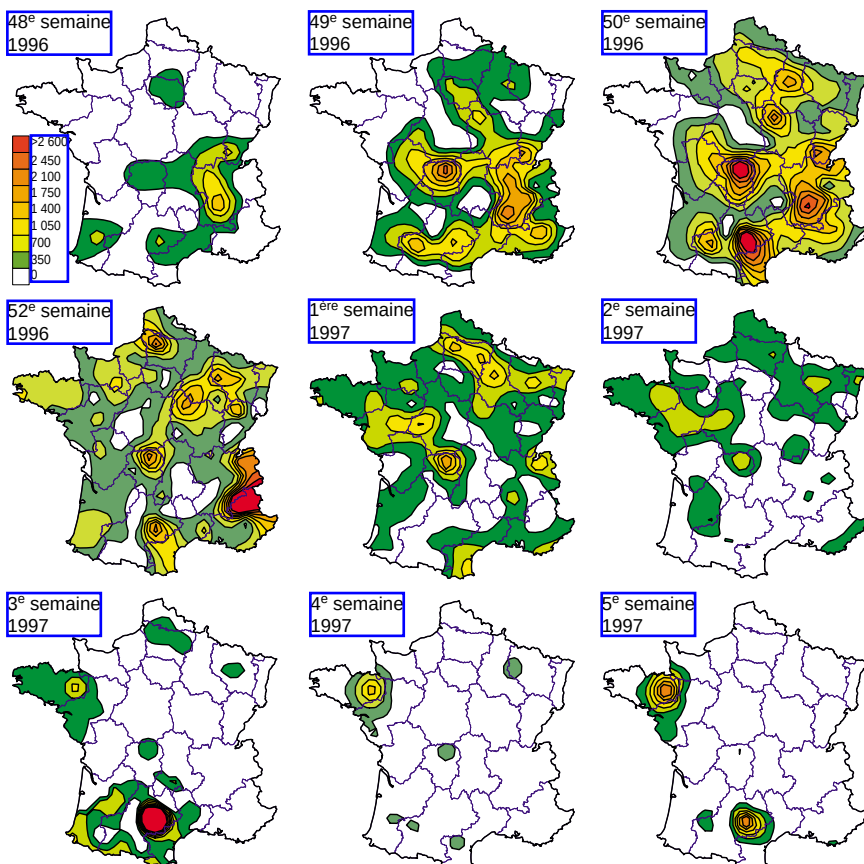
Ce virus, nouveau pour l'homme, ne se propage pas comme les virus «classiques» de la grippe.

Le souvenir de la grippe espagnole, qui fit plus de 20 millions de morts en 1918 et 1919, reste vivace ; la crainte d'une nouvelle épidémie demeure. Contrairement aux virus «classiques» de la grippe, qui infectaient des oiseaux (souvent des canards) et ne devenaient dangereux pour l'homme qu'après avoir infecté le porc, le nouveau virus, nommé H_5N_1 , passe directement du poulet à l'homme.

Habituellement les virus de la grippe colonisent le tube digestif des oiseaux, qui en seraient un «réservoir», et infectent le porc, où ils s'associent à des virus de mammifères. Lors de la dernière pandémie dite de Hong Kong, en 1968, le virus était issu d'un «réassortiment» de segments de virus aviaires et de virus de mammifères. Un virus hybride né de ce phénomène cumule deux avantages : premièrement, lors de la première diffusion chez l'homme, ses antigènes d'origine aviaire ne sont pas neutralisés par des anticorps humains spécifiques (l'homme n'ayant jamais été en contact avec ce virus n'a pas d'anticorps dirigés contre lui) ; deuxièmement, le virus contient des gènes du virus porcin qui assurent son adaptation à tous les mammifères, donc à l'homme, et garantissent sa multiplication et son pouvoir infectieux.

Le nouveau virus de la grippe a suivi un parcours différent. Même s'il a fait six victimes, il se propage mal chez l'homme, car c'est un virus totalement aviaire sur le plan génétique (il n'a pas infecté le porc, puisqu'on n'a trouvé aucun anticorps contre le virus de Hong Kong chez cet animal).

Selon Jean-Claude Manuguerra, à l'Institut Pasteur, le virus a contaminé l'homme, non pas parce qu'il lui est adapté, mais plutôt en raison de la quantité de virus libérés dans l'environnement lors des épizooties qui ont frappé les poulets, et de la promiscuité de l'homme et des volatiles. Le virus n'est pas toujours infectieux pour l'homme : sur 27 travailleurs agricoles, en contact avec des poulets infectés, cinq seulement avaient des anticorps dirigés contre le



Suivi de l'épidémie de grippe, au cours de l'hiver 1996-1997, en France. Le réseau qui assure cette surveillance a estimé à 2,5 millions le nombre de Français atteints. Ces cartes ont été établies par le Réseau Sentinelles de l'INSERM U 444.

virus ; en outre, les personnes infectées ne présentaient pas de symptômes grippaux. De surcroît, le virus se transmet peu d'homme à homme, bien que le médecin d'un des enfants décédés ait été contaminé.

Comment «l'épidémie» devrait-elle évoluer ? Ou bien les mesures d'éradication des poulets ont été efficaces, et l'épidémie s'éteindra (à condition toutefois qu'il n'y ait pas de «réservoirs» sauvages du virus) ; ou bien la transmission d'homme à homme augmentera, car des variants mieux adaptés (à cause des mutations accumulées) émergeront et seront sélectionnés. Enfin, le nouveau virus pourrait se multiplier chez une personne qui ne présente pas de symptômes, jusqu'à la période de l'épidémie de grippe annuelle «normale» (vers mars-avril) ; chez une personne infectée simultanément par le virus H_5N_1 et par un autre virus grippal adapté à l'homme, un réassortiment

risque de se produire, conférant au virus de Hong Kong, un pouvoir de diffusion bien supérieur à celui du virus actuel. On ignore quelle serait la virulence de ce virus.

Des groupes de surveillance de la diffusion des épidémies de grippe suivent sans cesse la propagation de la maladie dans le monde : le virus qui émerge souvent en Asie au printemps atteint l'Europe l'année suivante, ce qui permet aux virologues de prévoir la composition du vaccin qui sera efficace lors de l'épidémie à venir. Grâce à cette surveillance permanente, on caractérise l'épidémie en cours et on décide des mesures prophylactiques à prendre. Les autorités de santé françaises recommandent aux personnes en provenance de Hong Kong et qui seraient fiévreuses à leur arrivée en France de consulter un médecin qui fera éventuellement des prélèvements sanguins pour rechercher des anticorps dirigés contre le virus H_5N_1 .

La vie en accéléré

Les tortues des steppes vivent sous terre pendant neuf mois : il ne leur reste que trois mois pour s'alimenter et se reproduire.

Dans les steppes du désert du Kyzyl-Kum, en Ouzbékistan, les rigueurs climatiques sont extrêmes (45 °C en été, - 15 °C en hiver). La sécheresse est aggravée par les vents de sel qui résultent de l'assèchement de la mer d'Aral. La tortue des steppes, *Testudo horsfieldii*, s'est adaptée à ces conditions en s'enterrant du mois de juin à la fin du mois de mars de l'année suivante, passant ainsi 75 pour cent de sa vie sous terre.

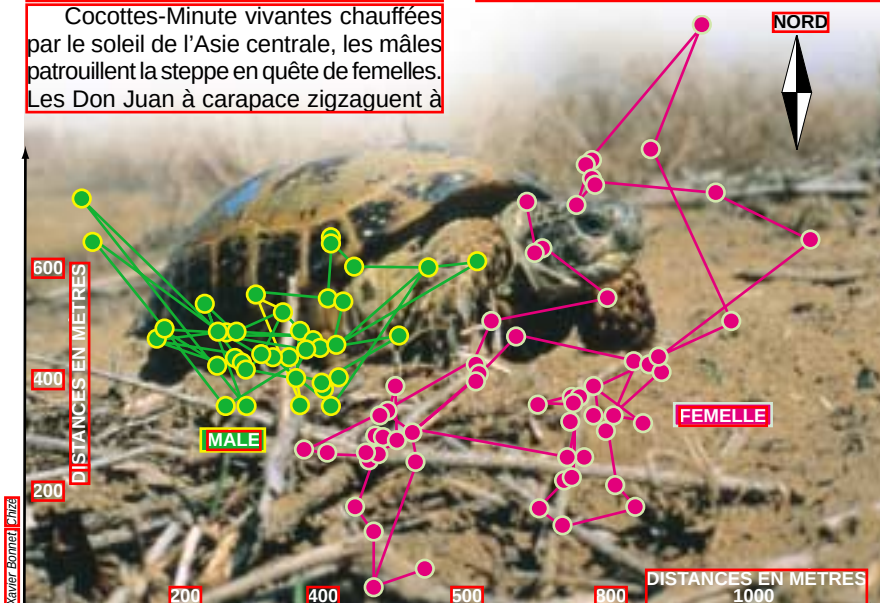
Pendant leurs trois mois d'activité, les tortues se nourrissent du faible couvert herbacé, grandissent et se reproduisent. Les tortues mâles recherchent des partenaires, et les femelles pondent leurs œufs. Le suivi des animaux réalisé par radio-tracking révèle l'extraordinaire mobilité de ces chéloniens : il est étonnant de voir des dizaines de tortues galoper dans toutes les directions. Les tortues parcourent plusieurs centaines de mètres en quelques heures, les domaines explorés annuellement variant de dix hectares (mâles) à 30 hectares (femelles). Leur morphologie autorise ces prodiges : leurs grandes pattes sont munies de griffes très longues et leur carapace en forme de galet est échancrée au-dessus des pattes. Ces caractères leur permettent de se déplacer rapidement sur le sable, et de creuser efficacement le sol.

Cocottes-Minute vivantes chauffées par le soleil de l'Asie centrale, les mâles patrouillent la steppe en quête de femelles. Les Don Juan à carapace zigzaguent à

travers la steppe pour intercepter les femelles. Pressés de s'accoupler avec le plus grand nombre possible de partenaires pour assurer la diffusion de leurs gènes, les mâles se livrent une âpre concurrence ; lors des combats, les plus gros sont avantagés, car ils retournent leurs rivaux plus légers. La plupart des mâles mis sur le dos peuvent se retourner (alors que les femelles en sont rarement capables), sauf quand ils sont épuisés, auquel cas, fin affreuse, ils meurent rôtis au soleil.

Les femelles, plus grandes que les mâles, ne se laissent pas séduire facilement, et les poursuites durent des heures. Elles peuvent retourner le prétendant qui n'a pas leur faveur. Les poursuivants forment d'étranges cortèges où une femelle est suivie de près par trois ou quatre mâles, formant un petit train qui avale les inégalités du terrain. Autre conséquence de l'extrême exigüité de la fenêtre temporelle favorable aux tortues : le télécopage de certains comportements normalement dissociés. Il est ainsi courant que des femelles continuent à brouter une herbe rare tout en subissant les ardeurs amoureuses des mâles, et les mâles interrompent fréquemment leur quête sexuelle pour se nourrir.

L'augmentation, dans le sang, des concentrations en testostérone, hormone qui stimule les comportements sexuels des mâles chez la quasi totalité des reptiles, rend généralement les individus anorexiques. Les mâles de tortues des steppes conservent-ils leur appétit alimentaire au cours de la période des accouplements malgré une élévation de la testostérone ? Les dosages ont montré que cette hormone existe à forte concentration durant les accouplements, et qu'elle n'inhibe pas l'appétit des animaux.

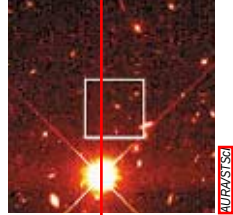


Trajets journaliers des tortues mâle et femelle pendant la période d'activité.

BRÈVES

Pas de Big Crunch!

Après l'expansion de l'Univers consécutive au Big Bang, l'expansion s'inversera-t-elle, l'Univers s'effondrant sur lui-même? Le ralentissement des supernovae dans des galaxies éloignées est lent, et l'on en déduit que l'Univers ne contiendrait que 20 pour cent de la matière nécessaire à son effondrement : l'expansion continuera indéfiniment. Dans 10^{100} ans, lorsque toutes les étoiles se seront éteintes et les derniers trous noirs évaporés, l'Univers sera une immense soupe glacée.



Une hormone de la mémoire

Les équipes de Michel Le Moal et d'Étienne-Émile Baulieu ont montré que la concentration en une hormone cérébrale, le sulfate de prégénolone, diminue chez le rat âgé et, avec elle, les capacités de mémorisation. L'administration de cette hormone dans le sang ou dans l'hippocampe, structure essentielle de la mémorisation, améliore temporairement la mémoire de ces animaux. La molécule favoriserait la synthèse de l'acétylcholine, un neurotransmetteur de la mémoire.

Subsidence de drakkar

En Norvège, des agriculteurs avaient repéré une petite colline qui s'affaissait lentement. Alertés en septembre 1997, des archéologues de l'Université d'Oslo ont étudié la colline à l'aide d'un radar. Ils ont découvert les contours d'un grand vaisseau dont ils ont extrait des fragments. Selon la légende, cette colline renfermerait la sépulture de Halfdan le Noir, père du premier roi de Norvège. Les datations du IX^e siècle sont compatibles avec la date supposée de la mort d'Halfdan.



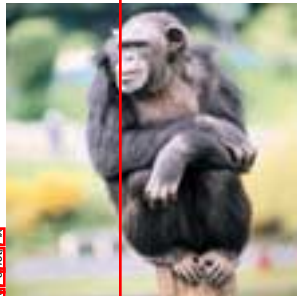
Un antalgique nicotinique

La douleur de milliers de personnes résiste aux antalgiques. Une molécule dérivée d'une toxine extraite de la peau de la grenouille *Epipedobates tricolor* inhibe la douleur en agissant sur les récepteurs de l'acétylcholine où se fixe aussi la nicotine. Chez le rat, la substance semble aussi efficace que la morphine pour inhiber certaines douleurs, sans effets secondaires ni accoutumance.

Suite page 22

Langage de singes

Les chimpanzés peuvent-ils utiliser un langage? Les résultats d'expériences d'apprentissage de la langue des signes ou du maniement d'images par ces animaux sont controversés, mais selon Patrick Gannon et ses collègues de l'École de médecine du Mont Sinaï, dans l'État de New York, ils auraient les bases neurologiques nécessaires. Dans le cerveau du chimpanzé, la zone nommée planum temporelle est plus développée dans l'hémisphère gauche : cette asymétrie, que l'on pensait spécifique à l'homme, est associée à la production et à la compréhension du langage parlé et gestuel.

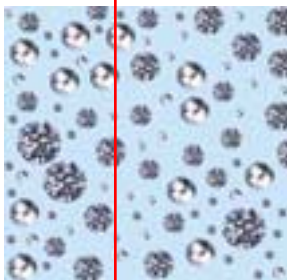


Stagnation démographique

Pour la première fois en temps de paix, la population européenne n'a pas augmenté en 1996. Tandis que l'Union européenne gagnait environ un million d'habitants, les pays d'Europe centrale et orientale en perdaient autant. Ce phénomène est lié à une forte baisse de la fécondité dans les ex-pays communistes plutôt qu'à une reprise de la croissance démographique dans l'Union européenne, où l'indice de fécondité est à son plus bas niveau : 1,4 enfant par femme.

La genèse des microdiamants

Durant les derniers stades de la formation des étoiles, alors que la poussière devient plus dense, celle-ci devrait absorber la lumière qui provient du centre chaud de la proto-étoile. Or, les observations n'ont jamais montré rien de tel. Selon Anja Anderson, de l'Université de Copenhague, c'est parce qu'une partie importante de la poussière est constituée de microdiamants transparents. L'analyse des microdiamants d'une météorite a conduit l'astronome danoise à cette conclusion étonnante. Trois pour cent du carbone du Système solaire serait sous forme de microdiamants.



Suite page 24

Si les mâles ont une très grande activité locomotrice, c'est qu'ils suivent les femelles ; pourquoi celles-ci parcourent-elles des distances considérables en réalisant de grandes boucles (d'où l'étendue de leur domaine vital)? Aucun indice ne laisse supposer que ces femelles vagabondes recherchent des zones riches en nourriture, ni des sites particuliers pour pondre. Le mystère reste entier.



La durée d'activité des tortues est brève et elle font le meilleur usage de leur temps : il leur arrive de continuer à manger lors de l'accouplement, *ultima ratio* darwinien.

La fécondité des femelles est vraisemblablement très faible : nous avons eu l'occasion d'observer quelques pontes, de un à trois œufs, et nous soupçonnons fortement que les femelles ne se reproduisent pas tous les ans. Ou alors les femelles ne mettent pas «tous leurs œufs dans le même panier», pondant chaque année, quelles que soient les ressources environnementales, en puisant dans leurs réserves les mauvaises années, ou en stockant le surplus les bonnes années. Cette stratégie permettrait de répartir les naissances de façon qu'au moins une partie des nouveau-nés bénéficient de bonnes conditions lors de leur première année. Pendant cette période où ils sont les plus vulnérables,

il leur faut trouver de la nourriture afin d'atteindre une taille minimale qui les protège des prédateurs. Cette stratégie, qui a été décrite chez les tortues du genre *Gopherus* des déserts américains, pourrait avoir été retenue dans les immenses déserts d'Asie centrale.

Ces travaux nous éclairent sur le comportement de la tortue des steppes, animal intéressant par son originalité et menacé par la modification des milieux, le braconnage et le ramassage par les collectionneurs.

X. BONNET, G. NAULLEAU, K. BAHLOUL, J. LAURENT et O. CHASTEL
Centre d'études biologiques de Chizé

Dent de fer

Le plus ancien implant dentaire intégré.

La perte de nos dents crée un préjudice esthétique ... et alimentaire. Les découvertes archéologiques font état, dès l'Égypte ancienne, de remplacements dentaires, en relation avec le rituel funéraire. Les Étrusques, puis les Romains ont laissé des traces de traitements dentaires, consistant à combler le vide laissé par la chute des dents par des ponts et des attelles en os, en bois ou en corne. Ces interventions, superficielles, n'avaient qu'un but esthétique ; la découverte d'une dent artificielle en fer incluse dans la mâchoire supérieure d'un Gallo-Romain montre, en revanche, que des moyens rudimentaires auraient permis, bien plus tôt qu'on ne le pensait, d'implanter des prothèses utilisables.

Cette dent artificielle a été trouvée à la place de la seconde prémolaire supérieure droite, dans la mâchoire d'un homme

inhumé au 1^{er} siècle de notre ère dans la nécropole de Chantambre, dans l'Essonne. La radiographie montre que la racine de l'implant s'intègre parfaitement dans l'alvéole de la gencive, sans espace libre : une intégration osseuse, qui s'établit en trois à six mois, a englobé et maintenu en place cet élément étranger. Des réac-



Le Gallo-Romain qui portait une dent de fer (flèche) en remplacement de la seconde prémolaire droite l'a-t-il utilisée pour manger? Il l'a, en tous cas, gardée plus d'un an.

tions osseuses mineures sur l'os péri-phérique indiquent que l'homme, qui avait plus de trente ans lors de son décès, a vécu au moins un an après la mise en place de la prothèse.

Cet implant était-il fonctionnel ? La corrosion de sa surface empêche toute analyse de traces, mais la position anatomique correcte de la dent artificielle et son intégration laissent penser qu'elle a effectivement été utilisée pour broyer des aliments. Il est de toute façon certain qu'elle a été mise en place dans ce but, et non par souci esthétique, la seconde prémolaire supérieure étant une dent peu visible.

Le succès de cette implantation est dû en grande partie à la qualité de la dent artificielle en fer : l'habileté des forgerons gaulois, mentionnée par Jules César, s'est exercée ici. La personne qui a forgé l'implant, par une succession de martellages à chaud et de repliements (selon l'analyse métallographique), devait avoir en main la dent initiale, tombée ou extraite, dont elle a fait une copie quasi conforme. Par ailleurs, la mise en place de la prothèse, par percussion, peu de temps après la perte de la dent initiale, la vascularisation n'étant pas encore trop perturbée, aurait aussi été un facteur de succès.

La population inhumée à Chantambre est d'origine rurale, vraisemblablement composée d'indigènes gaulois. Malgré le mauvais état dentaire des 500 individus exhumés, lors de la fouille dirigée par Louis Girard, un seul portait une prothèse. Pourquoi a-t-il bénéficié d'un tel acte médical ? Rien ne le distingue de ses contemporains, ni l'inhumation en pleine terre avec quelques céramiques, ni sa morphologie. La perte précoce de ses molaires supérieures gauches l'a-t-elle incité à conserver un côté droit actif ?

Pascal MURAIL
Laboratoire d'anthropologie,
Université de Bordeaux I

Allergie au latex

Les risques d'allergie au latex ont augmenté quand la fabrication des gants a changé.

Le changement d'un procédé industriel peut nuire à la santé publique. Ainsi, la modification du procédé de fabrication de la farine de mouton dont on nourrissait les vaches déclencha l'épidémie de la vache folle. Un autre exemple est la fabrication des gants de latex. Pourquoi le nombre et la gravité des allergies au latex ont-ils tant augmenté au cours des dix dernières années ? Aujourd'hui, plus d'une personne sur dix parmi le personnel de santé est allergique au latex. Les réactions cutanées ou les crises d'asthme contraignent souvent les personnes atteintes à changer de métier.

Le personnel hospitalier et les dentistes sont particulièrement touchés. Les étudiants en chirurgie dentaire ne présentent aucune allergie en première et deuxième années d'études (ils ne pratiquent pas eux-mêmes d'actes chirurgicaux), mais près de 15 pour cent des étudiants de cinquième année sont devenus allergiques.

Pourquoi les gants de latex déclenchent-ils davantage d'allergies ? Pour deux raisons : le latex contient des protéines allergisantes, notamment l'hévéine, et les usines de fabrication des gants sont toutes aujourd'hui près des sites de récolte de latex (en Extrême Orient). Naguère, ce latex était conservé dans l'ammoniaque et acheminé jusqu'aux usines européennes où il était transformé, plusieurs mois après sa récolte. Or, l'ammoniaque détruit les protéines de l'hévéa, notamment l'hévéine. Aujourd'hui, les gants sont fabriqués avec un latex « frais », dont l'ammoniaque n'a pas dégradé l'hévéine : c'est pourquoi le caoutchouc contient plus de protéines aller-



Les premiers gants chirurgicaux utilisés dans les années 1950 étaient épais et malcommodes. Toutefois, le personnel de santé, qui n'était pas encore sensibilisé, n'était pas allergique au latex.

gisantes qu'auparavant. On pourrait dégrader ces protéines en utilisant des solutions de déprotéinisation, mais cette opération augmenterait le prix de revient.

Comment l'hévéine pénètre-t-elle dans l'organisme ? Par l'intermédiaire de la poudre d'amidon de maïs lubrifiante où l'on plonge les gants après leur fabrication. Cette poudre adsorbe les protéines allergéniques contenues dans le latex. Quand les utilisateurs mettent leurs gants, la poudre se répand dans la salle d'opération. Elle est inhalée, et la barrière pulmonaire est facilement franchie. L'hévéine risque de déclencher des mécanismes allergiques surtout chez les personnes génétiquement prédisposées.

Pour éviter ces allergies, les fabricants proposent des gants sans poudre ou des

gants en matière synthétique (dépourvus de toutes protéines potentiellement allergisantes). Les gants sans poudre sont généralement soumis à l'action du chlore, qui réagit avec la surface du caoutchouc, la rendant plus lisse. De surcroît, les protéines allergisantes sont ainsi dénaturées.

Selon Francisque Leynadier, de l'Hôpital Rothschild, à Paris, les maladies allergiques dues à l'usage de gants de latex poudrés devraient diminuer parmi le personnel de santé au cours des prochaines années ; malheureusement, ces gants sont aujourd'hui disponibles dans les grandes surfaces et l'on peut craindre que les allergies au caoutchouc naturel se multiplient chez les personnes qui les utilisent régulièrement.

La facture de la Nature

Des étudiants de l'Université Cornell aux États-Unis ont évalué le coût des services que Dame Nature nous prodigue gracieusement chaque année.

	MILLIARDS DE FRANCS
Elimination de déchets	4560
Fixation de l'azote	540
Pollinisation	1200
Tourisme	3000
Fixation du gaz carbonique	810

Le véhicule du prion

On contamine aisément des souris en injectant dans leur cerveau des extraits de tissu cérébral contenant des prions, responsables d'encéphalopathie spongiforme. Toutefois la contamination est aussi possible quand le prion anormal est administré en dehors du cerveau, à condition que les prions finissent par y parvenir. Une équipe suisse a montré que les lymphocytes B différenciés seraient les véhicules des prions vers le cerveau : les souris dépourvues de telles cellules matures seraient protégées.

Virus marqueurs de migrations

Certains virus ont coévolué avec l'homme. Lorsque deux populations sont issues d'une même population ancestrale infectée par un virus, on déduit de la divergence des génomes des virus qui continuent à infecter ces deux populations, la date où elles se sont séparées. Ainsi l'étude du polyomavirus chez les Amérindiens, notamment chez les Navajos, a confirmé que ces derniers descendent de groupes venus du Nord-Est de l'Asie par le détroit de Béring, il y a 12 000 à 30 000 ans. Par ailleurs, le polyomavirus aurait commencé à infecter l'homme il y a 100 000 à 50 000 ans.

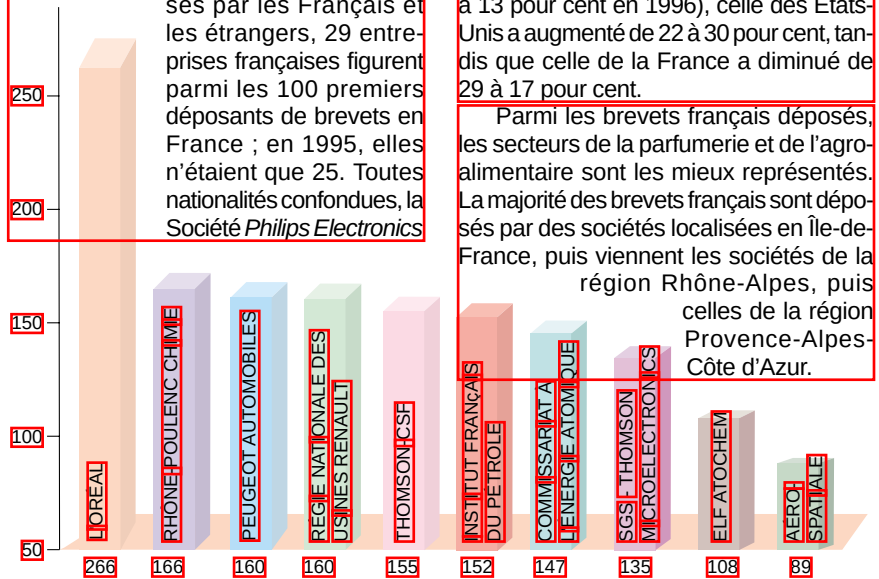
Un détecteur d'odeurs à la caisse

Vous êtes dans la file d'attente à la caisse du supermarché. La personne devant vous achète dix kiwis, deux mangues, trois bananes, etc. La caissière ne trouve pas les bons codes. Un détecteur d'odeurs qui vient d'être breveté aux États-Unis devrait vous éviter l'impatience de l'attente. Un courant d'air passe sur le fruit ou sur le légume et le détecteur l'analyse, le reconnaît, et le code de caisse, donc le prix, s'affiche automatiquement.

Brevets en 1996

La première société française par le nombre de brevets déposés en 1996 est au 14^e rang mondial.

Le nombre de brevets déposés par un pays indique sa santé économique. Où se situe la France par rapport aux autres pays ? D'après l'Institut national de la propriété industrielle (INPI), qui enregistre tous les brevets déposés par les Français et les étrangers, 29 entreprises françaises figurent parmi les 100 premiers déposants de brevets en France ; en 1995, elles n'étaient que 25. Toutes nationalités confondues, la Société Philips Electronics



Nombre de brevets déposés, en France, en 1996 par les dix premières sociétés françaises.

est l'entreprise qui a déposé le plus de brevets en 1996 (774), puis viennent Canon (717), Siemens (588), Eastman Kodak (445) et IBM (428 brevets). Sur les 98 487 brevets en vigueur sur le territoire français en 1996, les États-Unis viennent en tête avec 29 481 brevets, suivis de la France (17 155), de l'Allemagne (14 786), du Japon (12 392) et de la Grande-Bretagne (4 863). Jusqu'en 1987, la France déposait le plus grand nombre de brevets. Parmi ces cinq plus grands déposants en France, la part de l'Allemagne et de la Grande-Bretagne a peu évolué depuis 20 ans, celle du Japon a doublé (passant de 6 pour cent en 1976 à 13 pour cent en 1996), celle des États-Unis a augmenté de 22 à 30 pour cent, tandis que celle de la France a diminué de 29 à 17 pour cent.

Parmi les brevets français déposés, les secteurs de la parfumerie et de l'agroalimentaire sont les mieux représentés. La majorité des brevets français sont déposés par des sociétés localisées en Île-de-France, puis viennent les sociétés de la région Rhône-Alpes, puis celles de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Turbulence nouvelle

L'apparition de vermisseaux dans la turbulence.

On a demandé au physicien Enrico Fermi quelle question il poserait à Dieu s'il en avait la possibilité. La solution au problème de Fermat, avait-il répondu. Pourquoi pas l'explication de la turbulence, s'étonna son interlocuteur ? Pour ne pas embarrasser Dieu, car la turbulence est l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre, répondit-il.

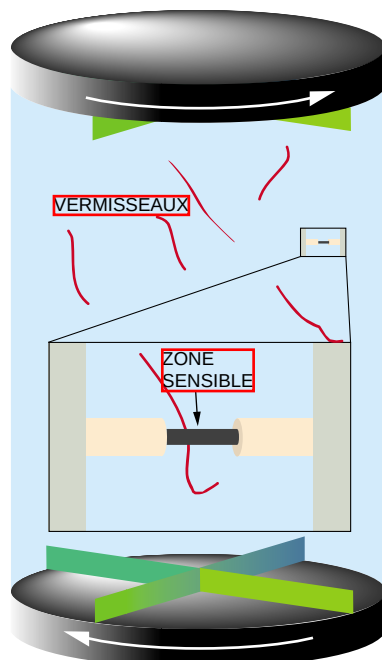
Devant les piles d'un pont, l'écoulement de la rivière est laminaire : les mouvements de l'eau sont à peu près parallèles. Derrière une pile, le mouvement est turbulent : l'eau s'écoule en volutes et tourbillons. Ce phénomène de turbulence est mal expliqué et le désordre du mouvement est imprévisible. À l'aide d'une expérience d'hydrodynamique qui utilise de l'hélium gazeux en rotation, nous

avons montré que la turbulence n'est pas un régime unique : nous avons découvert une transition dans la turbulence.

Les forces d'inertie transfèrent l'énergie du mouvement global aux mouvements à plus petite échelle : les grands tourbillons se divisent en tourbillons de plus en plus petits, jusqu'à ce que les forces dues à la viscosité l'emportent sur les forces d'inertie ; l'énergie est alors dissipée par échauffement du fluide. Le rapport des forces d'inertie par les forces de viscosité est le nombre de Reynolds, et la turbulence apparaît lorsque ce rapport est supérieur à dix. Dans le cours d'un torrent, par exemple, le nombre de Reynolds est de quelques centaines. Pour explorer les régimes d'écoulement très turbulents, nous avons utilisé l'hélium gazeux, dont la viscosité varie notablement avec la pression et la température. En ajustant ces paramètres, nous explorons une gamme de nombres de Reynolds compris entre 10^4 et 10^7 .

Dans un cylindre, nous entraînons de l'hélium gazeux à l'aide de deux disques munis d'ailettes et tournant en sens opposé. Le dispositif est refroidi dans un cryostat contenant de l'hélium liquide. La vitesse du gaz est mesurée à l'aide d'anémomètres, dont le refroidissement, résultant du courant de gaz, est fonction de la vitesse locale de l'hélium.

Nous nous sommes intéressés à l'étude des structures qui apparaissent dans les bouffées agitées de gaz. Lors de simulations numériques, on observe des structures tourbillonnaires (vermisseaux) analogues à de petites tornades. Comment détecter de telles structures ? Les simulations montrent que, lorsqu'elles passent dans l'anémomètre, ces structures créent une variation de vitesse mesurée caractéristique. Grâce à cette signature, observée sur nos enregistrements de vitesse, nous avons observé des vermisseaux pour la première fois. Leur rayon est égal à une dizaine de micromètres.



Entre deux disques munis de pales tournant en sens inverse, de l'hélium refroidi est mis en mouvement. Lorsque un vermisseau (en rouge) passe sur la partie sensible du détecteur, on enregistre un signal caractéristique. On compte ainsi le nombre de vermisseaux en fonction de la turbulence.

A partir des mesures, on calcule le nombre moyen de vermisseaux à chaque rotation des disques. Lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 10^5 , le nombre de vermisseaux est constant : nous en observons huit à chaque rotation des disques. Pour des nombres de Reynolds supérieurs, le nombre de vermisseaux augmente, puis sature lorsque le nombre de Reynolds dépasse 5×10^5 .

Ainsi, nous avons mis en évidence des structures tourbillonnaires très petites, mais nous avons surtout montré l'existence d'une transition à nombre de Reynolds élevé. Bien que ce résultat n'ait pas encore été confirmé dans d'autres systèmes, il n'est nullement en désaccord avec les autres expériences de turbulence. Par ailleurs, ce résultat n'est toujours pas expliqué théoriquement et remet en cause l'idée de la continuité des mesures lorsque l'on augmente le degré de turbulence : on pourrait trouver une succession de telles transitions.

Hervé WILLAIME,
Lab. de physique statistique, ENS, Paris

Rétrovirus, diabète et sclérose en plaques

Quand ils sont activés, deux virus, normalement silencieux, déclencheraient ces maladies.

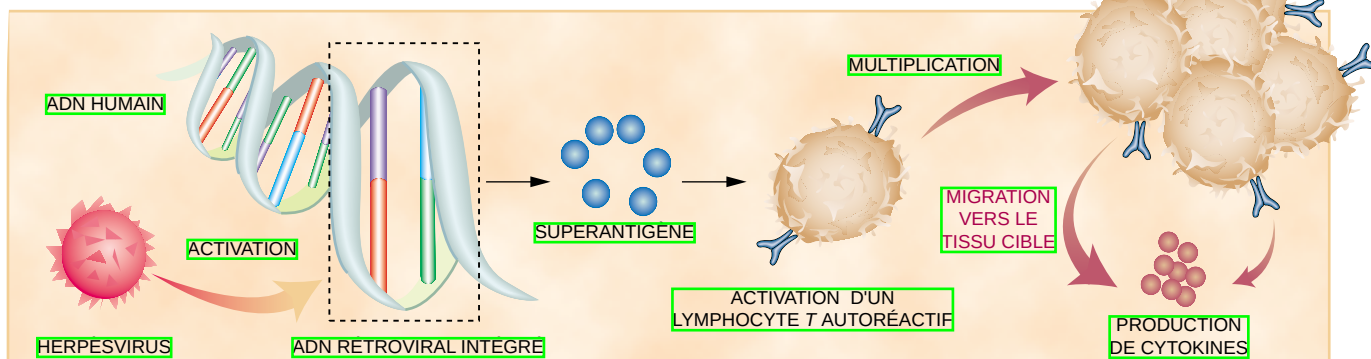
Les maladies auto-immunes restent mystérieuses. Pourquoi l'organisme se suicide-t-il ? Diverses hypothèses ont été proposées, mais les rétrovirus endogènes semblent être l'une des causes possibles.

Les rétrovirus, tel celui qui cause le SIDA, parviennent à intégrer leur génome dans celui des cellules des personnes qu'ils infectent. Lorsqu'ils ne sont pas trop patho-

gènes, ils épargnent les personnes contaminées ; quand, en outre, ils s'intègrent dans le génome des cellules de la reproduction, ils sont transmis de génération en génération et pérennisés. Au cours de l'évolution, nombre de rétrovirus se sont ainsi insérés dans le génome des mammifères. Certains de ces gènes viraux sont dormants, d'autres s'expriment partiellement (seuls des ARN messagers sont synthétisés), d'autres produisent des protéines, mais pas de particules virales, et une petite minorité produit des particules virales, généralement non infectieuses. Toutefois, la réémergence de virus infectieux n'est jamais exclue. Lorsque des rétrovirus endogènes s'expriment au cours du développement, leurs protéines sont considérées comme des

antigènes du soi : elles sont tolérées par le système immunitaire. En revanche, quand un rétrovirus était dormant, mais qu'un facteur environnemental ou endogène (des hormones sexuelles, par exemple) le réveille, il risque d'activer le système immunitaire et, éventuellement, des lymphocytes T spécifiques du soi.

Pourquoi peut-on accuser ces rétrovirus endogènes silencieux ou provirus d'être responsables de maladies auto-immunes ? Chez certains animaux, un rétrovirus déclenche une polyarthrite ; de plus, des particules rétrovirales ont été visualisées en microscopie électronique dans des prélèvements effectués sur des personnes atteintes de diverses maladies auto-immunes.



Lorsqu'un agent extérieur, par exemple un virus de la famille des herpesvirus, active la séquence d'un rétrovirus intégré dans le génome humain depuis des millénaires, la fabrication d'un superantigène est déclenchée. Ce dernier entraîne la prolifération de nombreux lympho-

cytes T, dont certains reconnaissent des éléments du soi. Ils se multiplient, migrent vers l'organe cible et y libèrent de grandes quantités de cytokines, qui endommagent les tissus. Dans le cas du diabète, ces dernières détruisent les cellules qui produisent l'insuline.

Dans le cas du diabète insulino-dépendant, l'équipe de Bernard Conrad, à l'Université de Genève, a montré qu'un rétrovirus endogène humain s'exprime dans des cellules sanguines, et que ces dernières activent des lymphocytes T spécifiques des cellules bêta des îlots de Langerhans (ces cellules du pancréas produisent normalement l'insuline, mais elles sont détruites chez les patients atteints de diabète insulino-dépendant). Ces lymphocytes T se multiplient et migrent en grand nombre vers le pancréas (tant qu'ils ne sont pas activés, les lymphocytes T , qui réagissent contre le soi, sont peu nombreux et restent tapis, inoffensifs, dans des «sanctuaires» inaccessibles).

De surcroît, ce rétrovirus endogène produit un «superantigène», une molécule qui active plusieurs types (plusieurs clones) de lymphocytes T , ce qui déclenche une violente réaction immunitaire et crée de graves lésions cellulaires et tissulaires. L'activation du rétrovirus et la production du superantigène seraient déclenchées par un cofacteur, peut-être une infection simultanée par un virus de la famille des herpèsvirus, ou par des hormones

sexuelles (l'incidence du diabète est maximale près de la puberté). Les superantigènes sont encore plus efficaces que les antigènes pour activer le système immunitaire, de sorte que les bataillons de lymphocytes activés qui arrivent dans le pancréas libèrent de grandes quantités de substances toxiques ; ces dernières déclenchent et entretiennent une inflammation locale excessive, qui finit par détruire les cellules à insuline.

Le mécanisme de la sclérose en plaques serait du même type. Cette maladie neurologique est due à une destruction de la gaine de myéline qui entoure les neurones et facilite la transmission des messages nerveux. Les malades ont des troubles moteurs qui aboutissent parfois à une paralysie, des troubles de la coordination et des troubles sensitifs.

L'équipe d'Hervé Perron, à la Société bioMérieux de Lyon, et celle de Jean-Marie Seigneurin, à la Faculté de médecine de Grenoble, ont détecté des particules extracellulaires de type rétroviral dans le liquide céphalorachidien et dans des cellules sanguines et des lymphocytes prélevés chez des patients atteints de sclérose en plaques.

Ce rétrovirus, nommé MSRV, ressemble beaucoup à un rétrovirus endogène, mais on devra déterminer sa séquence génétique complète et la comparer à la séquence humaine correspondante pour prouver que ce rétrovirus est bien endogène.

L'équipe lyonnaise a aussi montré que des protéines produites par un herpèsvirus activent l'expression du rétrovirus MSRV. Ainsi, la présence du rétrovirus endogène, dans le génome de certaines personnes, dénoterait une susceptibilité génétique à développer une sclérose en plaques. L'expression du génome rétroviral, réveillé par un herpèsvirus, par exemple, deviendrait pathologique. Le rétrovirus synthétise peut-être, comme dans le cas du diabète, un superantigène qui exacerberait les réactions immunitaires locales ; les substances libérées en excès (des cytokines) lésaient la myéline.

Ces découvertes auront-elles des conséquences thérapeutiques ? À mesure que l'on déchiffre des mécanismes, on se rapproche d'un traitement, mais saura-t-on un jour bloquer l'expression d'un de ces rétrovirus endogènes, qui font partie intégrante du génome humain ?

Aurores joviennes

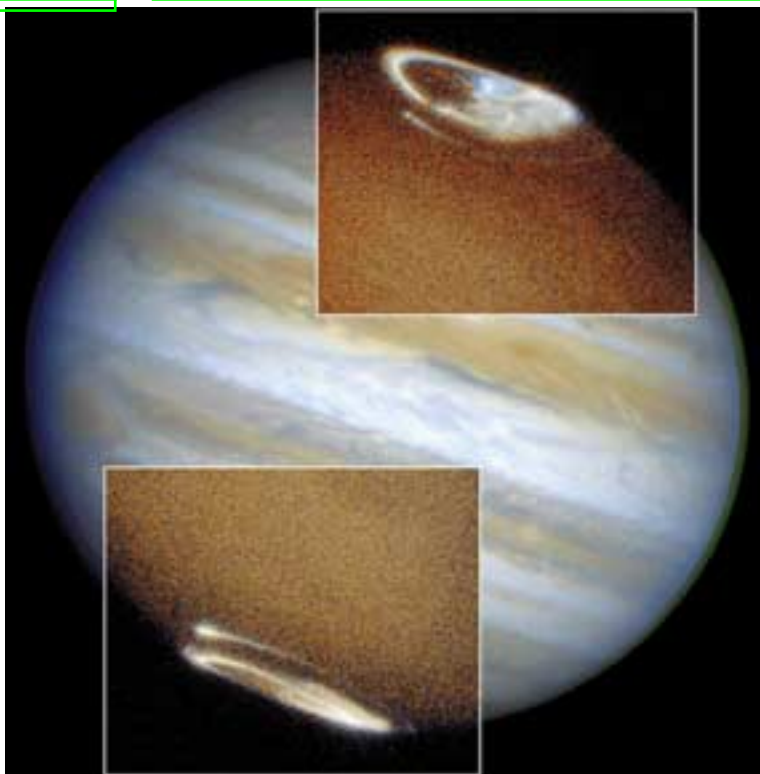
Les habitants et visiteurs des régions polaires ont parfois la chance d'observer des aurores polaires. Ces phénomènes résultent de l'interaction de particules chargées du vent solaire, qui s'engouffrent vers les

pôles, guidées par le champ magnétique terrestre. Ces particules excitent, par collision, des molécules de l'atmosphère qui, en se désexcitant, émettent un rayonnement visible et ultraviolet.

La planète Jupiter possède un champ magnétique ; cependant, ce géant du Système solaire est trop éloigné du Soleil et les particules du vent solaire sont en nombre insuffisant pour créer des aurores. Comment expliquer, alors, les aurores polaires détectées sur Jupiter ? Par les émissions de Io, l'un des quatre gros satellites joviens. Chaque seconde, cette planète au volcanisme actif éjecte dans l'atmosphère jovienne une tonne de gaz et de poussières. Une partie de ces particules crée les aurores polaires, tandis qu'une autre partie suit les lignes de champ magnétique qui lient Io à Jupiter. Ces particules dessinent alors une trace que l'on distingue à proximité des aurores. La partie brillante de cette trace (à gauche des traces) matérialise l'empreinte magnétique, l'endroit où les lignes de champ magnétique provenant de Io pénètrent dans l'atmosphère jovienne.

La bonne résolution de cette image, cinq fois meilleure que les résolutions précédentes, résulte de la mise en service d'un nouveau

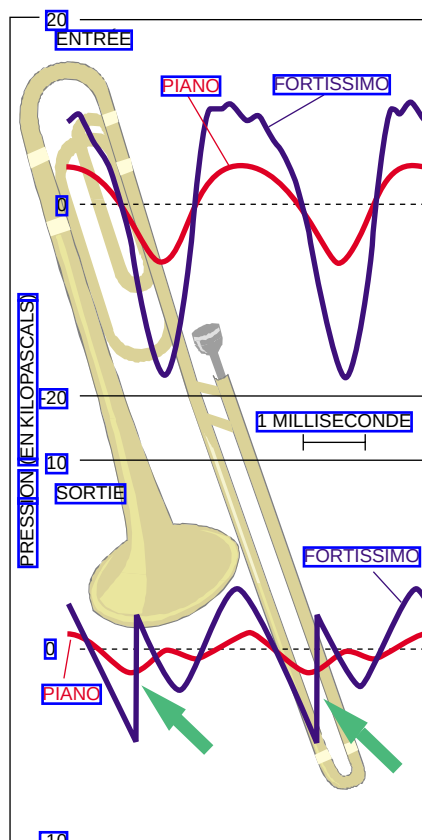
spectrographe imageur à bord du Télescope spatial Hubble. Ces études expliqueront la formation des aurores polaires joviennes et la nature du générateur électrique qui lie Jupiter et Io.



Chocs cuivrés

Des discontinuités de pression produisent les sons «cuivrés» des instruments à vent.

Verdi, en composant *Aïda*, pensait-il que l'on en retiendrait surtout «les trompettes»? Comme chaque fois que les cuivres jouent très fort, les notes émises dans ce morceau ont un timbre brillant caractéristique, que l'on qualifie de «cuivré», par analogie avec la composition métallique des instruments. Toutefois ni le matériau ni les vibrations de l'instrument ne sont responsables des caractéristiques de ces sons (pas plus que des autres sons émis par les instruments à vent) : en adaptant une embouchure de trombone sur un tuyau de plastique assez long, un instrumentiste expérimenté obtient aisément une note cuivrée. Cette sonorité résulte en fait



A l'entrée de la coulisse d'un trombone, la forme de l'onde sonore dépend peu de la puissance de la note (en haut). En revanche, à la sortie (en bas), l'augmentation périodique de la pression est d'autant plus rapide que l'instrumentiste joue fort, jusqu'à devenir quasi discontinue (flèches vertes). La propagation de cette discontinuité jusqu'à l'oreille de l'auditeur forme une onde de choc, dont le son est «brillant».

de brusques variations de pression dans la colonne d'air, à l'intérieur de l'instrument, qui vont de pair avec l'amplification de la partie aiguë des notes.

Lorsqu'un musicien souffle dans l'embouchure d'un trombone, l'oscillation des lèvres y crée une onde de pression, l'onde sonore. La plupart du temps, l'onde se déforme peu en se propageant à l'intérieur du tube : l'énergie n'est dissipée que par frottement et par échange thermique avec la paroi intérieure du tube, ainsi que par l'émission du son à travers le pavillon. Cette situation est décrite dans le cadre de l'approximation acoustique : on néglige, dans les équations de propagation du son, tous les termes faisant intervenir le carré (et les puissances supérieures) de l'amplitude sonore.

En revanche, lorsque le tromboniste joue très fort, l'amplitude de l'onde est grande et l'on ne peut plus négliger les termes de puissances élevées dans les équations de propagation. Le signal se déforme au cours de sa propagation.

L'enregistrement, à l'intérieur d'un trombone, de l'onde de pression dans le cas d'une note jouée *fortissimo* révèle les détails de cette déformation : à mesure que l'onde se propage dans le tuyau, l'augmentation de la pression, à chaque période de l'onde, est de plus en plus rapide. Pour de très fortes amplitudes de l'onde, la variation de la pression devient quasi discontinue. La propagation de cette discontinuité est une onde de choc : le signal émis à l'extérieur de l'instrument, qui est entendu par l'auditeur, est une succession d'impulsions. Lorsque l'on décompose un tel signal en ondes sinusoïdales, de fréquences multiples de la fréquence fondamentale de la note émise (les harmoniques), l'amplitude des harmoniques aiguës est grande, et les auditeurs entendent un son brillant.

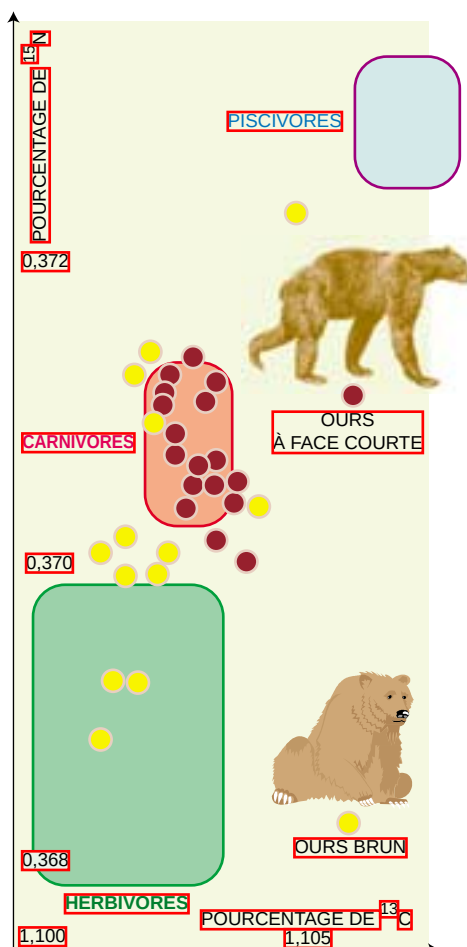
La connaissance de ces phénomènes permet la synthèse de sons cuivrés avec un instrument virtuel formé de modèles numériques des lèvres et du trombone : l'onde qui se propage dans la coulisse se déforme, l'amplitude des harmoniques graves diminuant et celle des harmoniques aiguës augmentant. Après le filtrage des fréquences les plus basses, qui simule la propagation dans le pavillon et le rayonnement du son vers l'auditeur, nous obtenons des signaux sonores cuivrés, identiques à ceux qui sont produits par l'instrument d'orchestre. Nous pouvons alors varier les nuances, et produire, paradoxalement, des sons cuivrés... *pianissimo*.

Joël GILBERT, Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine, Le Mans
Régis MSALLAM, IRCAM, Paris

Le menu de l'ours

L'ours à face courte, aujourd'hui disparu, était carnivore.

Comment vivaient nos ancêtres chasseurs-cueilleurs? Quels animaux chassaient-ils et par qui étaient-ils menacés? Pour répondre à ces questions, et notamment distinguer les animaux carnivores et végétariens, nous cherchons à reconstituer le comportement alimentaire de nombreuses espèces aujourd'hui disparues. Depuis Georges Cuvier, les paléontologues étudient les traits caractéristiques des organes fossilisés, tels que dents et mâchoires, qui dénotent les habitudes de vie, notamment alimentaires des animaux. Dans le cas de l'ours à face courte géant (*Arctodus simus*),



Les pourcentages de carbone 13 et d'azote 15 dans le collagène fossile des ours géants à face courte (ronds marron) indiquent qu'ils étaient carnivores (zone rouge), comme les loups ou les lions. L'ours brun actuel (ronds jaunes), en revanche, adapte son régime alimentaire aux ressources : il est végétarien (zone verte), carnivore, voire piscivore (zone bleue), selon son environnement.

qui vivait en Amérique du Nord jusqu'il y a environ 10 000 ans, l'analyse morphologique de ces éléments donne lieu à des interprétations opposées. L'analyse du collagène fossile de cet animal permet de trancher (le collagène est la principale protéine des os) : il était carnivore.

L'ours à face courte géant de 800 kilogrammes mesurait deux mètres au garrot. Que mangeait-il ? De la viande, affirment des paléontologues qui se fondent sur la ressemblance entre son museau court, qui lui donne son nom, et celui de félins, carnivores : le museau des omnivores est allongé par le développement des molaires, dents broyeuses. Non, contestent d'autres, il était végétarien : les muscles étaient raccordés sur sa mâchoire comme sur celle de son lointain cousin actuel, l'ours à lunettes qui se nourrit de végétaux. Le même mode

de mastication impliquerait un régime identique pour les deux espèces.

En parallèle avec P. Matheus, de l'Université d'Alaska, nous avons mesuré les proportions relatives des isotopes du carbone et de l'azote (les isotopes d'un élément diffèrent par le nombre de neutrons que contient leur noyau) du collagène fossilisé dans des os d'ours à face courte de différents sites d'Alaska et du Yukon. Les rapports entre le carbone 13 et le carbone 12, d'une part, et l'azote 15 et l'azote 14, d'autre part, au sein du collagène, dépendent de ceux des protéines contenues dans la nourriture, donc de sa nature. Ainsi, les rapports isotopiques distinguent-ils les herbivores, les carnivores et les piscivores.

Les signatures isotopiques du collagène des ours à face courte géants sont proches de celles des carnivores actuels,

mangeurs d'animaux terrestres : les ours suivaient donc un régime plutôt carné. Cette spécialisation alimentaire est confirmée par la comparaison avec l'ours brun actuel. Tandis que la signature isotopique de l'ours à face courte dépend peu du site d'origine des fossiles, celle de l'ours brun indique un régime variable en fonction des ressources disponibles : carnivore, herbivore, voire piscivore (consommation de saumon).

Les proies potentielles de l'ours à face courte abondaient : herbivores de grande taille, tels les mammoths et les paresseux géants, ou ongulés (rennes, bisons, chevaux, chameaux). Sa taille gigantesque lui permettait-elle de courir pour les attraper ? Peut-être se contentait-il de la consommation de charognes.

Hervé BOCHERENS, UMR 162, CNRS-INRA-Université Paris 6

Une anomalie génétique du cortex

Un gène nécessaire à la migration des neurones pendant l'embryogenèse a été isolé.

Les circonvolutions cérébrales augmentent la surface du cortex, la surface des aires cérébrales fonctionnelles et le nombre des connexions entre neurones, améliorant les performances cognitives. Chez quelques personnes, le cerveau est « lisse », dépourvu de circonvolutions ; chez d'autres, les circonvolutions existent, mais

le cortex est malformé. Vincent des Portes, Jamel Chelly et leurs collègues de l'équipe de l'Unité INSERM U 129 ont découvert un gène responsable de ce type de pathologies.

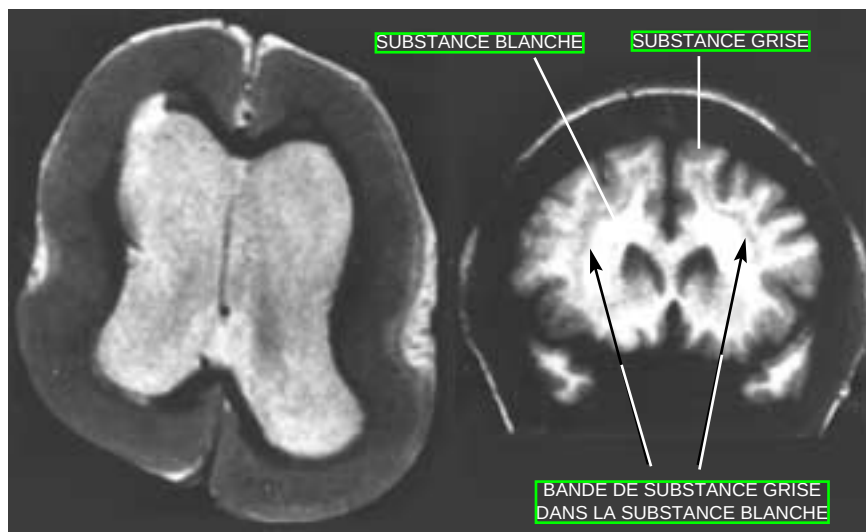
Au cours de l'embryogenèse, les neurones qui ont cessé de se multiplier migrent. Beaucoup de neurones meurent au cours de l'embryogenèse ; c'est le cas de la moitié des neurones moteurs. Seuls subsistent ceux qui trouvent une cible (un autre neurone), les autres dégèrent. Lorsque les mécanismes d'apoptose (le suicide des cellules) et de migration sont normaux, les neurones se regroupent dans le cortex, tandis que la substance blanche, sous-corticale, contient uniquement les axones, les prolongements

des corps cellulaires entourés de myéline (la myéline, qui participe à la conduction des signaux neuronaux, confère à la substance blanche sa couleur).

Parmi les rares enfants où ces phénomènes de migration des neurones sont anormaux, les neuropédiatres des équipes de Jean-Marc Pinard, à l'Hôpital Raymond Poincaré, à Garches, et de Jacques Motte à Reims, ont décrit, grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), un nouveau syndrome : dans une même famille, des garçons sont atteints de lissencéphalie (le cortex est dépourvu de circonvolutions) et des filles ont des hétérotopies en bandes, ou double cortex. Dans cette dernière pathologie, le cortex est apparemment normal, mais des bandes de substance grise, dites hétérotopiques, sillonnent la substance blanche (la substance grise est constituée des corps neuronaux) ; au cours de l'embryogenèse, les neurones n'ont pas migré correctement et se sont arrêtés avant d'atteindre leur but, au sein de la substance blanche. L'identification de plusieurs mutations génétiques dans les familles atteintes a conduit l'équipe de l'INSERM à démontrer la responsabilité du gène dénommé *Doublecortine* dans ces pathologies.

Les garçons ont un retard mental profond et des crises d'épilepsie réfractaires à tout traitement. Chez les filles, la variabilité est extrême : certaines sont quasi asymptomatiques, avec un retard mental léger, et une ou deux crises d'épilepsie dans l'enfance ; d'autres ont des symptômes aussi graves que les garçons.

Quelle est l'origine de cette variabilité ? Elle tient à la localisation du gène *Doublecortine* sur le chromosome X. Chez les filles, l'un des deux chromosomes X



Images obtenues par résonance magnétique d'un cerveau présentant une lissencéphalie (à gauche, coupe horizontale) et d'un cerveau ayant une hétérotopie en bandes (à droite, coupe verticale). Sur l'image de droite, les circonvolutions existent, mais deux bandes de substance grise traversent la substance blanche (les flèches).

est inactivé dans chaque cellule de l'œuf (au stade de quelques cellules) de façon aléatoire, mais définitive. Si, dans l'embryon précoce, c'est le chromosome qui porte la mutation qui est inactivé, le chromosome normal s'exprime, et cette cellule (et ses cellules filles) se développe normalement. Au contraire, dans les cellules issues d'une cellule où le chromosome X sain a été inactivé, et où le gène *Doublecortine* est anormal, aucune des deux copies du gène ne s'exprime : la migration est incorrecte. Chez les garçons, qui n'ont qu'un chromosome X, le gène *Doublecortine* qui s'exprime est toujours anormal : les anomalies de migration (cortex lisse et trop épais) sont plus graves que chez les filles.

Ce gène code une protéine inconnue ; c'est une protéine vraisemblablement intracellulaire qui ressemble, en partie, à une protéine connue dont l'activité est régulée par la concentration en ions calcium. Bien que l'on sache que les ions calcium participent à la migration des cellules et à l'apoptose, on ignore encore les mécanismes physiopathologiques déclenchés par les mutations du gène *Doublecortine*.

Les hétérotopies en bandes et les lissencéphalies sont parfois héréditaires, mais nombre de ces maladies sont sporadiques. Elles sont transmises par une cellule de la reproduction mutée, le plus souvent par un spermatozoïde ayant subi une mutation aléatoire sur le gène *Doublecortine*. Lorsqu'une fille hérite de cette mutation, elle n'a parfois qu'une mince bande de cortex hétérotopique observée à l'IRM, mais peu de signes cliniques. En revanche, devenue adulte, elle risque d'avoir des garçons ayant une lissencéphalie et des filles ayant des hétérotopies en bandes plus ou moins graves.

Connaissant ce nouveau gène du développement, les généticiens vont fabriquer des modèles animaux où le gène *Doublecortine* sera inactivé. Ce nouveau gène sera un élément essentiel pour la compréhension des mécanismes de l'organisation du cortex. De surcroît, la recherche des mutations potentielles que contient ce gène offrira un diagnostic moléculaire de la maladie. Un conseil génétique pourra établir si les filles d'une famille atteinte portent ou non le gène muté, et un diagnostic prénatal sera offert aux familles qui le souhaitent.

Pourtant, aux questions éthiques que pose tout diagnostic prénatal, s'ajoute la grave question du pronostic de la gravité de l'atteinte chez les filles : si l'anomalie est toujours dramatique chez un garçon, chez une fille, le handicap est parfois léger. On n'a aucun moyen de prévoir la gravité de la maladie qui résulte d'une anomalie génétique localisée sur l'un des deux chromosomes X.



La science, nous dit-on, est «objective» et «neutre». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de «l'irrationnel».

Le puritanisme rationaliste, pourtant, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Maints exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites «occultes».

Pierre Thuillier est philosophe et historien des sciences. Il enseigne à l'université Paris VII.

code 2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 98

BELIN

La téléportation quantique

Copie d'une particule à distance.

Albert Einstein, fondateur de la relativité, n'admettait pas l'idée d'une action instantanée à distance. Or la mécanique quantique prévoit des actions de ce type. De nombreuses expériences confirment aujourd'hui que, dans une paire de photons dont les états quantiques sont corrélés, la mesure de l'état d'un photon entraîne instantanément une modification de l'état de l'autre photon, quel que soit leur éloignement.

Une paire de photons corrélés peut être représentée par une paire de cartes, l'une noire, l'autre rouge. Donnons ces cartes retournées à deux voyageurs qui s'éloignent. Le premier voyageur décide de retourner sa carte et trouve une carte rouge. Nécessairement, l'autre carte est noire. On comprend que si le premier voyageur ne prévient pas le second de la couleur de sa carte, ce dernier ne peut pas savoir qu'il la verra noire s'il la retourne. Comme le résultat de la mesure du premier voyageur est imprévisible (il aurait pu avoir une carte noire) et que le premier voyageur ne communique pas avec le second à une vitesse infinie, le second ne peut recevoir instantanément l'information.

Le corrélation quantique diffère cependant de cette analogie classique :

la couleur de la carte est n'importe quel mélange de rouge et de noir et cette couleur n'est pas fixée tant que la carte n'est pas retournée ; puis, lorsque la carte est retournée, elle affiche une couleur, qui détermine la couleur opposée de l'autre carte (par exemple, rouge + noir pour la première carte devient, pour la seconde carte, rouge - noir).

Le résultat d'une mesure quantique étant fondamentalement impossible à prédire, cette action à distance, non locale, ne peut être utilisée pour propager une information déterminée plus vite que la lumière. Il est néanmoins possible d'utiliser les corrélations pour «téléporter» un photon à quelques centimètres de distance, comme viennent de le faire Anton Zeilinger et ses collègues de l'Université d'Innsbruck.

Imaginons qu'Alice veuille envoyer un message à son ami Bernard, à l'aide d'un canal de téléportation constitué d'une paire de photons corrélés émis par une source extérieure ; Alice et Bernard reçoivent chacun un élément de la paire. Lorsque le photon que détient Alice est modifié, le photon que détient Bernard est modifié instantanément. Ce lien invisible entre Alice et Bernard est fragile : pour maintenir la corrélation, les photons doivent être isolés de leur environnement.

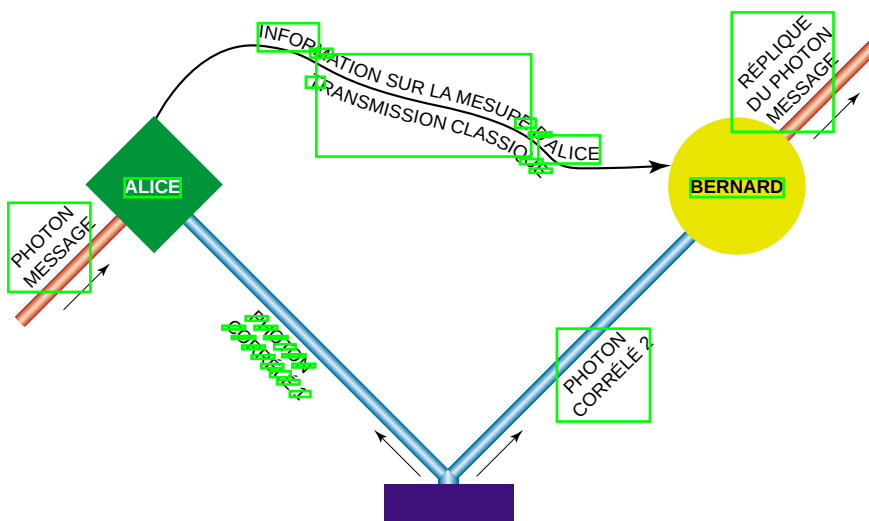
Une tierce personne donne à Alice un photon dont l'état constitue le message. Selon les lois de la mécanique quantique, Alice ne peut connaître le message car toute mesure modifie l'état quantique du système mesuré. Dans ces conditions, comment Alice peut-elle transmettre le message à Bernard ?

Alice mélange de manière indiscernable le photon message et le photon de la paire qu'elle détient. Ce système peut être dans quatre états quantiques possibles. Dans l'expérience réalisée à Innsbruck, Alice ne peut connaître l'état du système que lorsque celui-ci est dans l'un des quatre états. Quand elle fait la mesure et que le système est effectivement dans cet état favorable, elle connaît l'état du système. Au cours de sa mesure, le système est perturbé et le système est irrémédiablement détruit. Cependant, en raison de la corrélation de la paire de photons, la photon de Bernard est instantanément modifié, conformément à la mesure d'Alice.

Bernard ignore toutefois que son photon a été modifié et ne sait encore rien du message. Alice lui transmet alors, par un moyen de télécommunication classique, le résultat de sa mesure (qui à lui seul est insuffisant pour reconstruire le message). Grâce à l'information sur cette dernière, Bernard peut effectuer une expérience pour transformer le photon corrélé qu'il a reçu en un photon identique au photon message. Comme les photons sont indiscernables, sauf par leur état, le photon message que détenait Alice a été «téléporté» à Bernard. Notons cependant que, pour reproduire le message, Bernard a eu recours au résultat de la mesure d'Alice, transmis via un moyen de communication classique, de sorte que la copie de la particule peut se faire au mieux à la vitesse de la lumière.

L'expérience ne fonctionne que lorsqu'Alice reçoit simultanément sur son détecteur le photon message et le photon corrélé, émis indépendamment, ce qui se produit seulement pour une faible fraction des paires reçues. De surcroît, nous avons vu que l'information acquise par Alice, dans la mesure du système composé des deux photons, n'est suffisante pour reconstituer le message que dans un cas sur quatre. C'est un peu comme si, dans *Star Trek*, lors de la téléportation de Monsieur Spock, seuls un quart de ses atomes, pris au hasard, étaient téléportés.

Si cette expérience confirme une nouvelle fois la non-localité de la mécanique quantique, son intérêt pratique est limité. D'une part, un moyen de communication classique est nécessaire, ce qui empêche la simultanéité. D'autre part, seuls des photons ont été ainsi téléportés. Toutefois, on entrevoit maintenant la téléportation d'atomes, ce qui serait plus intéressant, et ces résultats pourraient être utilisés dans le domaine de la cryptographie quantique, une technique de transmission de messages dont la confidentialité est absolue.



Pour téléporter un photon message entre Alice et Bernard, on utilise une paire de photons corrélés. Alice reçoit le photon message et le premier photon corrélé de la paire. Lorsque ces photons arrivent en même temps, elle peut mesurer l'état quantique de la combinaison des deux particules. Cette mesure perturbe le photon corrélé 1. Comme le photon 2 est corrélé au photon 1, son état est instantanément modifié. Alice transmet alors classiquement à Bernard l'information sur la mesure effectuée. À l'aide de cette information, Bernard modifie son photon corrélé de sorte qu'il devienne une réplique exacte du photon message.

Les grands ouvrages

Notre époque se passionne pour le microscopique : micromachines, microtransistors, gènes, protéines... Nous passons, blasés, devant les grands ouvrages et nous ne nous émerveillons plus comme à l'époque de Louis Figuier ou de Camille Flammarion, quand furent construits la tour Eiffel ou le canal de Suez. Pourtant les tours gigantesques se perdant dans les nuages ou les ponts enjambant d'immenses détroits sont des constructions comme on n'en a jamais vues.

Ce dossier présente quelques-unes des réalisations les plus grandioses du génie civil moderne. L'Asie, avec son rapide développement économique, a battu des records. En Chine, le colossal barrage des Trois Gorges, sur le fleuve Yangzi, rivalise avec d'autres réalisations gigantesques, en Malaisie, au Japon et à Hong Kong. Leurs dimensions inégalées mettent à l'épreuve les producteurs de matériaux (on évoquera les progrès de l'industrie du béton à titre d'exemple), comme les cabinets d'ingénieurs. L'imagination ne manque pas et les limites techniques sont sans cesse dépassées.

Le béton, matériau moderne

BERNARD CLAUD • FRANÇOIS SAUCIER • LAURENT BARCELO

Les bétons modernes sont beaucoup plus résistants que leurs précurseurs antiques, parce que l'on comprend mieux les réactions chimiques qui régissent leur comportement

Le béton est le produit le plus consommé, après l'eau potable : avec plus de cinq milliards de mètres cubes produits annuellement dans le monde, il dénote l'état de développement des pays. Toutefois le manque de soin apporté à sa réalisation en a fait le symbole d'un environnement dégradé, de grisaille urbaine. C'est injuste, car le béton moderne n'est pas nécessairement gris : il en existe des variétés blanches, noires ou de diverses couleurs, et de textures variées. En outre, le béton est façonnable à volonté, il ne s'oxyde pas, demande peu d'entretien, il est fiable, peu sensible au feu et peu coûteux.

Matériau du XX^e siècle par excellence, le béton n'est pourtant pas une invention humaine : les roches que sont les poudingues et les brèches sont des bétons naturels, formés de galets respectivement arrondis ou non par le charriage dans les fleuves et liés par un ciment naturel. Les Phéniciens en avaient repris le principe, associant de la chaux (l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et du sable pour réaliser des sols ou des citernes. Le véritable béton, composé de ciment, de sable et aussi de granulats, est une invention des Romains : ils ajoutaient des briques concassées, riches en silice (l'oxyde de silicium SiO_2) et en alumine (l'oxyde d'aluminium Al_2O_3), à de la chaux (l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ; ces briques réagissaient avec la chaux et avec l'eau par une réaction «pouzzolanique» (du nom de Pouzzoles, un petit village proche du Vésuve). Les Romains avaient également constaté qu'en mélangeant la chaux à la pouzzolane (un minéral d'origine volcanique, riche en silice) on obtenait des mortiers qui prenaient même sous l'eau.

La réaction pouzzolanique conférait une résistance mécanique et une

durabilité qui restèrent longtemps inégalées, mais les matières premières étaient en quantité insuffisante pour que le béton soit communément utilisé. Son emploi ne se développe qu'au début du XIX^e siècle, avec la découverte du ciment moderne.

Le succès du matériau résulte de plusieurs de ses propriétés : il est modelable à volonté (contrairement à la pierre de taille) ; sa qualité est constante ; il permet des constructions rapides, parce que sa préparation est plus rapide que la taille de la pierre ; on améliore ses propriétés mécaniques en y noyant des renforts métalliques.

Le béton est-il aujourd'hui un matériau campé dans sa maturité ? Non : il s'embellit, ses qualités s'améliorant à l'aube d'un siècle qui en verra de nouvelles utilisations. Nous examinerons ici les avancées techniques qui seront les clefs des applications de demain.

En conservant le principe du béton, matériau à base de granulats, d'eau et d'un liant, l'industrie a mis au point des matériaux spéciaux, tels les bétons de polymères pour la décoration, ou des bétons à applications spéciales : antiacides, réfractaires, etc. Toutefois l'essentiel du béton de génie civil reste à base de ciment Portland, le ciment le plus commun, inventé et breveté en 1824. On l'obtient en cuisant dans des fours, à 1450°C, des mélanges de roches calcaires, siliceuses et alumineuses.

Une pâte qui durcit

Nous verrons comment, à partir d'un mélange intime d'un liant (généralement du ciment), d'eau et de granulats, l'industrie améliore les propriétés du béton en ajoutant de faibles quantités d'adjuvants.

Le ciment est l'élément actif du mélange, parce qu'il forme avec l'eau,

lors du malaxage, une pâte qui enrobe les granulats (généralement, ceux-ci sont chimiquement inertes). Dès que l'eau et le ciment entrent en contact, une réaction de mouillage et de dissolution a lieu. Elle est suivie par une période de dormance qui, selon les ciments, dure quelques minutes à quelques heures : la pâte conserve alors sa plasticité, de sorte qu'on peut la mettre en place dans des moules ou dans des coffrages. Puis une réaction chimique d'hydratation (nous en verrons plus loin le détail) chauffe la masse et augmente sa viscosité : c'est le début de prise. La masse de ciment hydraté qui se forme alors autour des granulats prend progressivement une cohésion qui confère ses propriétés mécaniques au matériau. Cette réaction est la clef des performances. Les physico-chimistes ont appris à la maîtriser et à la modifier, à l'aide de divers ajouts.

La taille des granulats définit les types de bétons : dans les bétons courants, les granulats ont un diamètre qui atteint 25 millimètres ; entre 10 et 5 millimètres, on les qualifie de microbéton ; au-dessous de cinq millimètres, de mortier. Le béton se transporte par des camions-toupies, pour le béton prêt à l'emploi, et par des pompes. Il est mis en œuvre selon divers procédés : simple coulage, coulage sous vibrations, tringlage (une opération de finition, également nommée réglage ou aplanissage, qui est une sorte de lissage de la surface), projection, extrusion... Chacune de ces méthodes impose des caractéristiques d'écoulement particulières du béton.

Enfin, après un certain temps, quand le béton a une résistance mécanique suffisante, on décoffre. Le matériau, devenu solide, est poreux et perméable ; il continue de durcir et de perdre de l'eau tant que son humidité relative interne reste supérieure à 80 pour cent.

Matériau à rupture fragile, le béton résiste mal aux efforts de traction : c'est pour améliorer sa résistance à ces contraintes qu'on lui ajoute des renforts métalliques inertes (fers passifs) ou des renforts actifs (précontraintes).

Hydratation contrôlée

Pourquoi le béton prend-il progressivement ? Pourquoi chauffe-t-il lors de la prise ? Comment retarder ou accélérer cette dernière ? Comment augmenter les performances des bétons ? Le mécanisme de prise est étudié depuis un siècle environ. Il n'est pas complètement élucidé, surtout parce que les matières premières sont excessivement variées : souvent extraites à proximité des sites de fabrication, elles contiennent des impuretés, qui modifient l'hydratation.

En proportion comprise entre 60 et 80 pour cent du volume total de béton, les granulats ont un rôle déterminant sur les propriétés du matériau. Les performances mécaniques sont d'autant meilleures que le squelette minéral est compact : les granulats doivent avoir des diamètres différents, afin que les plus petits s'insèrent dans les interstices

formés par les plus gros. Pour cela, on mélange des granulats fins (sables et sablons, de diamètre maximal égal à trois millimètres environ) et de gros granulats, gravillons et graviers, de diamètre compris entre 5 et 30 millimètres. Des courbes, telles celles des ingénieurs français M. Faury ou G. Dreux, indiquent les proportions de granulats adéquates qui optimisent la compacité des mélanges. Toutefois les granulats de bonne qualité sont de plus en plus difficiles à trouver, parce que les contraintes environnementales limitent l'accès aux sources potentielles.

Le ciment est souvent confondu avec le béton dont il est la matière première active. C'est une poudre fine, que l'on doit protéger de l'humidité, pendant son transport et son stockage, afin qu'elle ne réagisse pas prématurément avec l'eau. Elle est un mélange de silicates de calcium (les silicates sont les composés minéraux qui contiennent des ions SiO_4^{4-}), d'aluminate de calcium, et d'aluminate de fer et de calcium (les aluminates sont des composés qui contiennent les ions AlO_4^{3-}).

L'hydratation du ciment, qui libère beaucoup de chaleur, engendre le réseau

qui enserre les granulats : le silicate de calcium anhydre (prépondérant dans le ciment) se transforme en silicate de calcium hydraté et en portlandite (ou hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2)). Le silicate de calcium hydraté confère au béton ses performances en établissant un réseau continu dans tout le matériau : on cherche à favoriser sa formation. En revanche, la portlandite ne contribue pas au réseau : on tend à l'éviter. Selon les propriétés recherchées, la quantité de ciment varie entre quelques kilogrammes par mètre cube (un pour cent, en volume) et plusieurs centaines de kilogrammes par mètre cube (15 pour cent).

L'eau n'assure pas seulement la réaction d'hydratation : elle rend le mélange plastique, ce qui facilite le malaxage et la mise en place. La proportion d'eau dans un béton est importante : plus il y a d'eau, plus le mélange se travaille facilement, mais moins le béton final est résistant, parce que plus poreux.

De surcroît, la qualité de l'eau détermine la qualité du béton : divers polluants participent à des réactions indésirables qui diminuent la résistance mécanique ou la durabilité du



1. CES DEUX PONTS, sur la rivière de l'Elorn, près de Brest, ont été construits à 50 ans d'intervalle. L'allégement de la structure du pont récemment construit, en arrière-plan, montre les progrès du béton : les bétons modernes sont dix fois plus résistants que les bétons du début du siècle.

béton. Quand l'eau contient trop de sulfates, par exemple, des aluminosulfates de calcium hydratés se forment au sein du réseau, déjà établi, de silicates de calcium hydratés ; en provoquant l'expansion de ce réseau, ils disloquent le béton.

L'air, enfin, est un constituant trop négligé, alors que sa proportion atteint trois pour cent dans les bétons où on ne l'introduit pas intentionnellement. Cet air détermine la résistance au gel : dans les pays où l'hiver est rigoureux, on en insère volontairement un volume supérieur (4 à 8 pour cent), grâce à un adjuvant ajouté lors du gâchage. Nous verrons comment l'air permet le déplacement de l'eau dans le béton par temps très froid (ce qui évite la rupture), mais réduit la résistance mécanique.

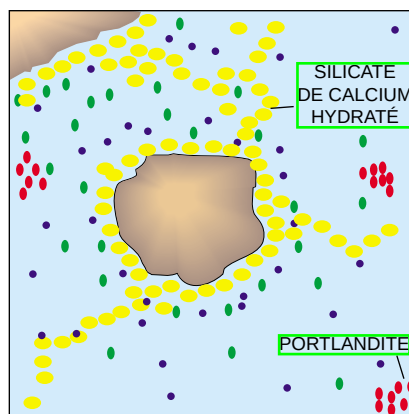
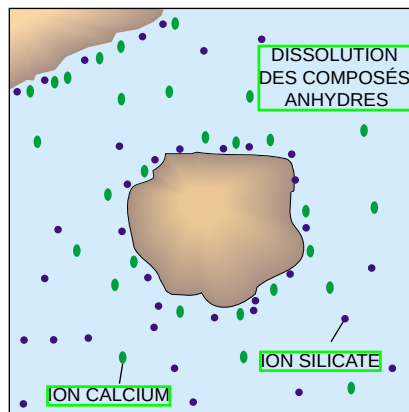
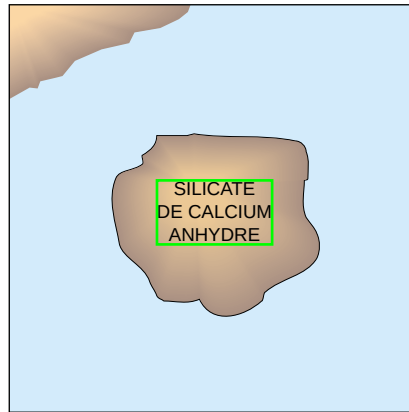
Les additifs des performances

Aux ingrédients de base, l'industrie du béton ajoute des composés variés, pour réduire les coûts ou adapter les performances. Ainsi certains sous-produits industriels qui ont des propriétés liantes sont utilisés en remplacement ou en complément du ciment. Des laitiers de haut-fourneau (composés de silice, de chaux, d'alumine et d'un peu de fer) sont broyés et mélangés à du ciment Portland pour former le «ciment au laitier». Les cendres volantes (plus riches en silice que le ciment Portland, mais moins riches en calcium) récupérées dans les gaz de combustion des centrales au charbon ont également des propriétés liantes, quand on les utilise avec du ciment Portland ; certaines cendres volcaniques, tout comme les cendres d'écorce de riz, sont aussi de bons liants pouzzolaniques (ils s'hydratent en présence de chaux).

L'intérêt des ajouts cimentaires est économique et technique. D'une part, leur utilisation dans le béton permet de valoriser des sous-produits. D'autre part, ils réduisent la viscosité, la chaleur d'hydratation ou la sensibilité à diverses agressions chimiques.

Les fumées de silice, un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages, sont des additifs particulièrement utiles, parce que leur diamètre est dix fois inférieur à celui des grains de ciment : leurs particules, qui s'insèrent entre les grains de ciment, augmentent la compacité du matériau et, donc, sa résistance. En outre, la fumée

de silice réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation pour engendrer une quantité supplémentaire de silicate de calcium hydraté, ce qui augmente à la fois la résistance mécanique, l'imperméabilité et la durabilité. Toutefois l'utilisation des fumées de silice



2. LA PRISE DU BETON résulte de la formation de silicate de calcium hydraté à la surface des grains de ciment. En présence d'eau, les grains de ciment anhydre, qui sont composés de silicate de calcium anhydre (*en haut*) et d'aluminate de calcium et de fer anhydre, se dissolvent, puis s'hydratent (*au centre*). Toutefois le silicate de calcium hydraté et la portlandite (de l'hydroxyde de calcium hydraté), peu solubles, précipitent, provoquant une dissolution supplémentaire des composés anhydres. Le silicate de calcium hydraté qui se dépose ainsi forme un réseau continu qui enserré les grains de sable et assure la cohésion du béton (*en bas*).

est limitée, en raison de leur coût : elles sont souvent plus coûteuses que le ciment Portland !

Les adjuvants, utilisés en petites quantités, modifient les propriétés du béton, frais ou à l'état durci. Une petite proportion d'un réducteur d'eau, tel les lignosulfonates (des sous-produits de l'industrie du papier), évite l'aggrégation des particules de ciment : le béton reste fluide avant la prise.

Les superplastifiants, qui ont eu un impact considérable sur le génie civil au cours des 20 dernières années, ont la même action, mais ils sont encore plus efficaces : ces polymères organiques de forte masse moléculaire, par exemple les naphthalène sulfonates ou des macromolécules fabriquées spécialement, augmentent la fluidité à quantité d'eau égale. On les utilise afin de réduire la quantité d'eau tout en conservant une bonne plasticité.

Lorsque le béton doit être transporté sur de longues distances, que sa mise en œuvre est difficile ou qu'elle s'effectue par temps chaud, on utilise un retardateur de prise : ces molécules, tels des sucres, de l'acide citrique ou des phosphates, ralentissent la formation du silicate de calcium hydraté en se liant au calcium.

À l'inverse, en hiver ou pour améliorer la cadence sur un chantier de préfabrication, on utilise des accélérateurs de prise : des chlorures ou des nitrates de calcium, par exemple, libèrent des ions calcium qui augmentent la vitesse de croissance du silicate de calcium hydraté.

Plusieurs laboratoires explorent aujourd'hui le mécanisme de cette accélération. Lorsque le silicate de calcium hydraté a précipité à la surface des grains, il bloque les molécules d'eau, qui ne diffusent alors que lentement vers l'intérieur des grains. Pour des raisons encore mal comprises, les ions chlorure et nitrate favorisent la diffusion de l'eau et une croissance du silicate de calcium hydraté en volume, plutôt qu'en surface.

D'autres adjuvants ont une action esthétique : les colorants ajoutés au béton frais teintent durablement toute la masse du matériau. Toutefois ces adjuvants, comme les précédents, modifient parfois les réactions de prise ; Par exemple, le noir de fumée (du carbone presque pur) adsorbe les autres adjuvants et annule leurs effets : on doit les surdoser ou réduire la quantité de noir de fumée. Pour

obtenir une texture spéciale, on applique un désactivant, ou retardateur de surface, à la surface, afin d'éviter le durcissement des premières millimètres. Une fois la masse prise, on nettoie la partie superficielle pour exposer les granulats, choisis pour leurs qualités esthétiques.

Enfin l'emploi de fongicides ou de bactéricides dispersés dans la masse ou dans les couches superficielles ralentit le développement des micro-organismes dans les pores du béton : on évite des contaminations dans les corps de ferme ou dans les usines de produits alimentaires ou pharmaceutiques.

Un matériau vivant

L'ajout de composés variés au béton a ainsi imposé des études qui ont montré à quel point le béton est un matériau «vivant». Sa structuration progressive, de l'état plastique à celui de roche artificielle, se caractérise par le développement d'une masse hydratée, en grande partie composée de silicate de calcium hydraté, mais cette formation n'est que la conclusion d'une série d'effets.

La prise s'effectue en plusieurs étapes. La première est la diminution de l'eau présente entre les particules

solides, consommée par l'hydratation, et par la «contraction Le Chatelier», qui rapproche les grains. Cette contraction, du nom du physicien français Henry Le Chatelier (*voir l'encadré ci-dessous*) correspond à la création de vides : au total, le volume final de ciment hydraté est inférieur d'environ 10 pour cent à la somme du volume d'eau et du volume de ciment anhydre.

Puis les particules solides et les hydrates naissants s'agrègent ; les cristaux hydratés qui croissent finissent par se rencontrer et par se souder, de sorte qu'un réseau s'étend progressivement dans tout le matériau. Quand l'hydra-

Henry Le Chatelier et le ciment

Henry Le Chatelier fut le premier physico-chimiste à s'intéresser au béton. Né en 1850 à Paris, il effectua, comme son père, ses études supérieures à l'Ecole polytechnique. Sorti deuxième de sa promotion, il passa ensuite trois années à l'Ecole des mines de Paris. À partir de 1895, il fut le conseiller scientifique de la Société Lafarge. De son œuvre, on retient surtout son action en faveur de l'introduction de la science dans le milieu industriel, ses études du grisou, de la chaux, des plâtres et des ciments, de la mécanique chimique, de la chimie industrielle, de la pyrométrie.

Sa thèse, soutenue en 1887,

portait sur les matériaux hydrauliques, tel le plâtre. Il découvrit que, quand on chauffe le gypse (du sulfate de calcium hydraté, de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) à une température de 150 °C, on ne forme pas le composé anhydre CaSO_4 (l'«anhydrite»), qui n'apparaît que vers 200 °C, mais un sulfate de calcium faiblement hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$, ou semi-hydrate. C'est le plâtre usuel.

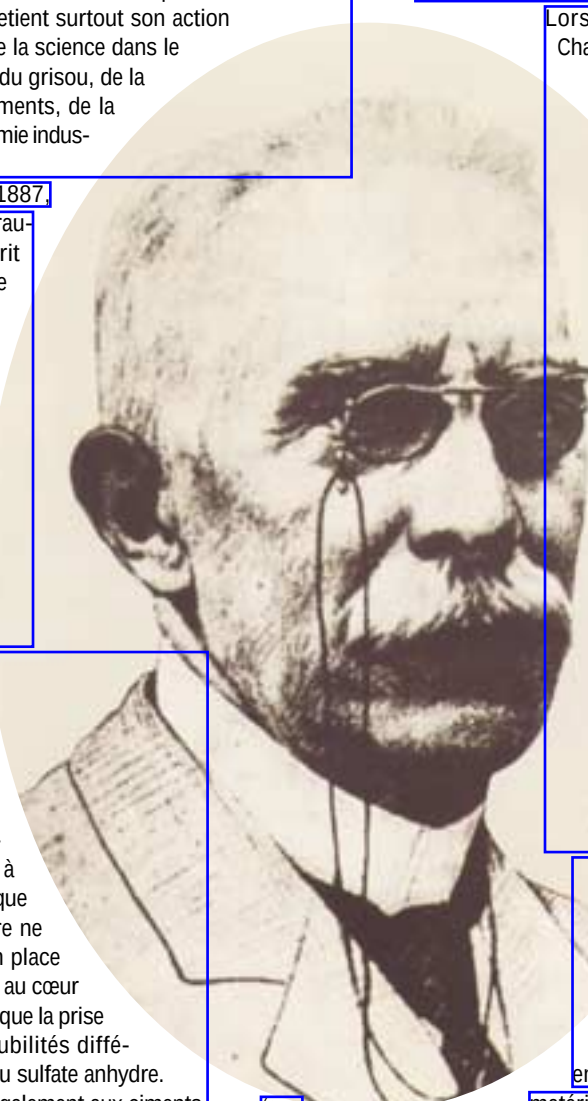
Suite à cette découverte, il s'intéressa à un fait curieux : l'hydratation du plâtre conduit à la formation d'une masse d'hydrates douée de caractéristiques mécaniques, tandis que l'hydratation de la chaux conduit à sa désagrégation. Il s'étonna que les amas d'hydrates de plâtre ne cristallisent pas en lieu et en place de l'anhydrite, mais plus loin, au cœur de la solution. Il montra alors que la prise du plâtre est due à des solubilités différentes du sulfate hydraté et du sulfate anhydre. Cette découverte s'applique également aux ciments.

qui prennent de la façon suivante : les minéraux anhydres se dissolvent dans l'eau ; comme leur solubilité est supérieure à celle du silicate de calcium hydraté, ce dernier précipite ; cette précipitation réduit les concentrations en éléments dissous et provoque une nouvelle dissolution qui engendre une nouvelle précipitation, etc.

Lorsqu'il poursuivit ses études du ciment, Le Chatelier découvrit un autre phénomène auquel il donna son nom : «C'est un fait bien connu, écrit-il, que le durcissement des liants hydrauliques [plâtre ou ciment, par exemple] est accompagné de changements de volume plus ou moins importants ; mais les résultats obtenus jusqu'ici paraissent à première vue assez contradictoires, parce que l'on néglige habituellement de faire une distinction indispensable entre le volume absolu et le volume apparent. On suppose *a priori* qu'ils doivent varier dans le même sens ; cela n'est nullement nécessaire, et même, en réalité, c'est le contraire qui se passe.»

Le Chatelier montra que l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution notable du volume absolu, et que ce phénomène permet de suivre la cinétique d'hydratation du ciment anhydre.

Aujourd'hui cette contraction, qui est resté longtemps un fait ayant peu de conséquences pratiques, devient importante : avec l'essor des bétons hautes performances, qui sont souvent caractérisés par une quantité d'eau réduite, la fissuration engendrée par le retrait dû à l'hydratation du matériau, est à éviter absolument.



Lafarge

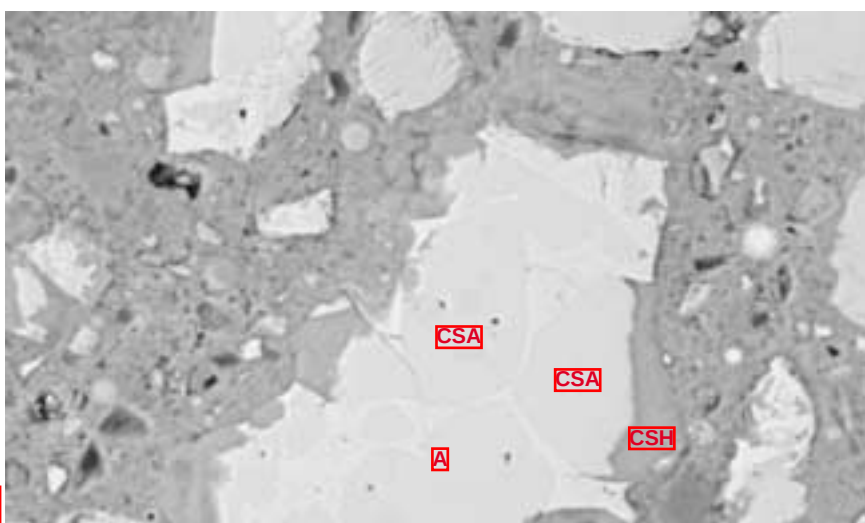
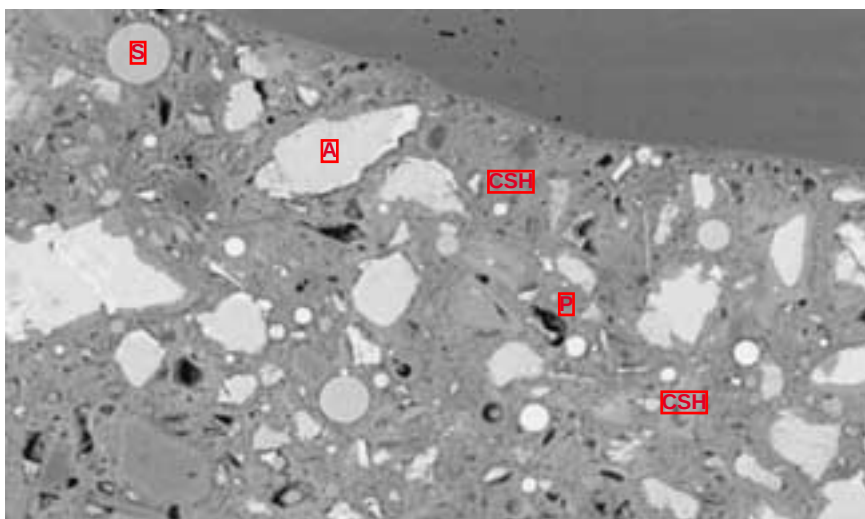
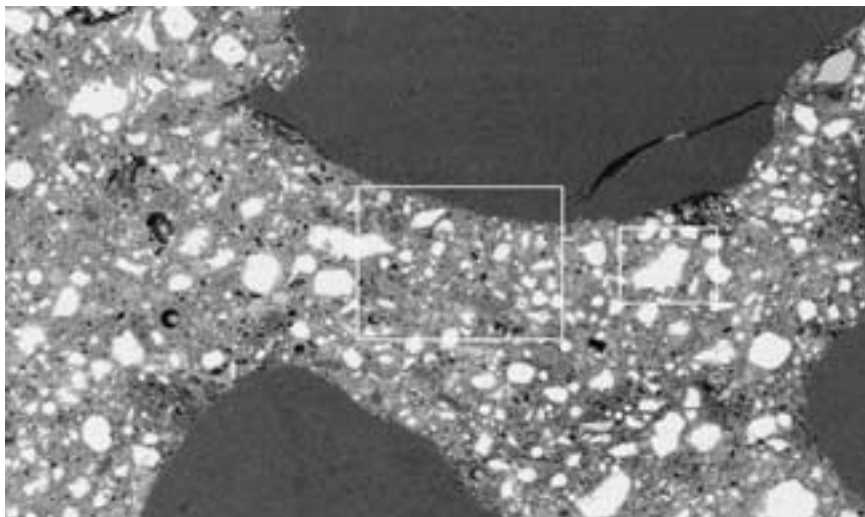


Figure 3

3. STRUCTURE MICROSCOPIQUE DU BETON : sur la micrographie supérieure (*grossissement : x100*), on voit les particules de sable (*formes noires*) dans la matrice de ciment. La zone dans le rectangle de gauche est grossie 500 fois dans l'image centrale : on voit alors l'interface d'un grain de sable et du ciment. Les particules blanches sont des grains de ciment anhydre (A). Les formes rondes sont des particules de silice ou des cendres volantes (S). Les zones grises sont composées de silicate de calcium hydraté (CSH). Enfin, quelques pores apparaissent (P). La troisième photographie (*en bas, grossissement x1 000*) montre l'hydratation en cours sur la zone du petit rectangle à droite de la photographie supérieure. Le gros grain blanc au centre est principalement composé de silicate de calcium anhydre (CSA). Le grain blanc en bas est du ciment non hydraté (A). Le silicate de calcium hydraté qui assure la cohésion du béton est en gris (CSH).

tation se poursuit, les forces de capillarité (les mêmes forces que celles qui créent le ménisque, près du bord, dans un verre d'eau) rapprochent encore les grains et engendrent ce que l'on nomme le retrait d'autodessiccation. Certains physico-chimistes font de ce phénomène la clé de la cohésion du matériau.

Enfin le phénomène d'hydratation ralentit, par manque d'eau et par restructuration de la masse d'hydrates : le silicate de calcium hydraté qui se forme initialement est constitué de couches composées de motifs $(\text{CaO}_6)_x$ et de trois ou quatre tétraèdres SiO_4^{4-} enchaînés ; mais, progressivement, les chaînes de tétraèdres SiO_4^{4-} s'allongent, en libérant des molécules d'eau qui hydratent d'autres silicates restés anhydres.

Le réseau poreux étant interconnecté, l'humidité de l'air ambiant s'équilibre avec celle de l'air présent dans le béton : lentement, quand l'humidité relative est de l'ordre de 70 pour cent, ou rapidement, quand l'humidité relative de l'air à l'extérieur du matériau n'est que de 50 pour cent, l'eau qui n'a pas réagi s'élimine par les pores, ce qui provoque un retrait supplémentaire de séchage et accroît la cohésion du matériau. Ce séchage est toutefois réversible.

Au total, le béton est comme un organisme biologique : il a une jeunesse (pendant les premiers jours), où il se développe et devient un matériau plus ou moins résistant ; puis il mûrit (pendant quelques mois) ; et enfin, selon l'hostilité de l'environnement, sa durée de vie se compte en dizaines d'années ou en siècles. Pendant toute sa vie, il échange de l'énergie thermique et de la matière (eau, dioxyde de carbone, agents agressifs tels que chlore et sels divers) avec l'extérieur. Il se souvient de sa jeunesse : sa qualité, fixée lors de cette période, détermine sa résistance aux maladies ou aux conditions pathologiques.

Un état mesuré

Comment savoir qu'un béton est pris ou qu'il est de bonne qualité ? Comme pour tout autre matériau de construction, le béton doit être caractérisé. Certaines mesures se font à partir du béton frais (avant la prise), et d'autres sur le béton durci.

La première caractéristique mesurable sur le béton plastique est... sa plasticité : en vérifiant sa consistance, on s'assure qu'il a une ouvrabilité et une maniabilité appropriées pour une mise

en place aisée et réussie. Simultanément on vérifie ainsi que la quantité d'eau employée lors du gâchage est appropriée : la plasticité est un indicateur de la justesse du dosage en eau.

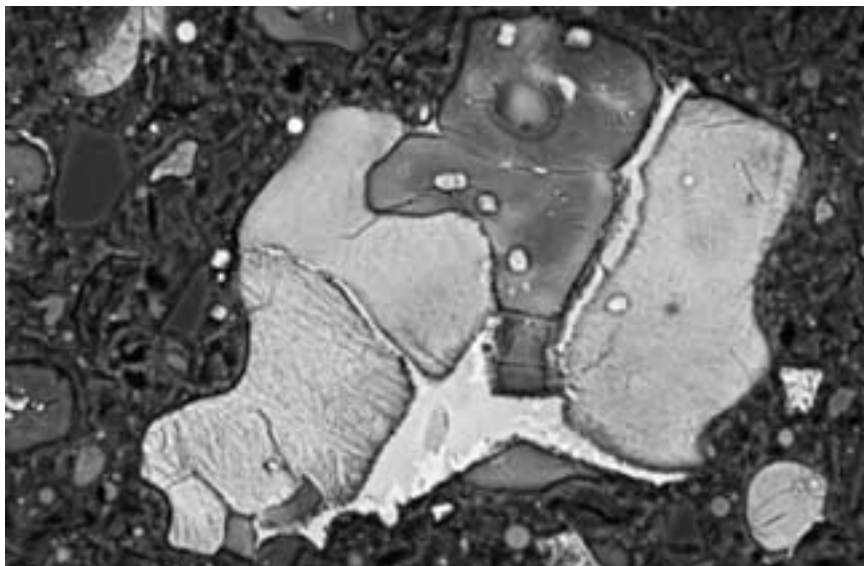
La méthode de mesure la plus couramment utilisée est l'essai d'affaissement : on remplit un cône tronqué, en tôle, avec le béton frais, puis on soulève ce cône pour laisser le béton s'affaisser sous son poids ; on mesure alors l'abaissement du sommet plat du tronc de cône.

Toutefois cette mesure ne caractérise pas entièrement la rhéologie du matériau : deux formules de béton présentant le même affaissement peuvent avoir des ouvrabilités différentes. Aussi les spécialistes ont-ils proposé des tests pour quantifier la plasticité du béton. En laboratoire, on mesure le seuil de cisaillement (la contrainte à partir de laquelle le béton s'écoule) et la viscosité plastique (qui caractérise la vitesse d'écoulement) à l'aide d'un rhéomètre à béton, une cuve de plusieurs litres de capacité, où l'on fait tourner un disque en mesurant la résistance à la rotation.

Sur le béton frais, on mesure également la teneur en air, qui détermine, nous l'avons vu, la tenue au gel : dans la méthode pressiométrique, on applique une pression d'air connue sur du béton frais, placé dans un récipient étanche de volume connu. Comme le béton contient de l'air, qui est compressible, la diminution de volume du béton comprimé révèle la quantité de cet air. Cette mesure ne donne toutefois qu'une évaluation indirecte de la résistance potentielle aux effets du gel, puisque celle-ci dépend surtout de l'espacement moyen entre les bulles d'air, et non seulement du volume total inclus dans le béton.

Enfin, lorsque des conditions de chantier imposent un contrôle plus strict du béton frais avant sa mise en place, on recourt à des essais de caractérisation spéciaux, telles la mesure de la résistance à la ségrégation (séparation des cailloux et de la pâte) ou la mesure de la teneur en granulats (par tamisage du mélange).

Les performances du matériau final doivent être vérifiées après mise en œuvre. Dans la pratique, la mesure de la résistance à la compression du béton est le seul test qui en indique la qualité. On utilise alors des éprouvettes normalisées sur lesquelles on exerce des forces connues : la valeur cherchée est le quotient de la force appliquée



4. LES FUMÉES DE SILICE, sous-produit de l'industrie du fer et du silicium, sont des ajouts cimentaires utiles : ces petites particules (*petites formes rondes, blanches ou grises*) augmentent la compacité du matériau, et sa résistance, en s'insérant entre les grains de ciment. De plus, la silice réagit avec la chaux formée lors de l'hydratation du ciment, ce qui engendre une proportion supérieure d'hydrosilicate, lequel donne sa résistance au béton.

pour atteindre la rupture par la surface de la section de l'éprouvette. Comme la résistance à la compression du béton augmente progressivement, à mesure que le ciment s'hydrate, sa mesure est indissociable du protocole de confection, de conservation et de mise à l'épreuve des éprouvettes.

Selon les pays, les éprouvettes standard sont des cylindres ou des parallélépipèdes. Les dimensions des éprouvettes varient selon les normes, mais la majorité des pays mesurent la résistance après 28 jours de conservation dans l'eau (ou en atmosphère saturée) à température normalisée (généralement 20°C). Pour des applications spéciales, on peut spécifier des résistances mécaniques à atteindre au très jeune âge (48 heures après le contact entre l'eau et le ciment, par exemple) ou à long terme (91 jours après la mise en œuvre, par exemple).

La résistance à la compression du béton à 28 jours de cure humide varie beaucoup : moins de un mégapascal pour une grave ciment (l'équivalent de dix atmosphères), 20 mégapascals pour un plancher en béton ordinaire, 35 mégapascals pour des poutres classiques, ou plus de 100 mégapascals pour un béton à très haute résistance.

Bien que la qualité des granulats joue un rôle important, c'est surtout la proportion d'eau et de ciment qui détermine la porosité, et donc la résistance ; c'est ce que décrit la loi de L. Fer-

ret, proposée dès 1892 : plus le ciment est « dilué » dans l'eau, plus la matrice cimentaire est poreuse et moins le béton est résistant. Cette observation confirme l'intérêt des superplastifiants, qui réduisent la quantité d'eau à utiliser pour le gâchage.

Les maladies à combattre

Comme les roches naturelles, le béton se dégrade lentement. Normalement les ouvrages en béton ont une durée de vie utile de 20, 50, voire 100 ans, selon leur composition, mais le béton est parfois malade : il se détériore alors plus vite que prévu.

La cause la plus importante de dégradation des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures : l'acier de l'armature s'oxyde sous l'action combinée de l'oxygène et de l'humidité. Normalement, le pH élevé à l'intérieur du béton (supérieur à 13) protège les aciers de la corrosion (celle-ci n'a lieu que si le pH est inférieur à 9), mais cette protection naturelle peut être supprimée par le dioxyde de carbone atmosphérique, qui pénètre lentement (environ un millimètre par an) dans le béton : il réduit le pH, parce qu'il forme du carbonate de calcium en réagissant avec la chaux déposée lors de l'hydratation. En outre, les ions chlorure contenus dans l'eau de mer et dans les sels de déverglaçage utilisés en hiver pénètrent dans le béton et favorisent l'activité de corrosion.

Quand le béton est trop perméable, quand les barres d'armature sont trop proches de la surface, ou quand les conditions d'exposition ont été sous-estimées, la corrosion se produit avant que la structure ait atteint la fin de sa vie utile prévue. Elle provoque alors le gonflement du métal, ce qui fait éclater la couche de béton qui recouvre les armatures.

Comment lutter contre ces maladies? L'industrie du béton a longuement analysé les causes possibles de maladies, et mis au point, dans de nombreuses circonstances, des traitements préventifs ou curatifs. Une meilleure évaluation de la gravité des conditions auxquelles sont

exposés les ouvrages conduit, quand c'est nécessaire, à augmenter l'épaisseur du recouvrement de béton pour mieux protéger les armatures.

Cependant les armatures ne sont pas les seuls éléments menacés dans les ouvrages en béton : parfois, des composés en contact avec le matériau pénètrent dans les pores du béton et réagissent avec le réseau de silicate de calcium hydraté ou avec les minéraux des granulats. Nous avons vu comment, dans les régions où le sol contient des sulfates, qui sont continuellement en contact avec les parties enfouies des structures en béton, l'humidité du sol transporte ces sulfates dans les pores

du béton, où les composés qui se forment désagrègent le béton. De même, des composés présents dans certains environnements réagissent avec des composés du béton.

La réaction alcali-granat est une autre maladie que l'on étudie beaucoup aujourd'hui. Elle peut se produire lorsque au moins trois conditions sont réunies : lorsque les granulats contiennent une variété cristallographique de silice particulière qui passe facilement en solution ; lorsque le béton contient une forte proportion de composés basiques (essentiellement l'oxyde de sodium Na_2O ou de potassium K_2O) ; et lorsque le béton demeure longtemps en milieu très humide. L'expansion qui peut résulter de la formation lente d'un gel de silicates calco-alcalins fait éclater le béton. Quand un barrage est atteint par cette maladie, le gonflement du béton coince parfois les turbines et compromet la stabilité en induisant des contraintes et des fissures.

Cette réaction est très lente (elle dure des dizaines d'années), de sorte que l'on diagnostique aujourd'hui seulement la maladie de structures construites après la guerre. De nombreuses équipes de recherche ont identifié les granulats potentiellement réactifs et mis au point des traitements : la réaction cesse quand on assèche le béton, par exemple, ou quand on injecte des composés, tel des sels de lithium, qui ont une efficacité surprenante et encore mal comprise.

La détérioration du béton sous l'action du gel est également une sorte de maladie, car elle conduit à des dégradations prématurées. Ce type de problème est peu courant en France, mais grave dans des pays les plus exposés à des températures très basses. Le gel provoque deux types de détérioration : l'écaillage en présence de sels de déverglaçage, qui est une dégradation localisée à la surface du béton, et la microfissuration interne, qui affecte toute la masse du béton.

Le mécanisme précis de la microfissuration interne est encore débattu, mais l'eau qui gèle dans le matériau semble déplacer l'eau restée liquide dans le réseau capillaire ; quand les capillaires sont trop longs, les pressions créées sont excessives et font éclater le matériau (on a longtemps cru que la dilatation de l'eau, lors de sa solidification, créait les dommages, mais l'hypothèse est fausse).

Le moyen le plus simple et le moins coûteux d'améliorer la résistance au gel consiste, nous l'avons vu, à ajou-



5. CETTE PASSERELLE CONSTRUITE A SHERBROOKE, au Canada, est le premier ouvrage réalisé à partir de «béton de poudres réactives». Dans ce béton, les granulats les plus gros sont des grains de sable. En outre, la porosité est réduite (l'empilement granulaire est optimisé). Après le gâchage et le moulage, on traite le béton thermiquement afin d'activer la réaction pouzzolanique, qui réduit la concentration en chaux et augmente la proportion de silicate de calcium hydraté. De surcroît, des fibres métalliques noyées dans le matériau donnent à celui-ci de une ductilité utile pour la résistance au vent.

ter un adjuvant entraîneur d'air, lors du gâchage, afin de stabiliser, dans la pâte de ciment, une myriade de petites bulles qui accueillent l'eau mise en mouvement par le gel.

Le béton de demain

Ces phénomènes, et bien d'autres sont explorés par les centres de recherche, qui continuent inlassablement leur quête de nouveaux bétons plus performants ou mieux adaptés aux circonstances de construction, ou de matériaux qui feront oublier la grisaille de l'après guerre.

Après cette période où la fureur de construire l'a emporté sur la recherche de l'agréable, l'architecture et le génie civil s'efforcent ainsi de faire du beau, en utilisant les possibilités des bétons modernes. Le coffrage devient moule, le matériau devient réplique ; le mot «aspect de parement» est dans toutes les bouches, de l'architecte au concepteur, au producteur ou au constructeur. Là, on utilise du ciment blanc ; là on colore le béton. Les bétons se font jolis, et l'on doit regarder de près pour distinguer l'origine des parements.

Simultanément une mutation technique profonde, fruit d'un siècle de recherche, rend le béton dix fois plus performant qu'avant. Il devient perméable ou imperméable aux agents agressifs les plus courants, il possède des résistances mécaniques inégales, permet de créer des ponts «dentelle», tel le pont de Normandie, ou des arches à portée jamais atteinte comme celle de la Défense.

Bernard CLAUD, François SAUCIER et Laurent BARCELO travaillent au Service béton du Laboratoire central de recherche du Groupe Lafarge.

Michel VENUAT, *La pratique des ciments*, éditions du Moniteur, Paris, 1989.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *Les bétons, bases et données pour leur formulation*, éditions Eyrolles, 1996.

Véronique BAROGHEL-BOUNY, *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons*, LCPC, Paris, 1994.

Adam NEVILLE, *Properties of Concrete*, Longman Scientific and Technical USA.

Kumar MEHTA, *Concrete, Structure, Properties and Materials*, Prentice Hall, 1986.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *La durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, Paris, 1992.



**UN EDITION SCIENTIFIQUE
FRANCOPHONE
QUI SURFE...**

NOUVEAUTÉ 1998
LE CATALOGUE DES EDITIONS INRA EN LIGNE
www.inra.fr/Editions/index.html

VIENT DE PARAITRE



1997, Réf. 01337, 295 F

L'EAU DANS L'ESPACE RURAL

Production végétale et qualité de l'eau

C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin,

A. Neveu, F. Papy, éd.

L'agriculture de demain devra prendre en compte une double préoccupation : valoriser au mieux la ressource en eau et en maintenir la qualité. Cet ouvrage présente les connaissances fondamentales sur les relations eau-plante, la régulation de ces échanges, le fonctionnement du système racinaire, les méthodes génétiques visant à améliorer la tolérance à la sécheresse, les processus physico-chimiques de la diffusion des produits qui peuvent affecter la ressource en eau et le rôle de l'eau dans la chimie de l'atmosphère. Il propose de nouvelles pratiques d'agriculture et d'élevage qui mettent en application l'économie de l'eau et la maîtrise de la pollution.

ASSIMILATION DE L'AZOTE CHEZ LES PLANTES

Aspects physiologique, biochimique et moléculaire

J.F. Morot-Gaudry, éd.

Pour la première fois en langue française, cet ouvrage rassemble les principales connaissances acquises ces vingt dernières années sur l'assimilation de l'azote nitrique, ammoniacal et moléculaire et sur la synthèse des acides aminés et des protéines chez les plantes d'intérêt agronomique. Il signale les conséquences d'un apport excessif d'azote sur le rendement et la qualité des récoltes ainsi que sur la préservation de l'environnement et permet d'envisager de nouvelles stratégies d'amélioration des espèces et de nouveaux itinéraires techniques de culture.



1997, Réf. 01338, 290 F

POUR COMMANDER

Contactez votre libraire habituel

ou **INRA Editions** - Route de St-Cyr 78026 Versailles Cedex - FRANCE

Tél : (33) 01.30.83.34.06 - Fax : (33) 01.30.83.34.49

web : www.inra.fr/Editions/index.html

FRAIS DE PORT

• **France-CEE** : 30 F pour 1 ou 2 exemplaires et ajouter 8 F par exemplaire supplémentaire. Commande inférieure à 60 F : 20 F Franco de port pour plus de 10 ex.

• **Autres pays** : le tarif prioritaire sera systématiquement appliqué (nous consulter : dessauva@versailles.inra.fr).

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE - **INRA Editions** - Rte de St-Cyr - 78026 Versailles Cedex
Minitel : 3614 INRA - Fax : 01 30 83 34 49 - web : www.inra.fr/Editions/index.html



Le plus long pont suspendu

SATOSHI KASHIMA • MAKOTO KITAGAWA

Le pont Akashi-Kaikyo est le plus long pont suspendu jamais construit ; il a pourtant résisté à un séisme, alors même qu'il était encore en construction.

Lorsqu'il sera ouvert, en avril 1998, le pont Akashi-Kaikyo aura une longueur de près de 3 910 mètres. Il reliera l'île de Shikoku au reste du Japon, tout en permettant la circulation des navires dans le détroit d'Akashi, qu'il enjambe. Sa travée centrale aura une portée de 1 990 mètres ; ses pylônes s'élèveront à 283 mètres au-dessus du niveau de l'eau, et ses câbles porteurs supporteront des tensions de 120 000 tonnes. Ce pont sera le dernier élément d'un réseau qui reliera les quatre îles principales du Japon : Honshu, Hokkaido, Kyu Shu et Shikoku. La plus petite, Shikoku, compte quatre millions d'habitants ; la mer fermée de Seto la sépare de Honshu, la plus grande des îles.

Vers 1930, Chujiro Haraguchi, qui était alors ingénieur du ministère de l'Intérieur (ultérieurement, il devint maire de Kobe), proposa de relier les deux îles par un pont suspendu. À l'époque, les finances japonaises et les techniques de construction étaient insuffisantes, mais, en 1959, le ministère de l'Équipement et les Chemins de fer japonais reprirent l'idée : une Commission du pont Honshu-Shikoku fut créée en 1970 pour concevoir, construire et entretenir un ensemble de routes et de voies ferrées. Les ingénieurs proposèrent la création de trois tronçons : l'axe Kojima-Sakaide, qui fut terminé en 1988, l'axe Kobe-Naruto, avec le pont Akashi-Kaikyo, et l'axe Onomichi-Imabari.

Des tronçons de ces deux derniers ponts sont aujourd'hui ouverts à la circulation routière. Alors que la construction du pont Akashi-Kaikyo s'achève, entre Honshu et l'île d'Awaji, en direction de Shikoku, plusieurs ponts de la voie Onomichi-Imabari sont encore en travaux. Ils devraient être terminés avant la fin du siècle.

Quand il sera réalisé, le pont Akashi-Kaikyo aura coûté environ 500 milliards de yens (soit 20 milliards de francs).

1. ENTRE DEUX ILES japonaises, le pont Akashi-Kaikyo sera le plus long pont suspendu du monde. Sa construction a été difficile, parce qu'il surplombe une voie de navigation de quatre kilomètres de large qui ne doit jamais être obstruée. Pour tendre les câbles porteurs entre les deux pylônes, on a utilisé un hélicoptère qui a tiré un câble de guidage plus léger (cartouche).

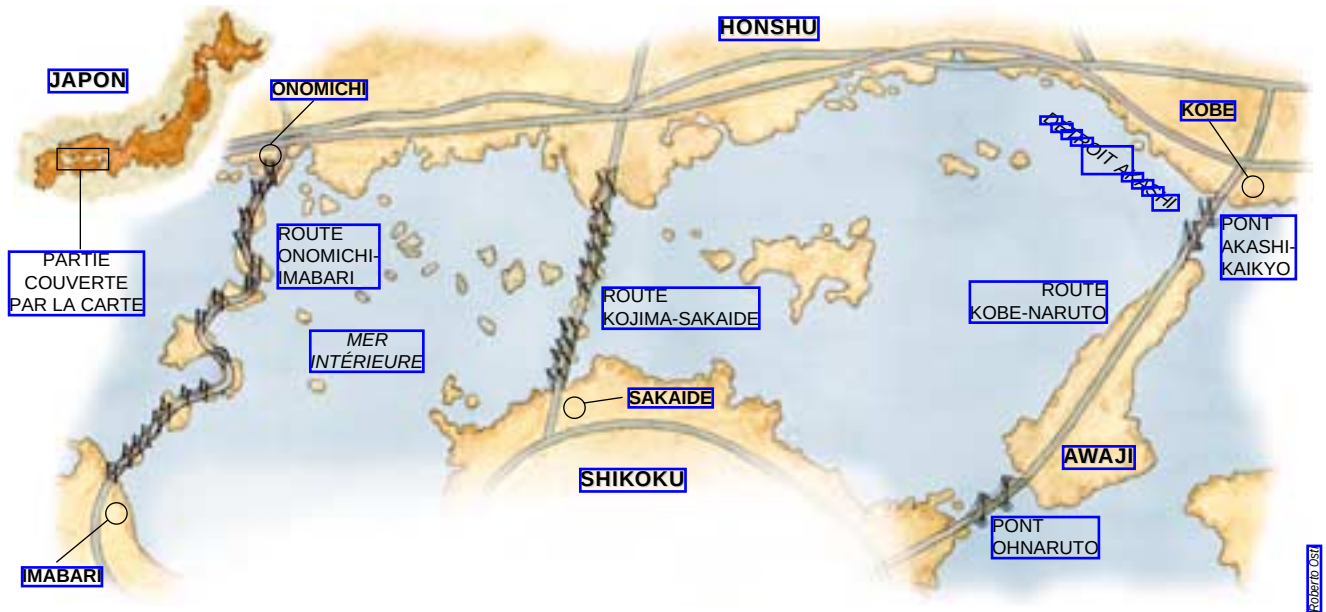
Il supportera trois voies de circulation dans chaque sens. Plus de 400 ingénieurs employés par le Comité du pont et un grand nombre d'ingénieurs des secteurs public et privé ont participé à sa modélisation et à sa construction. Sa portée record était une difficulté importante, mais, surtout, même pendant les travaux, le détroit d'Akashi devait rester ouvert au trafic maritime, de sorte que l'équipe technique a dû envisager l'éventualité d'une collision catastro-

phique entre un bateau et l'un des pylônes. Aussi a-t-on placé les deux pylônes du pont en dehors de la zone navigable, à presque deux kilomètres l'un de l'autre : de ce fait, chaque pylône a été construit sur des graviers sablonneux et sur des roches tendres qui constituent le fond.

L'île d'Awaji repose sur du granite, une roche dure qui soutient la majorité des longs ponts du monde, mais ce lit de granite s'enfonçait rapidement

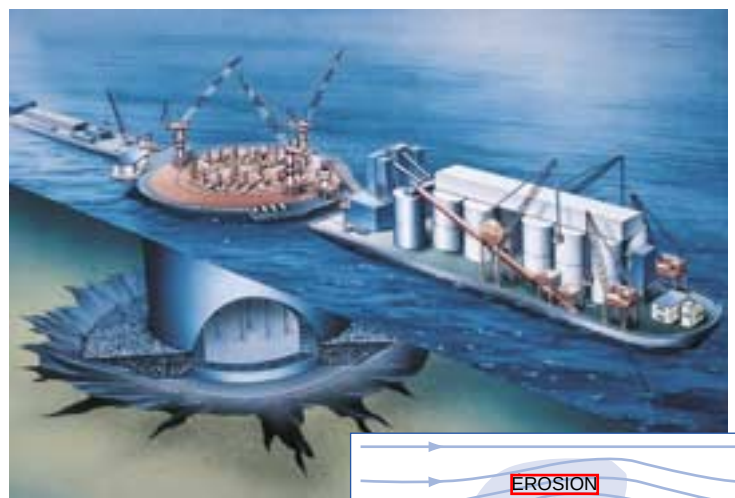
sous le détroit, où il est recouvert par une couche superficielle de vase durcie et de grès. À proximité de l'île de Honshu, le fond est couvert de graviers, recouverts par endroits de sédiments mous et mouvants, si bien que les fondations du pont Akashi-Kaikyo ont dû être posées non sur des roches dures, mais sur des roches sédimentaires et des graviers à demi consolidés.

Les ingénieurs ont placé les fondations des deux têtes de pont sur du

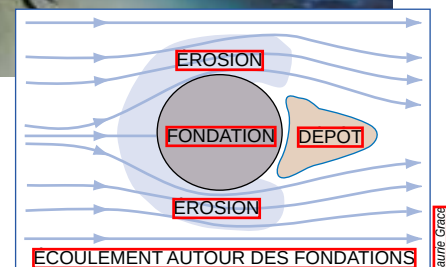


2. UN RÉSEAU de routes et de ponts, établi dans les années 1970, relie la petite île de Shikoku à l'île de Honshu. La liaison entre les villes de Kobe et de Naruto s'effectuera par le pont Akashi-Kaikyo (encore inachevé), ainsi que par le pont Ohnaruto, mis en service

en 1985. L'axe Kojima-Sakaide a été ouvert en 1988, mais plusieurs grands ponts sont encore en construction sur l'axe Onomichi-Imabari. Toutes ces voies de communication devraient être ouvertes d'ici la fin du siècle.



3. LES PYLÔNES du pont Akashi-Kaikyo reposent sur des caissons d'acier qui ont été assemblés au sec et remorqués jusqu'à leurs emplacements respectifs (en bas, à gauche). Ces caissons, de 80 mètres de large et de 70 mètres de haut, ont été remplis d'eau et immergés à un emplacement creusé au fond de l'eau. Une barge a ensuite préparé et versé du béton immergé en continu pendant trois jours et trois nuits, afin de remplacer l'eau par du béton et d'ancrer les caissons sur le fond (à droite). Comme les courants océaniques risquaient de raviner le fond autour des caissons et de déplacer ces derniers (cartouche), l'équipe de construction a posé des blocs de roche d'une tonne chacun autour de la base des caissons.



terrain gagné sur l'eau et asséché. Avant de construire les fondations des pylônes, ils ont prélevé des échantillons des couches sous-marines et vérifié que le sol était suffisamment résistant pour supporter un pylône de 25 000 tonnes sans qu'il s'enfonce ni qu'il s'incline. Finalement, un pylône a été ancré dans du grès et l'autre dans des graviers, de sorte que les travées externes du pont mesurent 960 mètres chacune, tandis que la travée centrale atteint 1 990 mètres.

Comme une travée centrale d'une telle longueur donne une prise au vent considérable, les ingénieurs en charge de la conception aérodynamique ont dû construire un modèle réduit du pont, 100 fois plus petit que le pont réel, afin d'étudier son comportement dans une soufflerie. La structure qui a été élaborée d'après ces tests devrait supporter des vents qui souffleraient à plus de 290 kilomètres à l'heure.

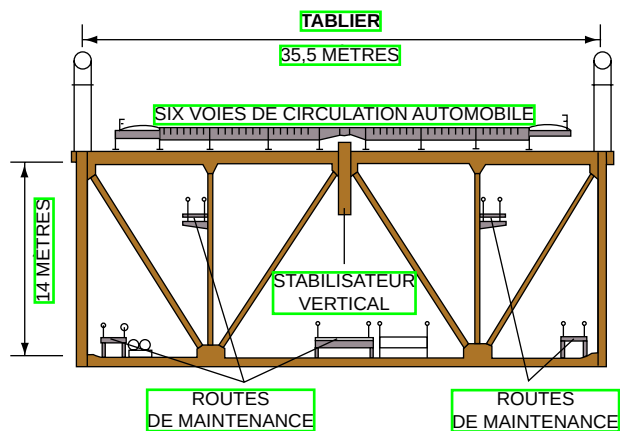
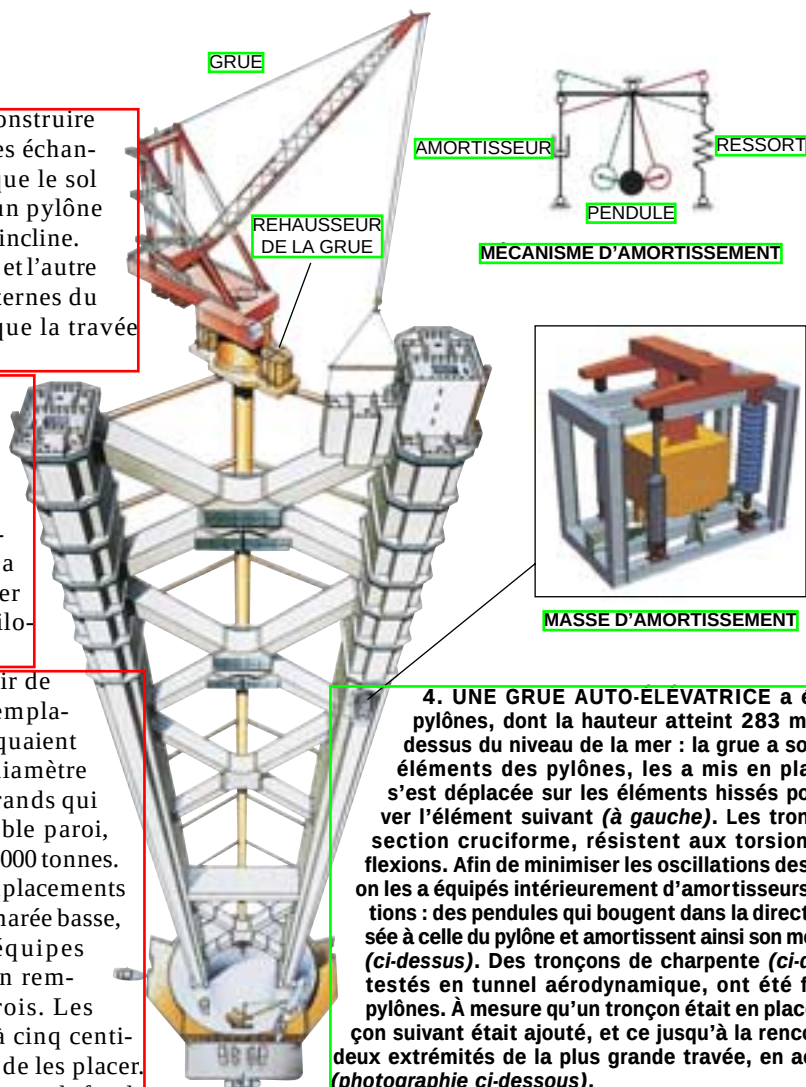
Tandis qu'une drague, manœuvrée à partir de la surface, creusait et aplanissait le fond à l'emplacement des pylônes, les chantiers navals fabriquaient deux caissons cylindriques de 80 mètres de diamètre et de 70 mètres de hauteur : ce sont les plus grands qui aient jamais été construits. Dotés d'une double paroi, ils flottaient, malgré leur masse supérieure à 19 000 tonnes. Douze remorqueurs les ont halés vers leurs emplacements respectifs et, profitant des quelques heures de marée basse, où les courants marins sont ralentis, les équipes techniques ont procédé à leur immersion, en remplissant d'eau l'espace entre les deux parois. Les cylindres ont ainsi été déposés sur le fond à cinq centimètres près de l'endroit où il avait été prévu de les placer.

Le compartiment central de ces caissons n'a pas de fond : il repose directement au fond de l'eau. Ce dernier a été nettoyé, par aspiration. Puis une barge établie en surface a préparé du béton immergé, un béton très fluide qui ne se dissout pas dans l'eau. Pour minimiser les imperfections du béton, ce dernier fut préparé et versé dans le compartiment central du caisson, en continu, pendant trois jours et trois nuits. Puis les ingénieurs ont coulé du béton dans le compartiment externe. Le coulage du béton a duré un an !

Lors de ce travail, les ingénieurs se sont inquiétés de la stabilité des fondations sous-marines : lorsqu'un courant rapide est dévié par une structure immergée, un remous en fer à cheval arrache le sol et les graviers autour de la structure. Par des tests en laboratoire et par des expériences sur place, les hydrodynamiciens avaient observé que ce ravinement se produirait quand la vitesse du courant serait supérieure à deux mètres par seconde. Après l'immersion des caissons, on disposa juste autour d'eux des filets remplis de graviers. Puis, afin d'assurer une protection durable, des rocs d'une tonne chacun furent placés sur une distance couvrant deux fois le rayon du caisson. Il n'y a aujourd'hui aucun ravinement, excepté sur le pourtour des assises protectrices.

Des pylônes jumeaux

Les pylônes du pont, plus haut de 56 mètres que ceux du Golden Gate de San Francisco, sont flexibles : leur partie supérieure se courbe facilement avec le mouvement des câbles. Intérieurement, chaque pylône est divisé en



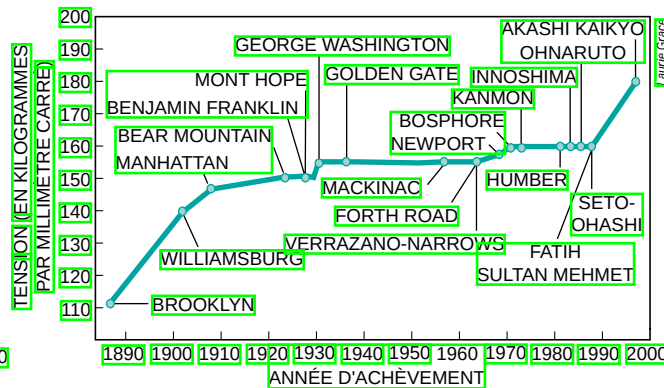
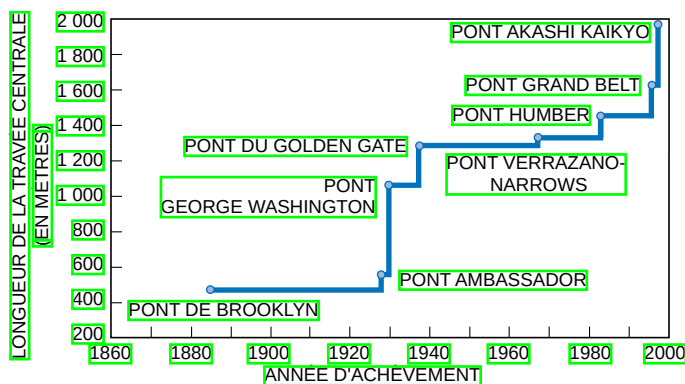
102 niveaux par des cloisons horizontales, et il renferme un ascenseur en son centre. Un pylône est ainsi comme une tour de 102 étages, avec une superficie de 100 mètres carrés par étage.

Les études en soufflerie avaient montré qu'un vent tourbillonnant

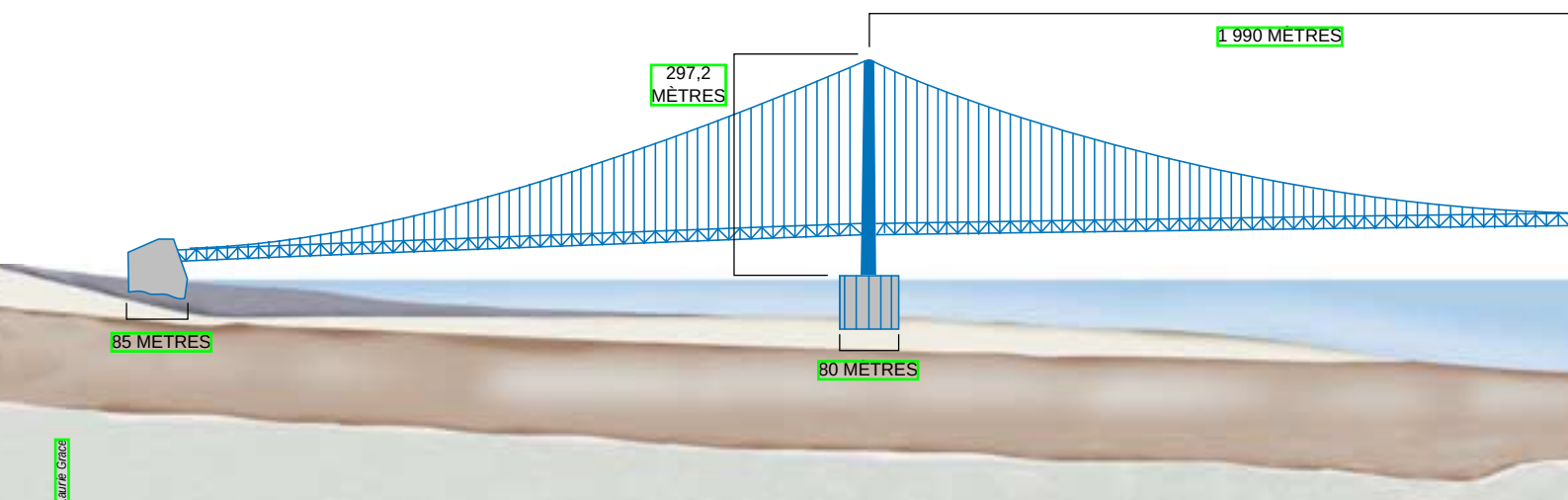
autour des extrémités supérieures des pylônes les ferait vibrer parallèlement à la longueur du pont. Aussi les ingénieurs ont adopté une section cruciforme pour chacun d'eux, et ils les ont intérieurement garni de systèmes qui amortissent les vibrations : ces dis-

positifs comportent des pendules qui oscillent dans une direction opposée à celle du pylône, ce qui amortit son mouvement.

Pour fabriquer les pylônes, on les a subdivisés en 30 blocs d'environ dix mètres de hauteur chacun. Chaque



5. LES PONTS SUSPENDUS se sont considérablement allongés, depuis un siècle (voir les photographies). Pour les ingénieurs, la principale difficulté consiste à soutenir le poids considérable de la travée centrale. La force de tension des câbles a augmenté en même temps que la longueur et le poids des travées (graphiques supérieurs). Le pont Akashi-Kaikyo restera le plus long des ponts suspendus jusqu'en 2006, quand sera construit le pont de Messina, entre la Sicile et l'Italie continentale : la travée centrale de ce pont atteindra 3,3 kilomètres.



6. COMME LE TRAFIC maritime devait se poursuivre pendant la construction du pont Akashi-Kaikyo, les deux pylônes principaux ont été érigés hors du détroit, sur des roches sédimentaires et une couche de fondation consolidée. En 1995, à la suite du séisme de Kobe, une



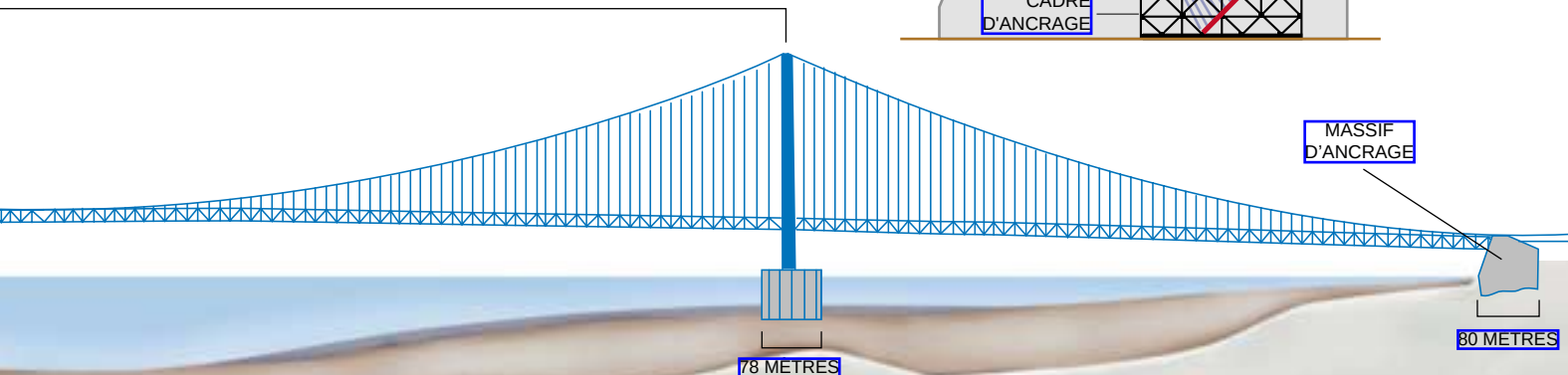
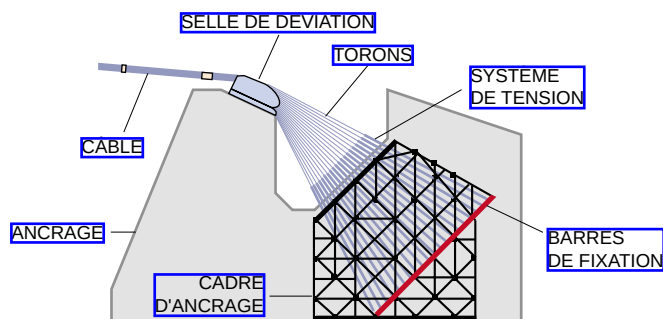
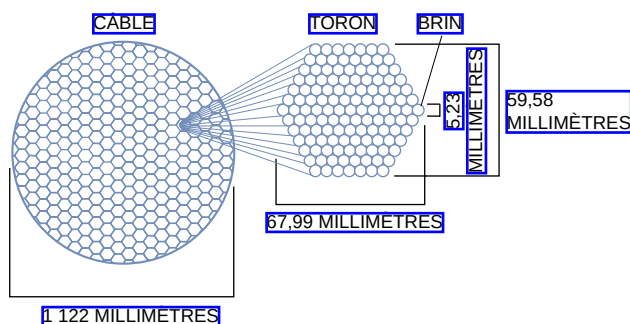
AKASHI KAIKYO, JAPON

7. DEUX CÂBLES composés chacun de 290 torons, soutiennent le tablier. Chaque toron se compose de 127 brins d'acier résistant (en haut, à droite) ; la longueur totale de ces brins correspond à sept fois et demie le tour de la Terre ! Après la mise en place des câbles entre les pylônes, les ouvriers ont réalisé une course et mis en place des treuils pour tendre tous les torons au profil voulu. Les câbles ont été fixés aux fondations sur le rivage au moyen d'une charpente conçue pour que chaque toron supporte une proportion équivalente du poids (en bas, à droite).

bloc était ensuite divisé en trois parties qui, avec une masse inférieure à 160 tonnes, pouvaient être soulevées par les grues.

Le maître d'œuvre s'est soucié d'obtenir une verticalité quasi parfaite des pylônes : leur extrémité est à moins de six centimètres de l'axe vertical. Pour les disposer aussi précisément, les techniciens ont réalisé en atelier un assemblage temporaire des blocs, puis ils ont meulé et poli leurs faces jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment aplanies. Enfin ils ont transporté séparément les blocs vers le site du pont. Une grue auto-élevatrice a alors érigé les pylônes : après avoir posé chaque bloc, la grue se soulevait elle-même jusqu'au niveau suivant, puis hissait un autre bloc, et ainsi de suite. Ce procédé novateur a limité l'emploi d'échafaudages temporaires ; il a réduit la durée et le coût de la construction.

Les câbles qui ont été posés sur les pylônes ont également été conçus spécialement. Des câbles classiques, qui supportent une tension de 160 kilogrammes par millimètre carré, auraient été trop faibles. Après des études de métallurgie, les ingénieurs ont opté pour un alliage d'acier



faille s'est ouverte à 14 kilomètres de profondeur dans le sol, au-dessous du pont. Heureusement, les travées n'avaient pas encore été posées, car elles auraient probablement été endommagées. Le déplacement des fondations du pont allongèrent ce dernier de 1,1 mètre.

comportant un faible pourcentage de silicium, afin que leur résistance à la tension atteigne 180 kilogrammes par millimètre carré ; de la sorte, on a pu n'utiliser qu'un seul câble de chaque côté du pont pour soutenir le tablier. Grâce à cette simplification de la structure, le poids de l'ensemble et la durée de l'édification ont été diminués.

Pour mettre en place les câbles sans gêner la navigation, un hélicoptère a tout d'abord transporté un câble de guidage au-dessus du détroit ; on a utilisé ce guide pour tirer des câbles plus résistants et former une passerelle. Des treuils placés le long de cette passerelle ont permis de tendre chaque toron. C'est à minuit, lorsque la chaleur du soleil ne risquait pas de faire jouer le métal, que les techniciens ont ajusté les profils des torons afin de répartir équitablement la charge sur chacun d'eux.

Le 17 janvier 1995, juste après la mise en place des câbles, un séisme de magnitude égale à 7,2 a frappé une vaste zone à proximité du pont : l'épicentre n'était qu'à quatre kilomètres de là. Ce séisme a dévasté la ville de Kobe et détruit des routes, des voies ferrées et d'autres infrastructures de la région. Après avoir analysé les effets, les géologues ont déterminé qu'une nouvelle faille s'était ouverte près du pont, à 14 kilomètres de profondeur, provoquant un déplacement des fondations et une ouverture de 80 centimètres de la travée centrale et de 30 centimètres de la travée située du côté d'Awaji.

La structure déjà construite n'a pas été endommagée, parce que, lors de la conception du pont, les ingénieurs avaient envisagé les conséquences d'un séisme de magnitude 8,5, qui aurait résulté d'un mouvement de la plaque Pacifique. Ils avaient même conçu les structures pour qu'elles résistent à une tempête ou à un séisme tels qu'il ne s'en

produit qu'une fois tous les 150 ans. En revanche, ils n'avaient pas prévu un déplacement des fondations, dû à une nouvelle faille à l'aplomb du pont.

Réalisation de la jonction

Les ingénieurs ont donc dû redessiner les travées, afin d'allonger le pont de 1,1 mètre ; un mois après le séisme, la construction reprenait. C'était un moindre mal que le séisme se soit produit avant que le pont ne soit terminé, car certaines structures comme les joints de dilatation, qui ont été insérées plus tard, auraient pu être endommagées.

En dessinant les travées, les spécialistes ont trouvé qu'un type particulier de torsions du tablier, lors de certains vents, risquait d'être gênant : sans un amortissement, le pont se briserait. Utilisant à nouveau une soufflerie, ils ont alors conçu une travée renforcée, qui ne présentait pas cette résonance, et ils ont installé des plaques de stabilisation verticales sous la bande médiane du pont afin d'amortir les oscillations. Des grilles posées sur la partie centrale et sur les deux côtés du pont ont encore réduit les risques de résonance.

En juin 1995, les ouvriers ont posé les travées en béton armé sur les pylônes grâce à un bateau-grue de 3 500 tonnes. Puis des éléments de charpente plus petits, préassemblés en morceaux de 28 mètres, ont été posés à l'avant des travées et fixés à elles. Ainsi, les deux extrémités du pont s'étiraient à la rencontre l'une de l'autre jusqu'à se rencontrer, au mois d'août 1996.

Aujourd'hui, les équipes techniques effectuent les dernières finitions : mise en place des câbles électriques, pavage du tablier, etc. Après son inauguration, au printemps 1998, ce pont sera au service du Japon pour de nombreuses décennies.

Satoshi KASHIMA a dirigé le premier bureau de construction du pont Akashi-Kaikyo et il a participé à la pose des fondations. Makoto KITAGAWA est le directeur de l'Office de construction Tarumi, qui a été en charge des câbles du pont.

H. Max IRVINE, *Cable Structures*, Dover Publications, 1992 (publié au MIT Press en 1981).

Super Span, in *Japan Economic Journal (Nihon keizai shimbun)*, vol. 31, n° 1596, pp. 13-19, 22 novembre 1993.

Niels J. GIMSING, *Cable Supported Bridges : Concept and Design*, 2^e édition, John Wiley & Sons, 1997.

N. TAKE, M. KITANI, H. KONISHI et N. NISHIMURA, *Feasibility Study on Dual Cable Suspension Bridges*, in *Technology Reports of the Osaka University (Osaka Daigaku hogaku hokoku)*, vol. 47, n° 2267/82, pp. 79-88, 1997.

K. MATSUDA, Y. HIKAMI et M. TOKUSHIGE, *Proposal for Super-Long Span Suspension Bridge and Its Aerodynamic Characteristics*, in *IHI Engineering Review (Tokyo)*, vol. 30, n° 3, pp. 93-100, 1997.

Les plus hautes tours du monde

CESAR PELLI • CHARLES THORNTON • LEONARD JOSEPH

Les tours jumelles Petronas, construites à Kuala Lumpur, en Malaisie, sont un symbole culturel et économique.

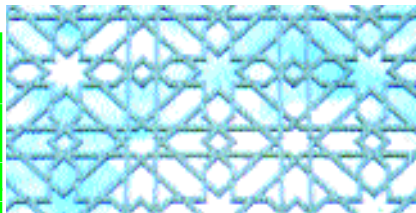
Devenus arrogants, les hommes entreprirent de construire un tour jusqu'au ciel, refuge de Dieu. Ce dernier créa alors les différentes langues. désormais incapables de se comprendre, les constructeurs abandonnèrent leur ouvrage. Ce récit biblique de la tour de Babel décrit une aspiration humaine éternelle : des Égyptiens avec leurs pyramides, aux Mésopotamiens avec leurs ziggourats, des Chinois avec leurs pagodes aux musulmans avec leurs minarets, les civilisations ont toujours voulu édifier de hautes constructions. La plupart du temps, leurs motivations étaient religieuses ou, du moins, fortement symboliques.

Les avatars modernes des pyramides sont les gratte-ciel. Depuis plus d'un siècle, architectes et ingénieurs transforment l'aspect des villes parce que, théoriquement et pratiquement, ils maîtrisent les techniques de construction en hauteur.

Les constructeurs des premiers gratte-ciel s'étaient inspirés des colonnes grecques et des tours de la Renaissance. Après la Seconde Guerre mondiale, les architectes s'affranchirent des références au passé et dessinèrent des structures rectangulaires, à toit plat, qui n'étaient plus des gratte-ciel, mais de simples tours. À Kuala Lumpur, capitale de la Malaisie, les tours jumelles Petronas sont un retour aux sources : ces bâtiments, les plus hauts du monde, ont avant tout une fonction symbolique.

Ces tours de 88 étages, qui culminent à 451,9 mètres, reliées par une passerelle entre les 41^e et 42^e étages, sont plus qu'un ensemble de bureaux : symboles de la croissance économique de la Malaisie, elles s'inscrivent dans

la tradition islamique originale de ce pays de 19 millions d'habitants. Les étages ont un plan en étoile, dont les branches, alternativement des angles droits et des arcs de cercle, sont inspirées par l'art islamique classique.



1. DES MOTIFS ISLAMIQUES (en haut) ont inspiré les architectes des tours Petronas (en bas et page ci-contre).

Les murs extérieurs reproduisent le même motif.

Dans chacune des tours, la surface disponible atteint 213 750 mètres carrés (l'équivalent de 24 fois la pelouse du Stade de France). Elle est occupée par des bureaux, par un centre d'exposition sur le pétrole, par une galerie d'art et par des salles de conférence multimédia. Les deux tours sont la pièce maîtresse d'un ensemble immobilier, nommé *Vision 2020*, qui constituera le nouveau centre-ville de Kuala Lumpur. Elles seront entourées d'un centre de commerces et de loisirs de 140 000 mètres carrés, d'une salle de concert de 2 600 mètres carrés pouvant accueillir 850 personnes, d'un parking souterrain de 251 000 mètres carrés pour 5 000 voitures et de deux tours de bureaux, plus petites, d'une superficie totale de 186 000 mètres carrés environ.

Ce complexe appartient à un groupement dont fait partie la Société *Petronas*, la compagnie pétrolière nationale malaise, qui occupe une bonne partie de sa surface. Nous examinerons ici les différentes étapes du projet, du concours pour sa conception, en 1991, à l'achèvement de la coiffe des tours.

La porte de la Malaisie

L'histoire des tours Petronas commence classiquement par un concours international. L'appel d'offres, publié au début de l'été 1991, décrit brièvement les principales caractéristiques imposées de l'ensemble de 40 hectares (un centre commercial et des espaces ouverts au public) et il précise que deux tours seront construites dans l'angle Nord-Est pour la Société *Petronas*. Ces tours



seront une porte vers le nouveau centre-ville. Elles distingueront «un lieu que tous reconnaîtront comme unique à Kuala Lumpur et à la Malaisie». La hauteur des tours n'est pas précisée : elles doivent seulement être belles.

En trois semaines, les architectes concurrents préparent des plans, des maquettes et des perspectives, qu'ils remettent à l'équipe technique du maître d'œuvre. En août, chaque concurrent présente son projet à plusieurs commissions, qui comprennent le Premier ministre malais : les problèmes techniques et économiques sont débattus, mais aussi les questions esthétiques et philosophiques. C'est finalement la Société *Cesar Pelli & Associates* qui est choisie : son projet a un aspect malais qui a séduit le jury.

Un groupement de 16 sociétés est alors constitué pour la conception précise de l'ensemble immobilier. Les sociétés occidentales, qui savent concevoir et construire des bâtiments très élevés, travailleront en étroite collaboration avec des entreprises malaises, pour leur transmettre ces compétences.

Une étoile d'inspiration islamique

Symboles de la puissance économique malaise, les tours Petronas doivent différer des gratte-ciel européens ou américains. Leur forme est inspirée de l'art islamique classique, où les motifs géométriques revêtent une plus grande importance symbolique que dans la culture occidentale.

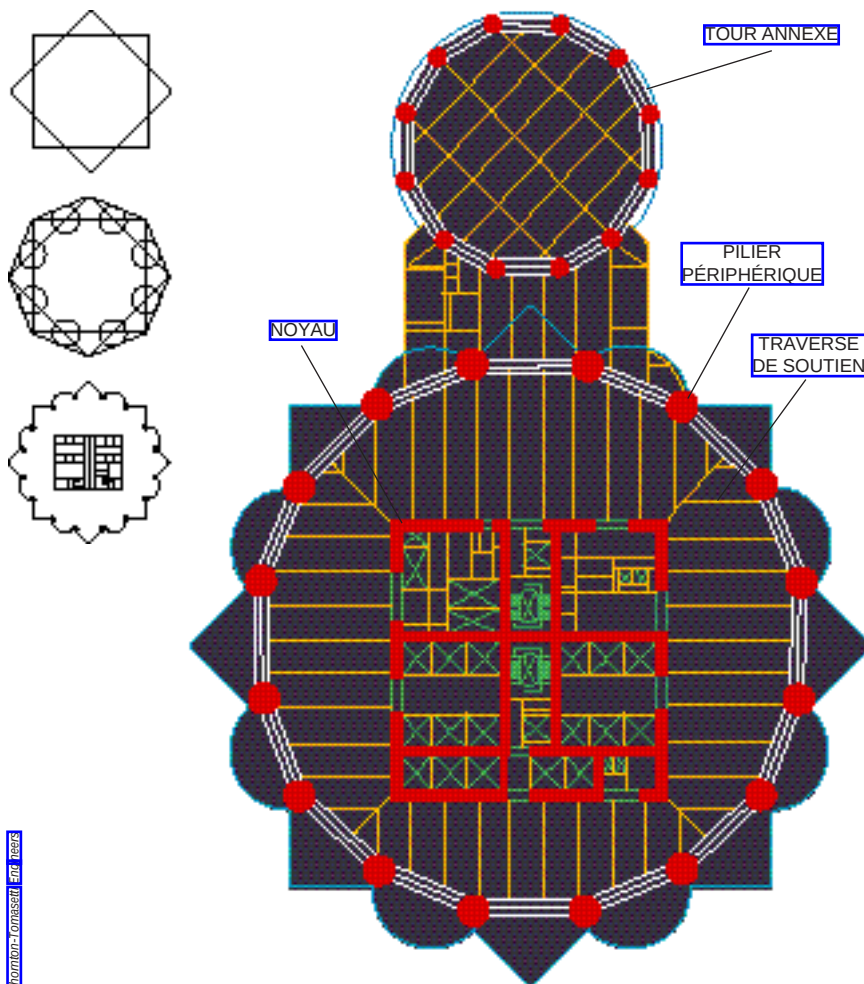
Lors de l'appel d'offres, la Société *Cesar Pelli* avait proposé un élégant contour en forme d'étoile à 12 branches qui permettait un usage fonctionnel de l'espace. Toutefois le Premier ministre malais avait alors laissé entendre que d'autres motifs seraient plus représentatifs de l'art islamique. Après l'attribution du contrat, le cabinet a cherché des motifs traditionnels et a trouvé que le plus fréquent était une étoile à huit branches, formée par la superposition de deux carrés concentriques, décalés d'un angle de 45 degrés. Toutefois, avec un tel plan, les murs extérieurs seraient venus trop près du centre du bâtiment, ce qui aurait gêné l'aménagement de l'espace intérieur.

L'ajout, dans les angles rentrants, de huit arcs de cercle a créé le motif à 16 branches qui a été retenu. Un pilier de structure occupe chacun des 16 angles rentrants, ce qui laisse l'intérieur de la tour libre de tout pilier.

Presque en même temps, la conception du noyau du bâtiment a commencé. Ce noyau est un parallélépipède creux, de section carrée : ses murs, au centre du bâtiment, sont le principal soutien de la structure. Il contient les ascenseurs, les escaliers, les systèmes de ventilation et de climatisation, et les toilettes. Il permet de satisfaire les futurs besoins des utilisateurs tout en gardant un rapport élevé entre l'espace utile et l'espace total. Dans les tours Petronas, ce rapport est finalement de 76 pour cent en moyenne pour un étage de bureaux, ce qui est satisfaisant pour un bâtiment aussi haut.

Le service des ascenseurs est optimisé. Chaque cage contient plusieurs cabines. Comme au World Trade Center de New York, les visiteurs qui se rendent dans la moitié supérieure des bâtiments sont d'abord emmenés par une cabine «directe» à mi-hauteur, où ils empruntent alors deux cabines de desserte locale. Aux heures de pointe, la capacité de transport est encore améliorée grâce à des cabines d'ascenseur à double pont.

Nous avons ensuite étudié en détail la façade extérieure et les espaces publics, en testant chaque élément des bâtiments avec des plans et des maquettes. Le choix du verre pour les fenêtres et de tubes en acier pour les pare-soleil, par exemple, détermine l'aspect global des bâtiments, le type d'éclairage des bureaux, la climatisation et, en définitive, les coûts de fonctionnement annuels.



2. LES ÉTAGES DES TOURS PETRONAS ont une forme d'étoile. Le contour était initialement une étoile à huit branches formée de deux carrés décalés de 45 degrés (schéma supérieur à gauche). Il a été modifié par l'ajout de huit arcs de cercle dans les angles rentrants des branches de l'étoile (schéma du milieu) pour accroître l'espace utilisable. Le dessin définitif comporte 16 parties saillantes : huit pointes et huit lobes (schéma du bas). Le noyau central, carré creux qui contient les ascenseurs, les ventilations mécaniques et les autres équipements de service, est relié aux piliers périphériques du bâtiment par des poutres de soutien. Un bâtiment plus petit, représenté par un anneau sur la partie supérieure du plan, monte jusqu'au 44^e étage des tours.

Des îles célestes

Comment élever une tour très haute ? Des piliers qui portent la charge totale du bâtiment la transmettent aux fondations. Ils sont reliés, à chaque étage, par des planchers et par des traverses qui laissent libre un vaste espace, aménagé ensuite selon les besoins. Des structures complémentaires assurent le contreventement (la résistance à l'action horizontale du vent) et la stabilité de l'édifice. Ainsi, un mur de refend qui s'élève sur plusieurs étages peut résister aux sollicitations dynamiques du vent ou d'un séisme.

Lorsque la hauteur augmente, l'augmentation de la prise au vent est un problème important. Le doublement de la hauteur d'un bâtiment multiplie par 16 l'amplitude des oscillations sous l'effet du vent, à rigidité égale. Cette dernière doit donc être augmentée fortement pour que les étages supérieurs ne se balancent pas trop.

L'alimentation des étages supérieurs en air conditionné, en eau et en électricité, ainsi que les réseaux de communication et les équipements sanitaires occupent une surface intérieure précieuse. Des pompes puissantes, à la base du bâtiment, doivent monter l'eau vers le sommet. Aux étages inférieurs, les tuyaux d'eau et les conduits de climatisation subissent des pressions élevées : on les réduit en disposant des réservoirs d'eau et des échangeurs de chaleur à intervalles réguliers.

Dans un bâtiment de plus de 30 mètres de haut, les camions à grandes échelles sont inutilisables pour la lutte contre les incendies. On doit installer des extincteurs, des alarmes, des systèmes de détection de fumées et des refuges contre le feu, locaux équipés d'une climatisation autonome.

Enfin, les méthodes de construction habituelles sont inadaptées à la grande hauteur : les grues, les plates-formes de travail et les coffrages (où le béton est coulé et mis en forme) doivent monter en même temps que le bâtiment. L'acheminement des ouvriers, du béton, de l'acier ou de verre au sommet du chantier ralentit celui-ci : le maître d'œuvre doit planifier le projet comme s'il travaillait sur une île isolée dans le ciel.

Malgré ces obstacles, on construit des bâtiments de plus en plus élevés. Avec les bétons à haute résistance, on réalise des éléments structuraux plus compacts et plus légers, qui réduisent les charges. Des aciers plus résistants, en cours de mise au point, seront bientôt utilisés dans les cas où la limitation du poids est primordiale. On appuie aussi les bâtiments sur des bases plus larges pour garantir la stabilité au vent : beaucoup de tours récentes couvrent l'équivalent de plusieurs pâtés de maisons.

La hauteur des bâtiments est aussi limitée par la physiologie des utilisateurs : les changements de pression créés lors des trajets en ascenseur limitent les vitesses de ces derniers. Le coût financier d'un bâtiment élevé est aussi, parfois, limitatif.



Un sol à surprises

Kuala Lumpur est dans une région de moyenne montagne, mais la ville elle-même n'a pour tout relief qu'une petite colline. Le site choisi pour la construction des tours, un ancien champ de courses, est plat. Toutefois, les ingénieurs chargés des relevés géotechniques et des structures savaient par expérience que le lit rocheux sous-jacent est irrégulier. Pendant des millions d'années, l'érosion a sculpté dans le socle calcaire des cavernes, des aiguilles, des ravins et des montagnes escarpées. Des sédiments ont recouvert ces reliefs, puis ont durci progressivement. Ce type de sol est nommé Kenny Hill.

Chaque tour pèse 300 000 tonnes : par l'intermédiaire d'une embase de béton, elle exerce sur le sol une pression de 1 140 kilopascals, plus de deux fois supérieure à celle que supporte le sol Kenny Hill. Comme nous

ne pouvions agrandir l'embase, nous avons prévu d'appuyer les piliers porteurs et les murs porteurs du noyau sur des piliers de béton qui auraient traversé le sol jusqu'au lit rocheux.

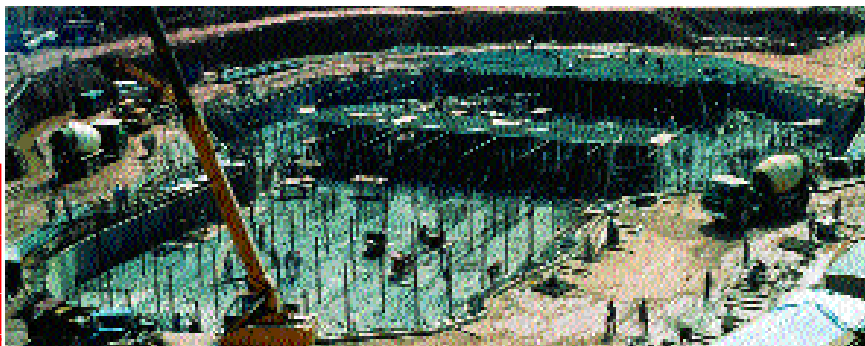
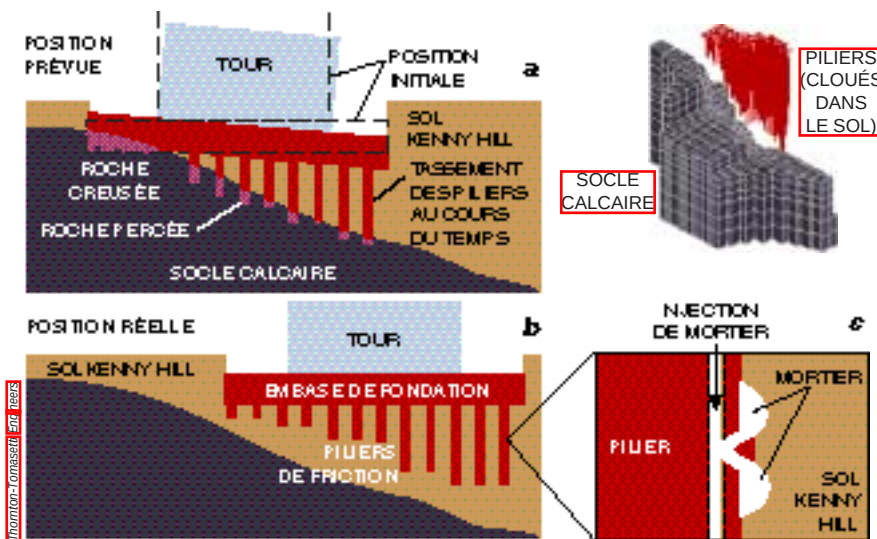
Toutefois, les sondages du terrain révélèrent que le lit rocheux situé sous les deux tours était à une quinzaine de mètres d'un côté, et qu'il s'enfonçait jusqu'à 180 mètres de l'autre côté. Les fondations des tours devaient être enterrées à 21 mètres de profondeur : d'un côté, elles auraient reposé sur le lit rocheux, tandis que, de l'autre côté, nous aurions dû creuser profondément pour enfoncer les piliers jusqu'à la roche. Cette dernière entreprise aurait été lente, risquée et coûteuse. De surcroît, le tassement des piliers, sous le poids des étages et des occupants, aurait été différent pour chacun : les tours auraient risqué de s'incliner. Ces tassements pouvaient être compensés, au prix de nouvelles excavations et d'autres mesures.

Heureusement, le site constructible était assez vaste pour que nous puissions déplacer les fondations de 60 mètres vers le Sud-Est. Ce nouvel emplacement laissait en outre davantage d'espace entre les tours et les rues avoisinantes, ce qui améliorait la circulation et laissait plus de place aux voies de dégagement partant des rues et aux rampes d'accès aux parcs de stationnement.

Sur ce nouveau site, les tours enjambent un ravin comblé par le sol Kenny Hill. Le lit rocheux est à une profondeur comprise entre 80 et plus de 180 mètres. Comme le sol Kenny Hill est meuble, un tout autre système de fondations a été utilisé. Une embase en béton transmet le poids à un ensemble de colonnes d'un diamètre de 1,3 mètre. Ces colonnes, plus étroites que les piliers, répartissent le poids de chaque tour sur le sol plus progressivement que l'embase seule. Nous avons ajusté la longueur des colonnes pour que leurs bases soient toutes à la même distance de la roche et que la stabilité des tours ne soit pas menacée par le tassement du sol.

En pratique, la mise en place des colonnes fut difficile parce que le sol Kenny Hill doit sa solidité à l'imbrication et au compactage des grains sédimentaires qui le composent ; lorsqu'on y creuse un trou, sa compacité diminue, car le poids des matériaux enlevés n'appuie plus. Pour éviter la fragilisation du sol lors du creusement, nous avons décidé d'enfoncer les colonnes à partir de la surface, comme on enfonce des clous dans une planche, sans creuser d'avant-trou.

Chacune des deux fondations est finalement composée de 104 colonnes rectangulaires coulées sur place, d'environ 1,2 sur 2,8 mètres, enfoncées pour certaines jusqu'à 125 mètres. Du béton a été coulé dans des cages formées de barres de renforcement en acier, elles-mêmes enfoncées dans le sol. Le frottement entre les colonnes et le sol a été augmenté par l'injection d'un mélange de sable et de ciment vers l'extérieur des colonnes, par des conduits percés à l'intérieur de celles-ci (voir la figure 3c). Lorsqu'il est sec, ce mortier forme des aspérités. Les colonnes sont sous deux embases en béton (une pour chaque tour) d'une épaisseur de 4,5 mètres. Pour chaque embase, 13 200 mètres cubes de béton ont été coulés : pendant deux jours, le contenu d'un camion de béton a été déversé toutes les 90 secondes.



3. COMME DES CLOUS enfoncés dans le sol, des colonnes empêchent les fondations de basculer. Si ces colonnes avaient été appuyées sur le lit rocheux sous-jacent, le bâtiment aurait risqué de s'incliner (a). Pour l'éviter, les tours ont été construites à une soixantaine de mètres de l'emplacement initialement prévu, et les colonnes reposent dans le sol sédimentaire (b). Le frottement entre les colonnes et le sol a été renforcé par l'injection sous pression d'un mortier sur les parois extérieures des colonnes (c). Un modèle informatique (en haut, à droite) montre l'écart entre les colonnes et le lit rocheux. Les fondations ont été achevées par le coulage d'une embase en béton au-dessus des colonnes (photographie en bas).



La valeur du vide

Comment donner aux tours une silhouette reconnaissable? La tendance contemporaine est la recherche d'asymétries, données soit par des différences de hauteurs, soit par des dispositions en diagonale pour les tours parallélépipédiques. À Kuala Lumpur, la Société *Cesar Pelli* a choisi la symétrie.

Non seulement chaque tour est symétrique, mais leur disposition ajoute à la symétrie, avec un axe de symétrie dans le vide. Nous avons suivi l'enseignement de Lao-Tseu, popularisé par l'architecte américain Frank Lloyd Wright, selon lequel l'existence d'un objet creux s'affirme plus grâce au vide que grâce à ses parois.

La force d'expression visuelle de ce vide a été soulignée par l'ajout d'une passerelle à mi-hauteur : avec la structure qui la soutient, cette passerelle forme un portail de 170 mètres qui ouvre vers l'infini. En cela, les tours Petronas diffèrent de tous les gratte-ciel occidentaux. Cet aspect remarquable des bâtiments n'a pas été inspiré par les traditions malaises mais, comme il s'exprime pour la première fois à Kuala Lumpur, c'est à ce lieu qu'il sera associé pour toujours, comme la tour Eiffel est synonyme de Paris, bien que ni sa structure ni sa forme n'aient été inspirées par l'architecture parisienne ni française.

Des monolithes de béton

Les premiers grands bâtiments étaient en pierre, en béton classique : les piliers devaient être très solides. Les premiers bénéficièrent de l'acier. Aujourd'hui, redevient intéressante l'amélioration qui est apportée. Ainsi, l'addition de silice (poussière produite par l'électronique) et de microfibrilles au béton classe le béton en résistance : on a des éléments structuraux plus compacts, des «super-béton» augmentent la résistance du béton, que l'on ne peut pomper. Le remède d'une partie du problème des cendres volcaniques et des centrales thermiques à charbon évite la surchauffe du béton par la réaction chimique de l'eau avec les parois, lors de la

On était un matériau pour les colonnes des tours porteuses des Petronas : les constructeurs l'utilisent couramment. On le transporte en seaux ou des formes on le moule facilement en formes com-

plexes. En outre, le béton, par sa raideur, divise par deux l'amplitude des oscillations du bâtiment, sous l'action du vent, par rapport à l'acier, à masse égale. Sa masse augmente la période d'oscillation des tours, qui est de neuf secondes pour les tours Petronas.

La résistance et la rigidité latérales sont des caractéristiques essentielles pour des tours. Des structures moins hautes s'appuient seulement sur leur noyau central, mais le noyau compact des tours Petronas ne fournirait que la moitié de la résistance et de la rigidité nécessaires pour qu'elles ne se déforment pas sous l'effet du vent. Nous avons donc relié les murs de ce noyau à une structure de bras et de colonnes en béton réparties sur son périmètre par l'intermédiaire de traverses rigides. Des ceintures d'armature d'acier s'étendent au-delà des colonnes périphériques, formant des saillies en forme de branches d'étoile qui, en outre, offrent aux occupants des vues dégagées.

La façade est composée de panneaux de la hauteur d'un étage (quatre mètres) et de 1,4 mètre de large ; un système de joints imbriqués par tenon et mortaise a accéléré leur mise en place. Pour leur éviter la corrosion, dans le climat tropical de la Malaisie, on les a réalisés en acier inoxydable et en verre (teinté et autonettoyant) ; le tout forme une structure légère.

Les effets du vent sont réduits par plusieurs aménagements. L'amincissement des tours vers leur sommet diminue la prise aux vents plus rapides qui soufflent à grande hauteur. Aux étages supérieurs, les colonnes se rapprochent du noyau central. La prise au vent de la forme arrondie et nervurée des tours, quoique supérieure à celle d'un cylindre lisse, est inférieure à celle de tours rectangulaires. D'autre part, les nervures sur la surface extérieure des bâtiments créent de petites zones de turbulence qui disloquent les gros tourbillons, éventuellement menaçants pour la stabilité des bâtiments. Enfin, des essais en soufflerie ont montré que la circulation d'air entre les deux tours n'augmente que modérément leur oscillation.

Par chance, à Kuala Lumpur, les conditions naturelles sont favorables aux bâtiments élevés. La ville n'est pas située dans une zone d'activité sismique. Proche de l'Équateur, elle ne subit pas d'ouragans ni de typhons. Les orages tropicaux sont l'occasion de pluies abondantes et de violents coups de foudre, mais pas de vents trop rapides.

Comme la durée de construction d'un bâtiment élevé dépend du temps nécessaire à la construction d'un étage, les constructeurs ont mis en œuvre plusieurs techniques pour accélérer cette étape. Pour la construction des murs du noyau central, des plates-formes de travail et des coffrages ont été montés d'un seul tenant. La construction des planchers a aussi été accélérée par la suppression de plusieurs étapes nécessaires à la réalisation d'étages entièrement en béton (mise en forme, montage des barres de renforcement, étape de coulée, finitions et rattrapages), qui prend plus de temps que la construction des colonnes : des traverses en acier ont été fixées au corps du bâtiment et aux colonnes, recouvertes d'une dalle métallique, puis d'une dalle de béton assez mince.

4. LES 88 ETAGES DES TOURS sont coiffés d'un mât de 63,2 mètres de haut (à gauche). Les colonnes des étages supérieurs sont en retrait, ce qui amincit le sommet des bâtiments et réduit leur prise au vent (photographie en bas). Un observateur placé dans la coupole du mât donne une idée de l'échelle des bâtiments (photographie en haut).

Une passerelle sur le ciel

La passerelle aérienne est un élément fonctionnel essentiel des tours Petronas. La jonction de deux niveaux à mi-hauteur des tours facilite l'accès à des salles de réunion, à un lieu de prière, à un restaurant et à des bureaux. La passerelle est prévue pour résister au feu, et elle permettrait l'évacuation d'une tour à l'autre en cas d'incendie, réduisant l'encombrement des autres trajets d'évacuation.

Elle a la forme d'une arche, soutenue du dessous. Cette forme permet l'utilisation de travées de passage assez minces. Les supports, des tubes d'acier de 1,1 mètre de diamètre, s'élèvent obliquement à partir d'appuis situés sur chaque tour et se rejoignent au milieu de la passerelle. Les emplacements des points d'appui minimisent l'élévation ou l'abaissement du plancher de la passerelle lorsque les tours bougent. Des essais en soufflerie sur une maquette ont montré que les vibrations de ces jambages flexibles, sous l'effet du vent, font apparaître des fissures de fatigue sur certains joints soudés ; nous avons donc ajouté des dispositifs d'amortissement pour réduire ces vibrations.

Fabriquée en Corée du Sud, la passerelle est arrivée en Malaisie en pièces détachées. L'entrepreneur chargé de sa construction l'assembla presque



5. LE LEVAGE DE LA PASSERELLE de 325 tonnes a duré trois jours, les équipements de commande ayant été endommagés par la foudre.

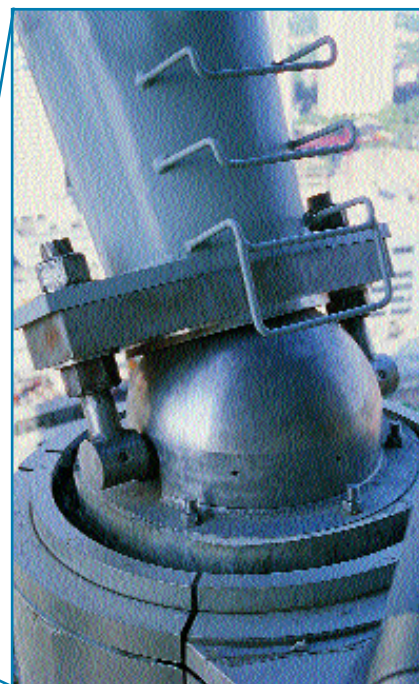
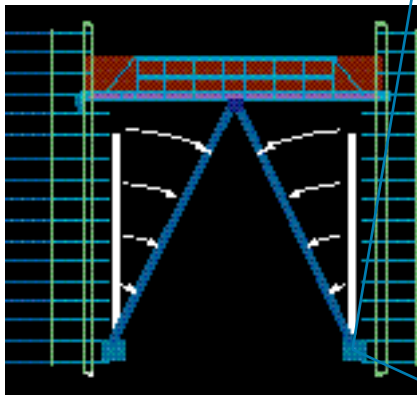
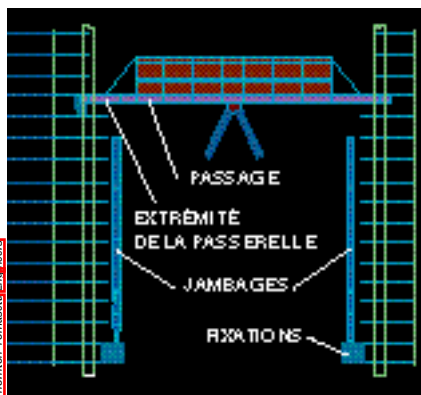
complètement au sol, puis fit monter les jambages de support et les extrémités de la passerelle. La principale difficulté était la mise en place de la section centrale (les trois quarts de la longueur du passage), qui pèse 325 tonnes. Les engins de levage, qui tiraient huit câbles à haute résistance, auraient pu élever cette structure en 20 heures, mais l'opération a finalement pris trois jours, les équipements de contrôle ayant été grillés deux fois par la foudre.

La réalisation des coiffes a également posé d'intéressants problèmes techniques. Elles sont si hautes et si difficiles d'accès qu'elles doivent nécessiter peu d'entretien et être facilement inspectables sur leurs faces internes et externes (la rouille est une menace importante dans l'atmosphère humide des tropiques). Le sommet de chaque bâtiment comporte trois parties : au-dessus du dernier étage, un local de forme cylindrique abrite un

dispositif de lavage des fenêtres à double niveau. Au-dessus, une structure conique porte un mât de 63,2 mètres de haut. Ce dernier est entouré par la structure conique sur 14 mètres de haut, et son diamètre varie de 2,6 mètres à 0,6 mètre ; à la moitié de sa hauteur, une boule, formée de 14 tubes de 30 centimètres de diamètre recourbés en anneaux et fixés les uns aux autres, symbolise les 14 États de la Malaisie ; une sphère de 1,9 mètre de diamètre coiffe la pointe du mât.

Le local de lavage des fenêtres et la structure conique ont une armature classique, en acier, sur laquelle des panneaux de façade en acier inoxydable sont fixés. Le mât aussi est en acier inoxydable, ce qui empêche toute corrosion et réduit l'entretien. Une seule couche pour la façade et le support de la structure facilite les inspections à partir d'échelles internes ou de gréements externes. L'utilisation de petits panneaux a facilité le transport et l'assemblage de ces structures : chaque mât a été assemblé à l'intérieur du bâtiment, puis dressé en deux étapes. Cette procédure a minimisé les risques d'accident, ainsi que la hauteur de la grue nécessaire.

6. LES JAMBAGES DE LA PASSERELLE ont été mis en place sur leurs supports à roulements, puis maintenus contre chaque tour. Les extrémités de la passerelle et le centre de celle-ci ont été ensuite successivement élevés (à gauche). Après le soudage des différentes parties, les jambages ont été détachés des tours et fixés à la partie inférieure de la structure (au milieu). Des roulements assurent la mobilité des jambages lorsque les tours bougent sous l'effet du vent (à droite).





D'Angelina Cesar Pelli & Associates

Querelle de hauteur

Le Conseil des bâtiments élevés et de l'habitat urbain, basé aux États-Unis, a analysé le projet malais avant de décider s'il était le plus haut bâtiment du monde. Le 12 avril 1996, il a décidé que les tours Petronas méritaient cette désignation, en se fondant sur les mesures de distance entre la base et le sommet de la structure. Puis, le 10 juillet 1997, il a donné une nouvelle définition : les tours Petronas ne sont plus que le bâtiment le plus haut du monde « jusqu'au sommet de la structure ». Le plus haut bâtiment jusqu'à l'extrémité de la flèche ou de l'antenne est le One World Trade Center, à New York, tandis que la tour Sears de Chicago détient les records de la hauteur jusqu'au sommet du toit et de la hauteur jusqu'au plus haut étage occupé.

Des silhouettes contre le ciel

À mesure que chaque tour s'élève, elle se rétrécit, en six étapes. Dans les étages supérieurs, les murs sont légèrement inclinés vers le centre, ce qui parachève la forme et renforce la perception de l'axe vertical central.

Les bâtiments ont finalement une forme assez proche de celle qui avait été proposée lors du concours. Une différence... de taille toutefois : les coiffes ajoutées aux tours leur donnent une hauteur de 451,9 mètres, encore jamais atteinte. L'aspect final du sommet est plus typiquement malais ; il ne ressemble ni à celui des gratte-ciel ni aux clochers des églises.

Cesar PELLI dirige le cabinet d'architectes *Cesar Pelli & Associates*, à New Haven. Charles THORNTON dirige le Groupe *Thornton-Tanarelli Engineers LZA*, à New York, dont Leonard JOSEPH est le vice-président.

Hamdan MOHAMAD, Tiam CHOON, Tarique AZAM et Stephen TONG, *The Petronas Towers – The Tallest Building in the World*, in *Habitat and the High-Rise : Tradition and Innovation*, Proceedings of the Fifth World Congress, sous la direction de Lynn S. Beedle, Council on Tall Buildings and Urban Habitat and the Dutch Council on Tall Buildings, 1995.

Cesar PELLI, *Cosmic Pillars : Philosophy of Tall Buildings*, in *Collected Papers of Habitat and the High Rise*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1996.

Un nouvel accès à la Chine

JOHN KOSOWATZ

En Chine, le plus grand projet de génie civil au monde comprend un aéroport, deux très grands ponts et deux tunnels sous-marins, sous le port Victoria.

Le rattachement de Hong Kong à la Chine, en juillet 1997, a déclenché les spéculations : comment ce minuscule bastion du capitalisme évoluerait-il, une fois rattaché au dernier grand pays communiste ? Les opinions divergeaient, mais tout le monde admettait que Hong Kong deviendrait le principal accès à la Chine : un programme de génie civil ambitieux, qui coûtera plus de 100 milliards de francs, s'achèvera en 1998. À Hong Kong seulement, un tel programme pouvait être entrepris, et achevé en moins de sept ans.

À Chek Lap Kok, au large de l'île de Lantau, 25 kilomètres à l'Ouest du cœur financier de Hong Kong, sera ainsi construit le plus grand aéroport du monde. Plus de 30 kilomètres de routes et de voies ferrées nouvelles, deux grands ponts et deux tunnels sous la baie de Victoria relieront l'aéroport au centre-ville de Hong Kong. La ville nouvelle de Tung Chung, qui sera créée sur l'île de Lantau, abritera plus de 200 000 personnes qui, pour la plupart, travailleront à l'aéroport.

Les plans de cette ville ont été proposés dès la fin des années 1980, quand Hong Kong devenait l'une des principales destinations mondiales des voyages d'affaires. L'aéroport actuel, à Kai Tak, était

1. HONG KONG, qui appartient à nouveau à la Chine, sera le principal accès à ce pays, grâce au nouvel aéroport de Chek Lap Kok.





difficilement extensible, car il se trouve en plein Kowloon, dans une zone si peuplée que les avions doivent déjà faire leurs manœuvres d'approche en piquant directement au-dessus des bâtiments. En 1989, le gouvernement décida la construction du nouvel aéroport, créant le Bureau de coordination du nouvel aéroport (le NAPCO), qui regroupe des représentants de l'aéroport, de la Société des chemins de fer et du Port, et qui dirige la conception et la réalisation du projet.

Le NAPCO réalisa rapidement un cahier des charges. Pour imposer de rapides délais de réalisation à des coûts aussi faibles que possible, il décida d'adjuger des contrats forfaitaires à des sociétés qui présenteraient des solutions ne mettant en œuvre aucune technique nouvelle ; des méthodes qui n'auraient pas été préa-

lablement éprouvées auraient pu ralentir considérablement le chantier, car les problèmes de logistique abondaient. Tout d'abord, les sites choisis pour l'aéroport de Chek Lap Kok et les ponts étaient éloignés et manquaient de voies d'accès. En outre, les sites constructibles situés à proximité de Kowloon et de Hong Kong étaient gênés par la circulation et l'exiguïté du territoire.

Le NAPCO, qui devait également rassembler les fonds nécessaires à la construction, a pâti des difficultés politiques entre la Chine et le Royaume-Uni : pendant longtemps, la Chine n'a pas été convaincue de l'intérêt du projet. Puis, en 1995, les négociateurs se mirent d'accord sur une clause qui débloqua la situation : Hong Kong financerait 75 pour cent des travaux par l'intermédiaire d'un placement sur le projet, en tirant des fonds sur des

réserves fiscales à hauteur de 117 milliards de francs et sur des sommes mises de côté pour le commerce extérieur, pour la valeur de 345 milliards de francs ; des emprunts couvriraient le quart restant. Ainsi doté, le NAPCO put rapidement signer des contrats.

La Chine semble impressionnée par les résultats. Au début de 1997, les autorités ont donné leur accord pour la construction d'une deuxième piste de 3 800 mètres et d'une extension du terminal vers le Nord-Ouest. Aujourd'hui, les autorités chinoises ont accordé 3,8 milliards de francs pour financer l'extension Nord-Ouest : c'est la preuve de leur confiance dans cet investissement.

John KOSOWATZ est rédacteur en chef adjoint de la revue *Engineering News-Record*.

Chek Lap Kok

Le site de l'aéroport

Avant la construction du nouvel aéroport, les équipes techniques ont dû créer une zone plane de 1 248 hectares (*photographie de la page ci-contre*) : Chek Lap Kok était trop petit et trop accidenté pour recevoir des pistes assez longues. La Société *Gammon Construction*, la Société japonaise *Nishimatsu* et plusieurs autres furent chargées d'une partie importante des travaux : elles réalisèrent pour sept milliards de francs d'équipement, finissant leur travail en 1995, après seulement 41 mois de travail. Les Sociétés *Gammon* et *Nishimatsu* nivelèrent Chek Lap Kok, dont la superficie était égale à 302 hectares, ainsi qu'une île voisine plus petite, afin de créer un terre-plein à six mètres au-dessus du niveau de la mer ; elles durent gagner du terrain sur l'eau pour obtenir la superficie manquante. Elles déplacèrent ainsi 347 millions de mètres cubes de roches et de terre ; une partie notable de la flotte de dragage mondiale fut employée à ces travaux.

Le plan

Le bureau d'études *Foster Asie*, dirigé par l'architecte anglais Norman Foster, conçut l'énorme terminal de Chek Lap Kok. Le plan initial, élaboré par le gouvernement, comportait une suite de bâtiments en béton, avec des communications entre les bâtiments. Le bureau d'études *Foster Asie* proposa un espace



plus ouvert et davantage de lumière naturelle. Les dessinateurs jugèrent qu'un bâtiment unique ferait un meilleur effet, et serait plus facile à réaliser dans le peu de temps alloué ; en outre, un bâtiment massif résisterait mieux aux typhons saisonniers de Hong Kong.

Le projet retenu emploie 350 000 mètres cubes de béton, 21 000 tonnes d'acier pour la toiture et 2 400 tonnes d'acier tubulaire pour le soutien des murs et des vitres. Le bâtiment, en forme d'avion (*photographie de gauche*), a une surface au sol de 516 000 mètres carrés. Les 490 000 mètres carrés de la zone d'échange et des accès aux portes principales s'étendent sur 1,3 kilomètre, tandis que les accès aux portes les plus éloignées se dédou-

blent comme une queue d'hirondelle. Les 39 portes s'adaptent aux gros avions civils.

Le terminal s'élève sur huit niveaux. Le premier, qui abrite un trottoir roulant, comporte un souterrain de un kilomètre de long, réalisé par les Sociétés *Gammon* et *Nishimatsu*. Au second niveau, un hall à bagages, de 320 mètres sur 160, est fermé au public. Les six autres niveaux abritent un centre commercial, les salles de départ et d'arrivée, des promenoirs et des zones de contrôle de billets. Ces niveaux possèdent peu de cloisons intérieures, ce qui permet aux visiteurs d'avoir une vue dégagée sur tout le terminal. Tout autour des 4,4 kilomètres de périmètre du terminal, des murs de verre donnent sur les pistes.

Le toit

Martin Manning, de la Société *Ove Arup et Associés*, a dirigé l'équipe chargée du toit, où creux et arrondis se succèdent sur toute la longueur de l'édifice. Ce profil ondulé est créé par un grillage en acier léger, recouvert d'une toile. Les traverses du grillage forment une suite d'arceaux semi-circulaires, un peu comme les arcs-boutants de certaines églises médiévales. Des lucarnes s'ajustent dans chacun des 129 modules du toit, qui mesurent généralement 36 mètres sur 36 et pèsent 120 tonnes. Ils sont soutenus par des piliers et reliés aux meneaux des murs extérieurs (les barres verticales séparant des éléments de fenêtres dans une paroi vitrée). Pour ces dernières fixations, les ingénieurs ont prévu des joints en acier qui permettront aux murs et au toit de bouger horizontalement et verticalement l'un par rapport à l'autre, en cas de vents violents.



La construction

Le contrat de 6,3 milliards de francs, prévu pour la réalisation du projet *Foster Asie*, fut attribué à un consortium de cinq sociétés britanniques, chinoises et japonaises : la Société chinoise de construction, la Société *Kumagai Gumi*, la Société *Maeda*, la Société internationale de construction *Amec* et la Société *Balfour Beatty*. L'ouvrage fut terminé à l'automne 1997, avec un peu de retard dû aux fortes pluies de 1994 et aux conditions de sols difficiles à Chek Lap Kok. Quand les travaux de construction du terminal battaient leur plein, la Société chinoise de construction employait simultanément plus de 1 600 ouvriers.



PONT DE TSING MA

Le pont de Tsing Ma

Un pont suspendu

Le pont de Tsing Ma relie l'île de Lantau au continent par-dessus un détroit très fréquenté par les navires : il mène au delta de la rivière des perles. Avec une longueur de 2,17 kilomètres, ce pont suspendu à deux niveaux a été le plus long pont suspendu jamais construit, portant à la fois des voies ferroviaires et des voies routières. Les Sociétés *Trafalgar House*, *Costain Civil Engineering* et *Mitsui* avaient signé un contrat de 5,4 milliards de francs pour la construction du pont, en 1992. Les travaux se sont achevés en 1996.

Le tablier

La construction d'un tel pont en seulement quatre ans est étonnamment rapide. L'ouvrage devrait résister à des vents de plus de 300 kilomètres à l'heure : non seulement la Chine du Sud est fréquemment balayée par les typhons, mais le pont de Tsing Ma surplombe une passe étroite où le vent s'engouffre. Cinquante et un voussoirs à profil



PONT DE KAP SHUI MUN



PYLONE DU PONT DE TSING MA

aérodynamique et à double plancher ont été assemblés. Dans chacun des voussoirs, des orifices canalisent les vents violents et renforcent la stabilité.

Les éléments des travées en acier ont été fabriqués par des industriels japonais et britanniques qui les ont expédiés par bateaux jusqu'en Chine, juste avant le début des travaux. Des barges ont transporté les voussoirs assemblés, qui pesaient 1 000 tonnes ; une grue à portique les hissait alors à marée basse. Ces voussoirs ont généralement 40 mètres de large, 36 mètres de long et 7,3 mètres de haut ; ils portent six voies de circulation automobile au niveau supérieur, deux voies ferrées et deux voies de secours au niveau inférieur.

Les pylônes

Deux pylônes en béton armé, d'une hauteur de 206 mètres chacun, soutiennent la travée principale du pont de Tsing Ma. La Société Mitsui/Costain les érigea en utilisant un cintre

mobile, que l'on déplaçait à mesure que l'on coulait le béton. Les entreprises terminèrent ce travail en trois mois à peine. Le pylône situé à l'Est repose sur un substrat rocheux de l'île Tsing Yi. À l'extrémité Ouest, une fondation du pylône de Ma Wan est ancrée dans le substrat rocheux au-dessous du détroit. Une île artificielle a été construite autour de cette fondation, afin de protéger le pylône des accidents de navigation.

Les câbles

Le pont est soutenu par des câbles de 1,1 mètre de diamètre. Des soldats de l'armée britannique ont travaillé en l'air sur de légères passerelles de bois pour assembler les 27 500 tonnes de fil d'acier galvanisé qui composent ces câbles. Cette méthode, dite « tissage aérien », fut choisie pour son coût et son efficacité, prouvée lors de précédents chantiers.

Elle présente des dangers, mais des câbles de cette dimension auraient été trop encombrants pour être réalisés en atelier. Une fois assemblés, les câbles ont été passés sur des selles d'acier fixées au sommet des pylônes et tendus par des masses d'ancrage à chaque extrémité. Les câbles de suspension, espacés de dix mètres, descendent des deux câbles principaux et soutiennent la travée principale du pont (1 377 mètres) ainsi que la travée Ouest, de 359 mètres de long. La travée Est, légèrement plus courte, repose sur des piliers de béton.



PYLONES DU PONT DE KAP SHUI MUN



Le pont de Kap Shui Mun

Les pylônes

Le pont de Kap Shui Mun prolonge le pont de Tsing Ma. Sa travée principale a une portée de 430 mètres. Il s'étend sur une longueur totale de 750 mètres et possède l'un des plus lourds tabliers du monde pour sa longueur.

Il a été construit par la Société *Kumagai Gumi*, la Société *Maeda*, la Société de construction *Yokogawa* et la Société japonaise *Hitachi Zosen*. L'ouvrage repose essentiellement sur deux pylônes en forme de H, d'une hauteur de 145 mètres chacun.

La travée

Le tablier du pont est composé de deux types de structures. Les voussoirs du centre de la travée principale sont des doubles caissons, composés d'un mélange d'acier et de béton : le béton des niveaux inférieur et supérieur est coulé sur des cadres d'acier pré-

fabriqués dans l'île de Lantau, acheminés par bateaux, puis hissés et mis en place.

En revanche, les travées latérales et le reste de la travée centrale sont constitués de poutres de métal (quatre plaques soudées formant une boîte) qui ont été renforcées par du béton et qui ont été progressivement poussées à partir de chacune des culées vers les pylônes.

La largeur du pont étant de 35,2 mètres, les ouvriers ont dû placer deux poutres à la fois, côte à côte, pour assembler la travée ; ils ont utilisé du béton pour assembler chaque paire, au niveau inférieur, et des traverses pour relier les dalles du dessus.

Les rampes qui ont servi à mettre en place les voussoirs ont été incorporées à l'ouvrage. Elles servent d'éléments de transition entre la partie médiane, composée d'éléments d'acier et de structures en béton, et les voussoirs latéraux, en béton seulement.

Le viaduc de Ma Wan

A proximité, le viaduc de Ma Wan (*non représenté*) a 504 mètres de long. Il a été construit par réalisation, sur place, de voussoirs de béton, étayés par des palées provisoires. Six travées, de 84 mètres de long chacune, ont été préparées en quatre segments de 21 mètres de long. Ces voussoirs de béton ont ensuite été mis en compression par des câbles tendus : ainsi le béton ne risque pas de travailler en extension, et les risques de fissuration sont réduits.

Le viaduc de Kwai Chung

La construction du viaduc de Kwai Chung a présenté de nombreuses difficultés, car ce pont routier devait supporter le trafic routier et le trafic ferroviaire sur trois kilomètres, dans

un site déjà occupé : de nombreuses structures différentes ont dû être utilisées.

La route principale court au-dessus de poutres de béton préfabriquées, en forme de U. Pour renforcer le béton, on l'a comprimé par des câbles tendus ou par des barres, avant la pose. Puis les hourdis en béton ont été coulés sur place. Les équipes ont construit les tronçons ferroviaires à partir de segments de béton préfabriqués et mis en post-tension. Ces sections ferroviaires courent entre des piliers, qui reposent sur de longs poteaux massifs, enfoncés dans le sol et sur des traverses de portique. Une grande partie de ce viaduc est bâtie sur un remblai, ce qui est très courant à Hong Kong. Des entreprises françaises ont dû creuser jusqu'à 40 mètres de profondeur pour trouver un terrain stable où ancrer les piliers. En plusieurs endroits, on a construit le viaduc au-dessus de 15 voies routières, que l'on ne pouvait pas interrompre.



VIADUC DE KWAI CHUNG

Le tunnel de l'Ouest du port

Les Sociétés *Nishimatsu* et *Kumagai Gumi* ont construit le dernier tronçon, un tunnel de deux kilomètres de long, entre le port Victoria et le centre de Hong Kong. De chaque côté du port, les abords du tunnel ont été construits sur du terrain pris sur l'eau. Du côté de Hong Kong, le chantier fut difficile en raison de la présence de vase : il fallut mettre en place des murs de filtrage – pour isoler la vase et stabiliser le sol sous les fondations – jusqu'à 40 mètres de profondeur. Du côté de Kowloon, le travail fut plus facile : les abords furent assurés à l'aide de dalles de béton armé, coulées sur place.

De l'autre côté de l'île de Hong Kong, un chantier à ciel ouvert, en bordure de mer, coulait les voussoirs du tunnel proprement dit. Après l'assemblage des voussoirs, le chantier fut inondé, et les voussoirs furent remorqués par bateau jusqu'au site. Les tronçons du tunnel ferroviaire furent construits au même endroit. Une fois les voussoirs descendus dans la tranchée, on a étanchéifié le tunnel et pompé l'eau qui s'y trouvait.

TRAVERSEE DU PORT



ENTREE DU TUNNEL



L'aérogare

L'aérogare a été construite sur un terrain de six hectares, devant la place des échanges, où se trouve la Bourse de Hong Kong. Elle comprend une gare souterraine à cinq niveaux, de nombreux tunnels ferroviaires et un bâtiment dont le toit d'acier s'étend sur 25 mètres. Une allée piétonnière souterraine relie le terminus à la gare centrale pré-existante.

Le tunnel, d'une longueur de 300 mètres, serpente sous la Bourse : l'équipe de la Société japonaise *Aoki* a dû percer entre les fondations de la Bourse sans couper les réseaux de fibres optiques ni les autres lignes de communications. Aucun aménagement ne devait pouvoir causer un affaissement du bâtiment. Le tunnel passe également sous la rue Connaught, l'une des artères les plus animées de Hong Kong. Malgré ces difficultés, il est prévu que la liaison ferroviaire ouvrira en juin 1998, deux mois après la mise en service de l'aéroport de Chek Lap Kok.

RUE CONNAUGHT





Le chantier de l'aéroport de Chek Lap Kok est présenté sur le site Internet, à l'adresse <http://www.hkairport.com>

Les gratte-ciel sont-ils encore nécessaires ?

WILLIAM MITCHELL

Les tours et les gratte-ciel étaient adaptés à l'organisation du travail du XX^e siècle. À l'époque des réseaux de communication numériques, ils semblent obsolètes. Reste leur fonction symbolique.

Les peuples de l'Antiquité ont construit des ouvrages étonnamment hauts, en se servant de la résistance à l'écrasement de la pierre et de la brique, mais ces monuments étaient compacts : avec ses 146 mètres de haut, la pyramide de Chéops affirme le pouvoir du pharaon, mais sa surface utile est très faible par rapport à la surface brute ; avec une base carrée de 230 mètres de côté, cette pyramide renferme une chambre royale de seulement cinq mètres de diagonale. Pis encore, le minaret hélicoïdal de la grande mosquée de Samarra, en Iraq (52 mètres de haut), est totalement massif, sans espace intérieur. Les flèches de la cathédrale de Chartres, qui culminent à 107 mètres, ne renferment que d'étroits espaces vides et des escaliers étriqués, malgré leur structure perfectionnée.

La révolution industrielle a permis la construction de grandes tours creuses, utilisables par de nombreux occupants : les architectes du XIX^e siècle découvrirent qu'en utilisant des cadres en acier et en béton armé et des cloisons légères, ils augmentaient la proportion de surface utile. À l'aide d'ascenseurs, ils accélérèrent la circulation verticale, et ils intégrèrent des systèmes mécaniques

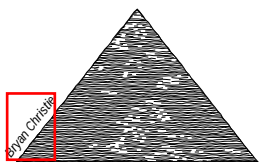
pour chauffer, ventiler ou refroidir des volumes internes de plus en plus spacieux. Vers les années 1870 et 1880, les architectes et les ingénieurs visionnaires de New York et de Chicago inventèrent ainsi les gratte-ciel modernes : l'Equitable Building, le Western Union Building et le Tribune Building, à New York, et le gigantesque Montauk Building, à Chicago.

Ces inventions architecturales répondaient à un besoin du capitalisme, parce que l'installation en un même lieu d'armées d'employés de bureau permettait de les faire travailler ensemble, utiliser les mêmes fichiers et les mêmes outils de travail et facilitait leur contrôle par la hiérarchie. Ces bâtiments élevés correspondaient aussi à une nouvelle conception de la ville, qui devenait un lieu d'échanges, avec un quartier d'affaires central, très dense, entouré d'une banlieue dorénavant très étalée, ces deux zones communiquant par des liaisons radiales. Cette centralisation a fait augmenter la valeur immobilière du centre-ville : il devenait intéressant financièrement de construire la plus grande surface utile possible sur un terrain de superficie donnée.

Des contraintes techniques ont toutefois limité cette extension verticale des gratte-ciel : le poids des étages et la prise au vent, le transport des personnes, de l'eau et des équipements. Plus on monte, plus il faut de structures de soutien au sol, d'ascenseurs et de gaines de service. À partir d'une certaine hauteur, le surcoût des étages supplémentaires n'est plus compensé par le gain de surface, de plus en plus faible.

La planification urbaine limite aussi la hauteur des bâtiments : les grandes tours projettent de grandes ombres, masquent le ciel et sont parfois à l'origine de rafales de vent, dangereuses et désagréables au sol. Elles concentrent la circulation des piétons et des automobiles, engorgeant les artères environnantes, de sorte que les aménageurs imposent des limites de hauteur, de rapport entre la surface habitable et la surface au sol ou, plus subtilement, appliquent des formules qui réglementent la hauteur et le volume autorisés en fonction des dimensions des rues (d'où les formes en retrait et fuselées caractéristiques des gratte-ciel de Manhattan).

En raison de ces limitations, les bâtiments exceptionnels



Grande pyramide de Chéops
Vers 2600 avant J.-C.
146 mètres
Égypte



Minaret de Samarra
IX^e siècle
52 mètres
Iraq



Cathédrale de Chartres
XIII^e siècle
107 mètres
France



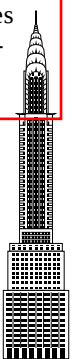
Equitable Building
1870
43 mètres
New York



Western Union Building
1875
70 mètres
New York



Tribune Building
1875
79 mètres
New York



Chrysler Building
1930
319 mètres
New York

ment grands sont coûteux, rares et remarquables : des sociétés font ainsi parler d'elles et acquièrent du prestige par la construction des plus hauts gratte-ciel d'une ville, d'une nation ou du monde. La publicité assurée par de telles constructions est alors plus importante que leur utilité pratique.

À partir des années 1920, le bâtiment Chrysler (319 mètres) et l'Empire State Building (381 mètres) ont rivalisé de hauteur : des antennes de radio et même un mât d'amarrage pour les dirigeables ont été ajoutés pour gagner les quelques derniers mètres. La compétition a repris dans les années 1960 et 1970 entre les tours jumelles du World Trade Center (417 mètres), à New York, la tour John Hancock (344 mètres), à Chicago, et la gigantesque tour Sears (443 mètres), aussi à Chicago. Plus récemment, à Kuala Lumpur, les tours jumelles Petronas (452 mètres), reliées par une passerelle aérienne, ont ravi le titre d'édifice le plus haut du monde.

Quelques projets spectaculaires ne furent jamais réalisés. En 1900, Désiré Despradelle, de l'Institut de technologie du Massachusetts, proposa pour l'exposition internationale de Chicago le «Phare du progrès», qui aurait atteint 457 mètres de haut. Un siècle avant les tours Petronas, il symbolisait les aspirations d'une nation jeune et fière. Pendant des années, l'énorme aquarelle de Despradelle fut suspendue dans l'atelier d'études de l'Institut de technologie du Massachusetts afin de donner de

l'inspiration aux étudiants. En 1956, l'architecte Frank Lloyd Wright (qui mesurait à peine plus de 1,50 mètre), proposa une tour de 528 étages et de 1,6 kilomètre de haut (un mile), sur les bords du lac de Chicago.

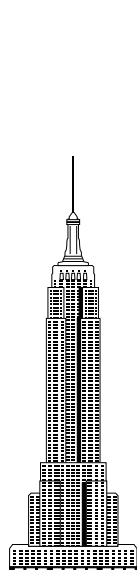
Alors que les architectes avaient ainsi des rêves de grandeur, la révolution informatique sapait le concept de gratte-ciel : le regroupement des employés de bureau dans un même lieu coûteux, en centre-ville, devenait progressivement inutile. Grâce aux progrès des télécommunications, les sociétés ont plus intérêt à s'installer dans des banlieues, où l'espace est meilleur marché et dont l'accès est simplifié. La mise au point des systèmes numériques de stockage de l'information et des réseaux informatiques a considérablement facilité l'accès à distance aux bases de données ; les archives de papier, forcément centralisées, sont quasi obsolètes. Les entreprises découvrent aussi l'avantage des annonces publicitaires sur les réseaux, tels celui du Minitel ou de l'Internet, par rapport aux lourds investissements dans des réalisations monumentales.

De plus en plus de grandes entreprises occupent des bureaux discrets en banlieue, plutôt que des tours spectaculaires en centre-ville. À Detroit, les Sociétés Ford et Chrysler se sont ainsi établies dans la verdure ; le siège de la Société Nike à Beaverton, dans l'Oregon, est assez difficile à trouver, mais pas son site Internet (www.nike.com). Les Sociétés Microsoft et Netscape rivalisent sur les

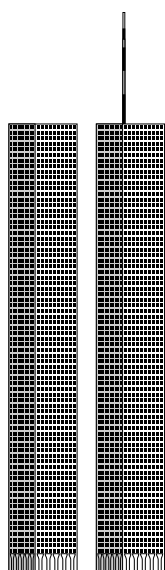
réseaux à partir de leurs sièges respectifs à Redmond, dans l'État de Washington, et à Mountain View, en Californie : bien que leurs logos, leurs programmes de navigation sur le réseau Internet et leurs sites virtuels soient familiers au monde entier, peu de leurs millions de clients connaissent l'aspect des bâtiments de leurs sièges. Enfin, la Société Sears a déplacé ses bureaux de la grande tour qui porte son nom, à Chicago, vers une banlieue éloignée.

Le temps des gratte-ciel est-il révolu ? Une visite du bar situé au sommet du prestigieux hôtel Peninsula, à Hong Kong, montre que les tours ne sont pas des dinosaures en voie d'extinction : les urinoirs sont adossés aux baies vitrées, de sorte que les hommes d'affaires peuvent contempler la ville à leurs pieds tout en se soulageant ; ils n'auraient pas ce sentiment de puissance au rez-de-chaussée. Au XXI^e siècle comme à l'époque de Chéops, les hommes édifieront des immeubles de plus en plus hauts, difficiles et coûteux à construire, simplement parce qu'ils voudront proclamer leur puissance.

William MITCHELL est doyen de l'école d'architecture et d'urbanisme à l'Institut de technologie du Massachusetts.



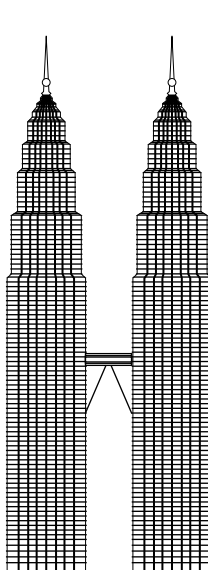
Empire State Building
1931
381 mètres
New York



World Trade Center
1972
417 mètres
New York



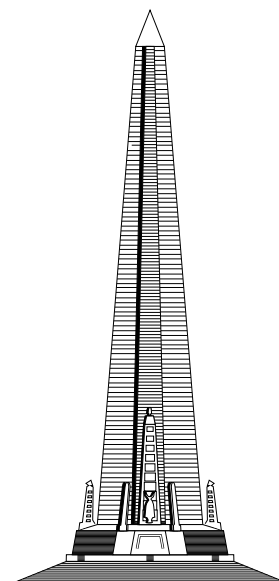
Tour Sears
1974
443 mètres
Chicago



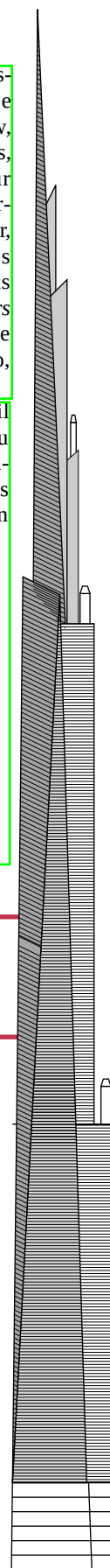
Tours Petronas
1997
452 mètres
Kuala Lumpur



Siège de Microsoft
1986
20 mètres
Redmond



Phare du progrès
Proposé en 1900
Jamais construit
457 mètres
Prévu pour Chicago



Tour d'un mile
Proposé en 1956
1 609 mètres
Prévu pour Chicago

L'attaque d'un dinosaure

DAVID THOMAS • JAMES FARLOW

Un sculpteur et un paléontologue se sont associés pour reconstruire une agression qui a eu lieu il y a 100 millions d'années.

A la fin des années 1930, de nombreux paléontologues américains étaient à la recherche de fossiles de dinosaures. L'une des fouilles n'a pas fourni d'ossements, mais des empreintes. Sur les bords de la rivière Galuxy, au Texas, une piste de dinosaures a été mise au jour : elle est matérialisée par une série d'empreintes laissées sur une ancienne plage de vase. Les traces imprimées dans le sol ont été conservées grâce aux sédiments qui les ont recouvertes et qui se sont ensuite

1. UN DINOSAURE PREDATEUR, *Acrocanthosaurus*, poursuit sa proie, l'énorme *Pleurocoelus*, un quadrupède herbivore qui s'est probablement éloigné du troupeau. Ces herbivores géants avaient la même démarche que les mammifères quadrupèdes modernes : les deux pattes du même côté se soulevaient quasi simultanément, et les pattes postérieures se plaçaient dans les empreintes laissées par les pattes antérieures.

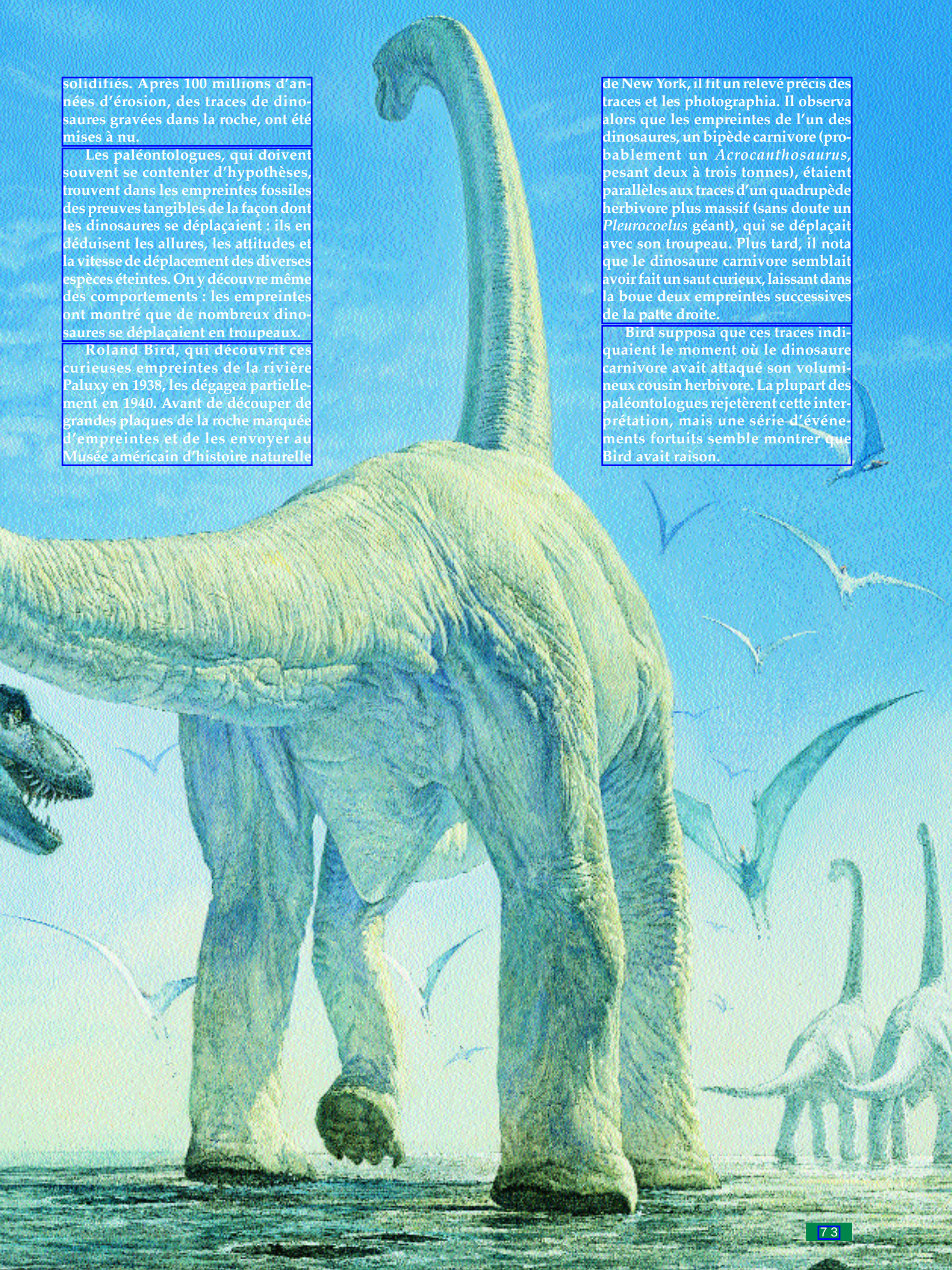
solidifiées. Après 100 millions d'années d'érosion, des traces de dinosaures gravées dans la roche, ont été mises à nu.

Les paléontologues, qui doivent souvent se contenter d'hypothèses, trouvent dans les empreintes fossiles des preuves tangibles de la façon dont les dinosaures se déplaçaient : ils en déduisent les allures, les attitudes et la vitesse de déplacement des diverses espèces éteintes. On y découvre même des comportements : les empreintes ont montré que de nombreux dinosaures se déplaçaient en troupes.

Roland Bird, qui découvrit ces curieuses empreintes de la rivière Paluxy en 1938, les dégaga partiellement en 1940. Avant de découper de grandes plaques de la roche marquée d'empreintes et de les envoyer au Musée américain d'histoire naturelle

de New York, il fit un relevé précis des traces et les photographia. Il observa alors que les empreintes de l'un des dinosaures, un bipède carnivore (probablement un *Acrocanthosaurus*, pesant deux à trois tonnes), étaient parallèles aux traces d'un quadrupède herbivore plus massif (sans doute un *Pleurocoelus* géant), qui se déplaçait avec son troupeau. Plus tard, il nota que le dinosaure carnivore semblait avoir fait un saut curieux, laissant dans la boue deux empreintes successives de la patte droite.

Bird supposa que ces traces indiquaient le moment où le dinosaure carnivore avait attaqué son volumineux cousin herbivore. La plupart des paléontologues rejetèrent cette interprétation, mais une série d'événements fortuits semble montrer que Bird avait raison.





Avec l'aimable autorisation de ABC/Kana Productions

2. LES MAMMIFÈRES MODERNES synchronisent souvent leurs enjambées sur celles de leur proie avant l'attaque. La lionne du premier plan adopte ainsi le rythme du buffle au galop : les pattes postérieures des deux animaux se projettent vers l'avant en même temps (a), puis les pattes antérieures (b) et à nouveau les pattes postérieures (c), jusqu'à ce que le lion attaque le buffle par l'arrière (d).

Des documents inédits

Six ans après le décès de Bird, en 1984, l'Université du Texas voulut publier son autobiographie et demanda à l'un d'entre nous (J. Farlow) d'en assurer l'édition. Nous avons ainsi découvert que Bird mentionnait des schémas, des relevés et un film, inconnus des paléontologues, sur la découverte des empreintes de la rivière Paluxy.

Interrogées, la femme et la sœur de Bird nous indiquèrent que celui-ci avait effectivement conservé des informations, et l'un de ses neveux découvrit le film dans une boîte soigneusement rangée dans un réfrigérateur, à la cave, chez son oncle. Une autre boîte, dans le grenier, contenait d'innombrables notes, accompagnées de relevés des empreintes. Ces relevés étaient inestimables, car, depuis 1940, les traces avaient été dégradées : une grande partie avait disparu (Bird avait envoyé beaucoup de fragments à New York et à Austin), et les crues saisonnières de la rivière avaient érodé la surface de la roche et l'avaient recouverte de sédiments.

Heureusement, les relevés et les photographies de Bird montraient l'emplacement de chacune des empreintes, de sorte que le site put être à nouveau exploré. Les résultats furent publiés en 1987 : les deux traces parallèles correspondaient bien à un dinosaure qui en poursuivait un autre. Restait ce saut mystérieux, dont l'interprétation nécessita les compétences d'un sculpteur.

Science et sculpture

En 1983, la ville d'Albuquerque avait chargé l'un d'entre nous (D. Thomas) de construire une statue de dinosaure grandeur nature pour le Musée d'histoire naturelle du Nouveau-Mexique (ce premier travail fut suivi par la réalisation d'autres dinosaures, en bronze et en fibres de verre, destinés à divers musées du monde entier). Pour donner à ces reproductions des postures réalistes, il fallut étudier comment ces animaux se déplaçaient et quelles étaient leurs allures.

Une étude rapide montra que les mammifères quadrupèdes, tels les éléphants, marchent souvent sur leurs propres empreintes, posant leurs pattes postérieures dans la trace des pattes antérieures correspondantes (lors de cette allure nommée «amble», les deux pattes d'un même côté quittent le sol simultanément). En revanche, les reptiles

modernes ne posent jamais les pattes postérieures au même endroit que les pattes antérieures : ils avancent en déplaçant simultanément une patte antérieure et la patte postérieure opposée, de sorte que la patte postérieure d'un côté se pose avant que la patte antérieure collatérale ne se soulève.

D'après leurs empreintes, les dinosaures quadrupèdes avaient une démarche similaire à celle des mammifères d'aujourd'hui, différente de celle de la plupart des reptiles

modernes. Les traces mises au jour sur les berges de la rivière texane ont révélé que les empreintes des pattes postérieures des dinosaures herbivores quadrupèdes coïncident généralement avec celles des pattes antérieures.

Les mammifères modernes peuvent-ils nous informer sur les reptiles disparus qui, jadis, parcouraient ces plages ? Pour tester l'hypothèse de Bird, D. Thomas étudia comment les mammifères prédateurs chassent. Avant d'attaquer, ils adaptent leur vitesse et

leur direction à celles de leur proie, et ils ajustent en outre leurs enjambées pour adopter le même rythme que l'animal qu'ils pourchassent.

Par exemple, un lion, un guépard ou tout autre félin rapide accélère d'abord pour rattraper sa proie, puis modifie la longueur de ses foulées pour les ajuster sur celles de l'animal pourchassé. Il ralentit ainsi en adoptant le rythme de l'animal poursuivi, souvent plus volumineux et galopant aussi vite que possible pour tenter de s'échapper.



American Museum of Natural History



American Museum of Natural History

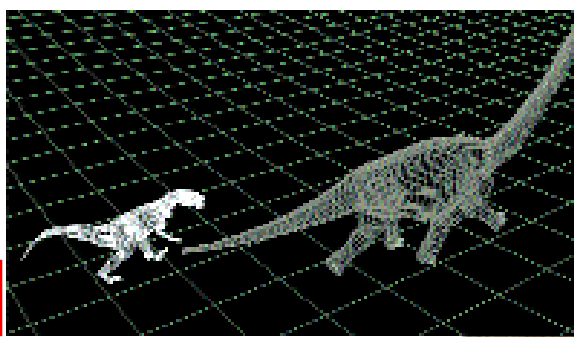
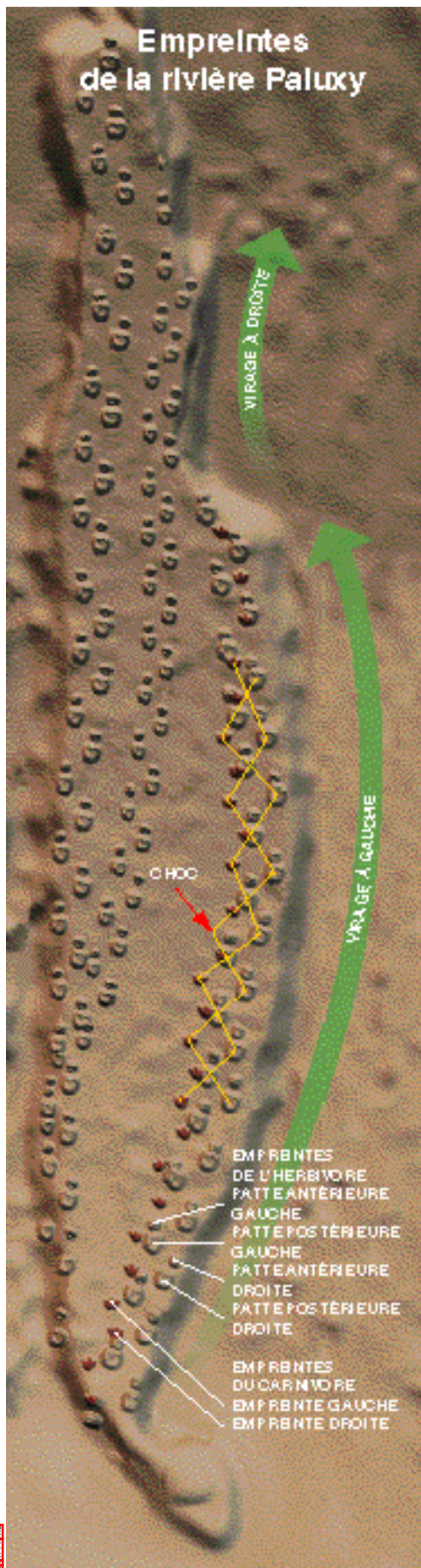


Steve Parris

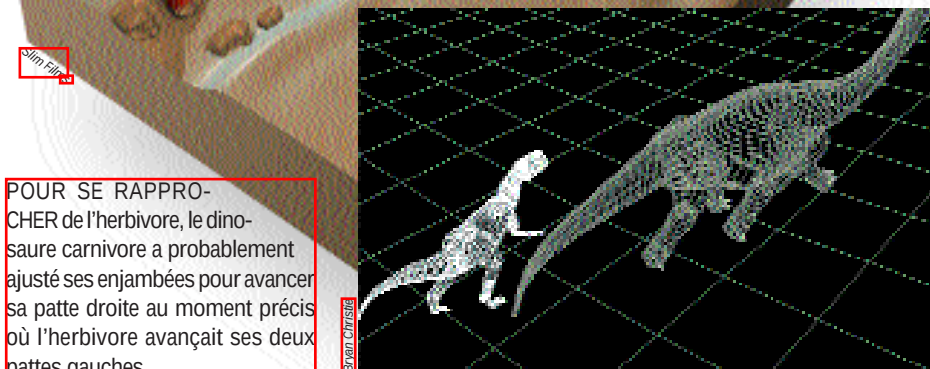
3. LES EMPREINTES FOSSILES d'une piste proche de la rivière Paluxy, au Texas, ont été mises au jour par Roland Bird et ses collaborateurs en 1938 (à gauche). Une grande plaque de la roche mise à nu fut envoyée au Musée américain d'histoire naturelle de New York,

où elle est exposée (en haut à droite). Bird a également fourni au Mémorial texan, à Austin, un fragment de la piste contenant une empreinte, avec une traînée caractéristique (en bas à droite) laissée par l'herbivore quadrupède, peut-être juste après l'attaque du carnivore.

Empreintes de la rivière Paluxy



LA RECONSTITUTION DE LA SEQUENCE D'ATTAQUE indique que le carnivore se serait rapproché en synchronisant ses enjambées avec celles de sa proie.



POUR SE RAPPROCHER de l'herbivore, le dinosaure carnivore a probablement ajusté ses enjambées pour avancer sa patte droite au moment précis où l'herbivore avançait ses deux pattes gauches.

Le prédateur doit impérativement avoir la même vitesse que sa proie, sinon il aura des difficultés à assener un coup efficace lors de l'attaque.

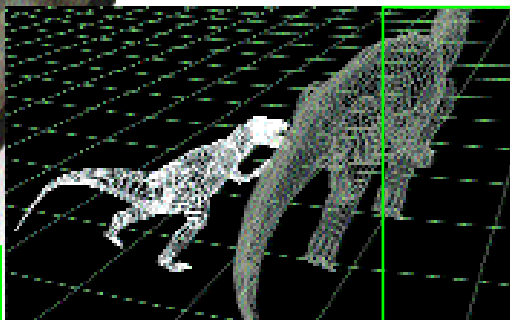
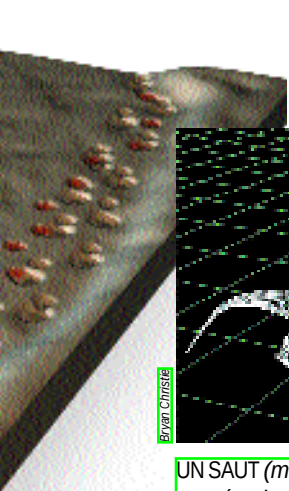
Une étude des attaques de divers prédateurs d'Afrique (des lions, des léopards, des guépards et des hyènes) a montré que cette synchronisation est quasi générale. Quand ils ne prennent pas le même rythme, c'est qu'ils veulent tendre une embuscade et jouent sur l'effet de surprise. La cadence diffère aussi quand l'attaquant est beaucoup plus gros que la proie ; il n'est alors ni pratique ni nécessaire pour le prédateur d'ajuster ses enjambées.

On ne doit évidemment pas extrapoler sans discernement ces observations aux empreintes de la rivière Paluxy, car les mammifères quadrupèdes

modernes sont très différents des dinosaures bipèdes ou quadrupèdes. Par exemple, tous les prédateurs modernes étudiés galopent quand ils chassent, tandis que le dinosaure carnivore bipède du Texas marchait vite ou courait lentement. Le dinosaure chassé au Texas marchait sans doute comme un grand mammifère. Toutefois, il est vraisemblable qu'au début du Crétacé, tout comme aujourd'hui, les prédateurs savaient qu'ils avaient intérêt à harmoniser leur rythme avec celui de leur proie.

Avant de penser qu'une attaque eut lieu le long de ce qui est aujourd'hui la rivière Paluxy, on doit se demander si les deux animaux ne se sont pas simplement déplacés sur la même piste, à plusieurs heures, voire à plusieurs jours d'écart. Les relevés de Bird mon-

4. LES TRACES relevées par Bird montrent que les empreintes du carnivore bipède (en rouge) sont parallèles à celles qu'ont laissées plusieurs herbivores quadrupèdes (elles s'incurvent vers la gauche). Ensuite, les deux dinosaures ont probablement tourné vers la droite (et on perd leur trace, hors de la zone dégagée), car leurs empreintes ne croisent pas celles des deux autres pistes. Les empreintes du prédateur et de sa proie sont remarquablement parallèles sur une douzaine de pas (les traits jaunes), indiquant que leur course était synchronisée, à l'exception d'un endroit où le carnivore semble avoir sauté, laissant sur le sol deux empreintes successives de sa patte droite (la flèche rouge).



UN SAUT (matérialisé par la présence de deux empreintes consécutives de la patte droite) indique l'endroit où le carnivore a porté un premier coup à sa proie.

trent plutôt que les deux animaux étaient présents au même endroit, au même moment : non seulement les deux tracés sont parallèles, mais les trajectoires ondulent de la même façon ; les faibles déviations de l'un des animaux ont modifié la trajectoire de l'autre. De surcroît, vers la fin du tracé mis au jour, les empreintes du carnivore et de l'herbivore amorcent un virage vers la gauche. Si l'un des deux animaux avait continué dans cette direction, ses empreintes auraient croisé les traces adjacentes, ce qui n'est pas le cas. Les deux animaux ont sans doute tourné à droite au-delà de la zone dégagée par Bird. Ainsi, les deux trajectoires indiquent quelques écarts et deux grands virages en parallèle : les deux animaux couraient ensemble.

Une attaque, il y a 100 millions d'années

Le dinosaure carnivore poursuivait vraisemblablement un herbivore. Le prédateur a probablement approché sa proie par l'arrière, d'abord en retrait de quelques pas pour la jauger. Puis il aurait adapté son rythme en ajustant la longueur de ses enjambées, comme le font les mammifères aujourd'hui. Ce comportement est étayé par des tracés d'empreintes quasi semblables pour les deux animaux. Sur une dizaine de pas, le carnivore a placé sa patte droite près de l'empreinte (voire dans l'empreinte) laissée par la patte postérieure gauche de l'herbivore. Ce sont exactement les traces que l'on obtiendrait si le carnivore poursuivait l'herbivore aussi près que possible, mais sans le heurter, un peu en arrière et légèrement sur la gauche.

Selon Bird, le carnivore aurait attaqué sa proie à mi-chemin des traces mises au jour. Cette hypothèse semble plausible, en raison de la similitude entre

les espacements des deux types d'empreintes, et de l'absence de l'empreinte gauche qui correspondrait à un saut du carnivore. Cette hypothèse est également confortée par une autre pièce mise au jour il y a plus de 50 ans.

Comme le montre l'une des plaques conservées au Mémorial du Texas, Bird avait observé que l'herbivore a traîné sa patte postérieure droite

quelques pas après l'endroit où sont localisées les deux empreintes successives de la patte postérieure droite du carnivore. On imagine que le carnivore a sauté pour atteindre sa proie, juste devant lui, la faisant trébucher au moment où il l'a touchée. L'herbivore a sans doute tenté une manœuvre défensive : il aurait tenté de déstabiliser l'attaquant en le bousculant juste avant d'être atteint, amplifiant son mouvement de défense par un virage à gauche.

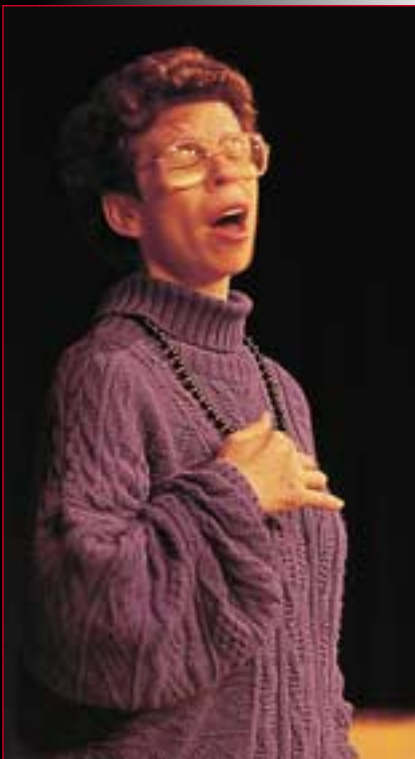
Combien de carnivores ont participé à la chasse ? Pourquoi l'herbivore immortalisé par ses traces a-t-il été choisi dans le troupeau ? La plupart des traces qui répondraient à ces questions restent enfouies, mais on sait qu'il y a environ 100 millions d'années, sur une plage de vase, un carnivore rapide a isolé et peut-être attaqué un énorme herbivore à la démarche pesante. Bird a eu de la chance quand il a découvert les preuves de cet épisode d'histoire naturelle, mais il a eu surtout le talent de reconnaître, de consigner et de préserver une partie des traces que cette chasse ancestrale a laissées sur un sol détrempe, aujourd'hui transformé en pierre.

David THOMAS a sculpté des statues de dinosaures grandeur nature, en bronze, pour plusieurs musées du monde. Le paléontologiste James FARLOW est professeur de géologie à l'Université de Fort Wayne.

James O. FARLOW, *Lower Cretaceous Dinosaur Tracks, Paluxy River Valley, Texas*, South Central g.s.a., Baylor University, 1987.

James O. FARLOW, *The Dinosaurs of Dinosaur Valley State Park*, Texas Parks and Wildlife Press, 1993.

The Complete Dinosaur, sous la direction de James O. Farlow et M.K. Brett-Surman, Indiana University Press, 1997.



Le syndrome de Williams

HOWARD LENHOFF • PAUL WANG
FRANK GREENBERG • URSULA BELLUGI

Pour mieux comprendre l'organisation du cerveau, les neurologues s'intéressent à une maladie rare.

Une adolescente se présente à notre consultation. Son quotient intellectuel (le QI) atteint à peine 49 (le QI moyen est égal à 100). Nous lui demandons de dessiner un éléphant et de raconter ce qu'elle sait de cet animal. Son dessin est indéchiffrable, mais sa description de l'animal est d'une richesse étonnante, quasi poétique : « Il a de longues oreilles grises, en éventail, qui battent dans le vent... »

Cette jeune fille est atteinte du syndrome de Williams, un trouble rare, auquel les médecins commencent à s'intéresser. Les personnes atteintes ont seulement quelques points communs : elles ont un handicap mental modéré, avec un QI inférieur à la moyenne ; elles ont des difficultés en lecture, en écriture et en arithmétique, même élémentaire. En revanche, elles ont des capacités étonnantes dans certains domaines : elles parlent très bien et reconnaissent remarquablement les visages ; elles sont généralement ouvertes, loquaces et sociables.

De surcroît, les personnes ayant un syndrome de Williams ont un talent musical hors du commun. Bien qu'elles aient des difficultés à soutenir leur attention dans la plupart des tâches, elles écoutent de la

musique, chantent et jouent d'un instrument avec une surprenante persévérance. La plupart ne savent pas déchiffrer la musique, mais jouent et chantent parfaitement juste, avec un sens du rythme étonnant : un de nos jeunes patients a rapidement appris à battre un rythme à sept temps d'une main, tout en battant un rythme à quatre temps de l'autre main. Beaucoup de ces personnes retiennent, pendant plusieurs années, des mélodies élaborées et les couplets de longues ballades ; l'une d'elles chante même des chansons en 25 langues. Les musiciens expérimentés ayant un syndrome de Williams n'ont aucun mal à déchiffrer, improviser et composer des mélodies.

Étonnés par de telles capacités, des psychophysiologistes ont décidé d'étudier systématiquement les aptitudes musicales des enfants ayant un syndrome de Williams : il est aujourd'hui établi que ces enfants reconnaissent bien les mélodies et sont plus intéressés et plus touchés par la musique que la moyenne de la population. L'un de ces enfants disait : « La musique est ma façon préférée de penser. »

Pourquoi les neurobiologistes s'intéressent-ils au syndrome de Wil-

1. LES PERSONNES AYANT UN SYNDROME DE WILLIAMS ont à la fois des déficits cognitifs et des capacités étonnantes. Ainsi, une adolescente dont le QI est égal à 49, à qui l'on avait demandé de dessiner et de décrire un éléphant, a fait un gribouillis incompréhensible (page ci-contre, à gauche), mais elle a, par ailleurs, donné une description très riche de l'animal (à droite). Certaines personnes atteintes de ce syndrome sont très douées pour la musique ; les trois photographies de gauche ont été prises l'été dernier dans un atelier musical et artistique organisé pour les personnes ayant un syndrome de Williams, dans le Massachusetts.

Williams? Parce que l'étude des capacités des personnes atteintes devrait nous renseigner sur l'organisation et sur la plasticité du cerveau normal. Certaines équipes tentent d'identifier les caractéristiques du cerveau de ces personnes et de comprendre comment elles déterminent leurs performances intellectuelles générales. Simultanément, des généticiens essaient de découvrir les anomalies génétiques qui sont responsables du syndrome de Williams.

Une lente accumulation des connaissances

En 1993, ils ont découvert que le syndrome résulte de l'absence d'un fragment dans l'un des deux chromosomes 7. Le fragment absent contient normalement plus d'une quinzaine de gènes. L'identification de ces derniers révèle comment leur absence produit les caractéristiques neuro-anatomiques et comportementales observées. Cette étude globale du syndrome de Williams – de la génétique à la neurobiologie, puis au comportement – deviendra peut-être un modèle pour l'étude de l'influence des gènes sur le développement et sur le fonctionnement du cerveau.

L'analyse des gènes manquants intéresse également la médecine, car elle a révélé pourquoi les personnes atteintes ont d'autres anomalies physiques. Elle a aussi permis la mise au point de tests de dépistage prénatals et d'un diagnostic plus précoce du

trouble : les enfants identifiés sont mieux pris en charge et orientés.

Le syndrome de Williams atteint un enfant sur 20 000 et s'observe dans toutes les populations. Nous pensons qu'il est connu depuis longtemps et que les personnes atteintes ont inspiré certains contes populaires sur les lutins, les elfes et autres personnages féériques (voir l'encadré de la page 83).

Toutefois, le syndrome n'a été décrit qu'en 1961, quand le cardiologue néo-zélandais J.C.P. Williams observa que certains des enfants qu'il suivait avaient les mêmes caractéristiques : un visage de lutin, avec un nez en trompette et un petit menton ; et des troubles cardio-vasculaires, notamment un souffle au cœur et un rétrécissement des principaux vaisseaux sanguins, souvent de l'aorte (cette «sténose aortique supravulvaire» est parfois très grave).

Depuis cette observation, les médecins ont relevé d'autres caractéristiques, qui apparaissent parfois très tôt. Certains nouveau-nés ont des difficultés à se nourrir et souffrent de maux d'estomac, de constipation et de hernies. Ils dorment mal, sont irritables et grincheux, en raison d'une autre anomalie : un excès de calcium dans le sang. Quand les enfants grandissent, leur voix devient rauque et ils se développent plus lentement que les autres. Ils commencent à marcher vers 21 mois, souvent sur la pointe des pieds et avec une maladresse qui persiste toute la vie. Leurs

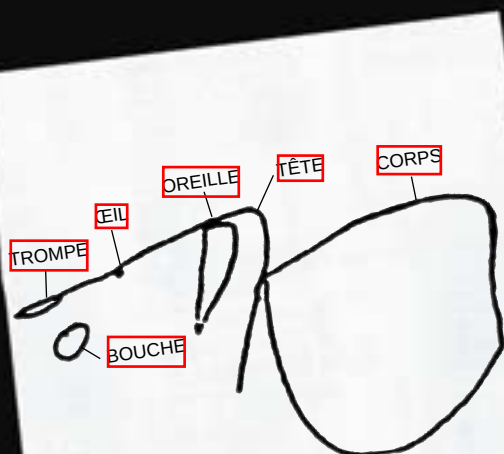
mouvements sont maladroits. Adultes, les personnes atteintes du syndrome de Williams sont très sensibles au bruit, elles sont souvent plus petites que la moyenne et semblent vieillir prématurément (leurs cheveux grisonnent et les rides apparaissent relativement tôt).

L'identification des gènes manquants

Les premiers indices d'une anomalie génétique sont apparus en 1993, grâce à une étude de la sténose aortique supravulvaire. L'équipe qui effectuait cette étude ne s'intéressait pas initialement aux personnes souffrant d'un syndrome de Williams, et elle découvrit que la sténose résultait parfois d'une mutation, héritée d'un parent, d'un des deux exemplaires du gène qui code l'élastine. Cette protéine confère leur élasticité à de nombreux organes et tissus, tels les artères, les poumons, les intestins et la peau.

Sachant que la sténose aortique supravulvaire est fréquente chez les personnes ayant un syndrome de Williams et que les personnes ayant une sténose aortique supravulvaire familiale souffrent de dysfonctionnements des organes «élastiques», les médecins se sont demandé si le syndrome de Williams résultait d'une anomalie du gène de l'élastine. Ils ont découvert que ce gène manquait sur un des deux chromosomes 7. Aujourd'hui, on sait que le gène de l'élastine est absent chez environ 95 pour cent

Dessin et description d'un éléphant par une adolescente ayant un syndrome de Williams



«Qu'est-ce qu'un éléphant? C'est un animal. Que fait un éléphant? Il vit dans la jungle. Il peut aussi vivre dans un zoo. Et il a de longues oreilles grises, des oreilles en éventail, des oreilles qui battent dans le vent. Il a une longue trompe qui peut ramasser de l'herbe ou de la paille. Quand ils sont de mauvaise humeur, cela peut être terrible. Quand un éléphant se met en colère, il peut taper du pied ; il peut charger. Parfois, les éléphants chargent. Ils ont des défenses grosses et longues. Ils peuvent abîmer une voiture. Ils peuvent être dangereux. Quand ils sont menacés ou qu'ils se fâchent, cela peut être terrible. Vous ne voulez pas d'un éléphant comme animal de compagnie. Il vaut mieux avoir un chat, ou un chien, ou un oiseau.»

des personnes atteintes du syndrome. L'anomalie est grave, car les deux exemplaires du gène sont probablement nécessaires pour fabriquer une quantité suffisante d'élastine.

Une diminution de la production d'élastine pouvait expliquer diverses anomalies physiques associées au syndrome de Williams, telles la sténose aortique supra-ventriculaire, les hernies et les rides prématurées, mais quelle pouvait être son rôle dans le retard cognitif et comportemental? Si le manque d'élastine était responsable de tous les symptômes du syndrome de Williams, les personnes ayant seulement une sténose aortique supra-ventriculaire sans retard cognitif devraient aussi avoir des QI faibles. Puisque ce n'était pas le cas, c'est que d'autres gènes sont anormaux dans le syndrome de Williams. Cette hypothèse fut étayée par l'examen des chromosomes de personnes ayant un syndrome de Williams : l'analyse du chromosome 7

montra que le gène de l'élastine n'était pas le seul à manquer.

On sait aujourd'hui que les personnes atteintes du syndrome n'ont pas les gènes *LIM-kinase 1*, *FZD3* et *WSCR1*, par exemple : actifs dans le cerveau des individus normaux, ces gènes participent sans doute à son développement et à son fonctionnement. On ignore le rôle précis des protéines qu'ils codent, mais, selon Amanda Ewart et ses collègues de l'Université de l'Utah, le gène *LIM-kinase 1* (qui manque invariablement quand celui de l'élastine est absent, chez les personnes atteintes du syndrome de Williams) participerait à l'élaboration des relations spatiales. Cela expliquerait pourquoi les personnes ayant un syndrome de Williams ont des difficultés à dessiner de mémoire des objets usuels. Un autre gène absent, *RFC2*, code une protéine qui participe à la répllication de l'ADN, mais on ignore encore

sa contribution éventuelle au syndrome de Williams.

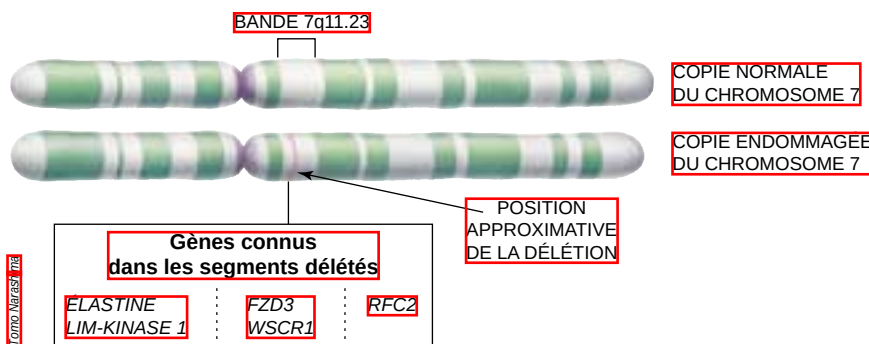
Bien que toutes les causes génétiques du syndrome ne soient pas élucidées, on sait que l'anomalie a son origine dans un ovule ou dans un spermatozoïde qui, par hasard, a perdu des gènes du chromosome 7 avant la fécondation. Les frères et les sœurs sains des personnes ayant un syndrome de Williams ont un chromosome 7 intact ; ils ne risquent pas particulièrement d'avoir des enfants atteints du syndrome de Williams. Enfin, la technique microscopique qui a révélé la délétion du gène de l'élastine – l'hybridation *in situ* par fluorescence – a été transformée en outil diagnostique.

Le profil cognitif

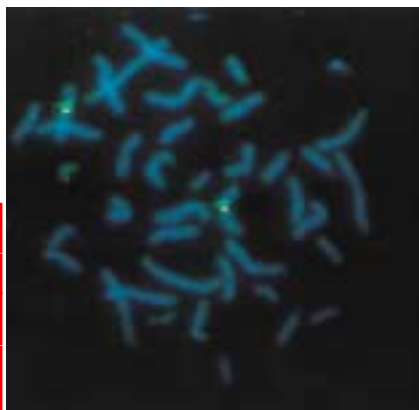
L'étude des causes génétiques du syndrome de Williams aide les explorations neurobiologiques de la maladie. Ces dernières ont commencé il y a une quinzaine d'années, lorsque Ursula Bellugi reçut un appel nocturne, dans son laboratoire de l'Institut Salk, à La Jolla. L'interlocuteur savait qu'U. Bellugi travaillait sur la neurobiologie du langage, et il pensait que sa fille, qui avait un syndrome de Williams, pourrait l'intéresser. Le QI de la jeune fille, qui avait alors 13 ans, était de 50, et on la considérait comme une handicapée mentale : elle lisait et écrivait comme un enfant de 6 ans, mais elle parlait très bien.

À l'époque (et encore aujourd'hui), on savait mal différencier les mécanismes cérébraux du langage de ceux du raisonnement, car, dans la population générale, les capacités cognitives et verbales sont étroitement liées. U. Bellugi pensa que l'étude de personnes ayant un syndrome de Williams, chez qui capacités cognitives et langage sont indépendantes, aiderait les neurobiologistes à dissocier ces deux mécanismes.

Elle accepta donc de rencontrer la fillette et la revit plusieurs fois. À l'époque, les déficits et les potentialités des personnes ayant un syndrome de Williams étaient très mal connus. Avant d'identifier les aires cérébrales et les mécanismes neurobiologiques responsables des caractéristiques spécifiques du syndrome de Williams, elle voulut d'abord les préciser. Avec ses collègues, elle conçut des tests d'évaluation des apti-



CELLULE NORMALE



CELLULE DU SYNDROME DE WILLIAMS



2. UNE PETITE DÉLÉTION d'un des deux chromosomes 7 est responsable du syndrome de Williams. La région absente contient normalement une quinzaine de gènes, dont quelques uns ont été identifiés. Le gène de l'élastine fait généralement partie des gènes perdus. Un test diagnostique est fondé sur la perte de ce gène : on marque les chromosomes 7 à l'aide d'une substance fluorescente verte et le gène de l'élastine avec une substance fluorescente rouge. Sur les chromosomes (en bleu) d'une cellule d'un sujet normal (photographie de gauche) on voit deux signaux verts et deux signaux rouges, ce qui indique que les deux copies du chromosome 7 sont présentes et que chacune porte le gène de l'élastine. Au contraire, chez les personnes ayant un syndrome de Williams, un signal rouge manque sur le chromosome 7, où le gène de l'élastine a été déléété (photographie de droite).

tudes et compara les résultats obtenus par les personnes ayant un syndrome de Williams avec ceux de la population générale et avec ceux de personnes trisomiques.

Quand on compare ainsi des adolescents qui ont le même âge et le même QI (le QI des personnes ayant un syndrome de Williams est compris entre 40 et 100, mais le score moyen est de 60), on observe que les personnes ayant un syndrome de Williams, dont les performances aux tests de capacités cognitives générales sont faibles, utilisent couramment des formes grammaticales correctes. Globalement, leurs performances sont meilleures que celles des personnes trisomiques dans tous les tests grammaticaux.

La plupart réussissent aussi assez bien les tests d'agencement de mots ; partant de la phrase : «Stéphanie aime le poisson», on demande de substituer au sujet un pronom et de dire «Elle aime le poisson». Ensuite, on passe à la forme négative : «Elle n'aime pas le poisson» ou à la forme interrogative : «Aime-t-elle le poisson?», ce qui nécessite d'inverser l'ordre du sujet et du verbe.

L'équipe de l'Institut Salk a également découvert que les personnes ayant un syndrome de Williams ont souvent un vocabulaire plus riche que leur âge mental ne le laisserait supposer. Lorsqu'on leur demande d'énumérer des animaux, ils choisissent souvent des exemples exotiques tels que le yak, le chihuahua, le condor ou la licorne.

De surcroît, ces enfants sont souvent plus loquaces que les enfants normaux. Ainsi, quand on leur demande d'imaginer une histoire à partir d'une série d'images sans paroles, ils modulent le ton, l'intensité, la longueur des mots, ou encore le rythme, pour renforcer la portée émotionnelle de leur histoire. Pour captiver leur auditoire, ils renforcent l'intensité dramatique de leur récit par des interjections (boum, splash, etc.), ce que ne font pas les enfants trisomiques. Ces talents oratoires et les bonnes relations sociales qu'ils savent créer risquent de faire croire à leurs enseignants que ces enfants ont davantage de facilités de raisonnement qu'ils n'en ont ; ils ne reçoivent alors pas l'aide scolaire dont ils ont besoin.

Pour expliquer les capacités linguistiques associées au syndrome de Williams, on doit supposer que, contrai-

rement à l'anomalie génétique des trisomiques, celle de ces personnes ne perturbe pas notablement les opérations du langage. Effectivement, la mémoire à court terme des sons articulés, ou «mémoire phonologique» (une forme de mémoire qui intervient dans l'apprentissage et la compréhension du langage), semble préservée chez les personnes ayant un syndrome de Williams.

Toutefois, des études récentes de Français et d'Italiens ayant un syndrome de Williams ont montré que l'aspect morphologique du langage

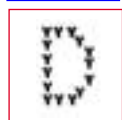
(c'est-à-dire la partie de la grammaire qui traite de la conjugaison, du genre et du nombre des noms) ne serait pas totalement préservé dans le syndrome de Williams. Cette découverte montre que les régions cérébrales préservées dans ce syndrome et une mémoire à court terme intacte des sons articulés suffisent à assurer les aptitudes verbales, mais n'assurent pas une maîtrise complète du langage.

Les personnes atteintes d'un syndrome de Williams ont de mauvais résultats aux tests qui nécessitent un traitement visuel (un test consiste, par

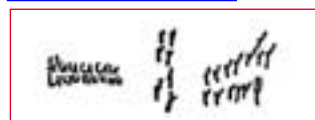
Le profil cognitif

Les neurobiologistes ont présenté les mêmes tests à des personnes ayant un syndrome de Williams et à des trisomiques. Au cours d'un de ces tests (*en haut*), on demandait à des adolescents de recopier de mémoire une lettre *D* construite avec des y. Le groupe des personnes ayant un syndrome de Williams ne dessine que les y, tandis que les trisomiques conservent l'organisation générale, mais omettent les détails. Au cours d'un autre test (*en bas*), on demande d'inventer une histoire à partir d'images sans paroles ; les personnes ayant un syndrome de Williams inventent des histoires bien structurées.

Tâche :
REPRODUIS
L'IMAGE



Syndrome de Williams



Trisomie



Tâche : INVENTE UNE HISTOIRE POUR CES IMAGES



Adolescent de 17 ans ayant un syndrome de Williams, avec un QI de 50 (les fautes sont intentionnelles)

«Il était une fois, alors qu'il faisait nuit noire, le garçon avait une grenouille. Le garçon regardait la grenouille, assis sur une chaise, sur la table, et le chien regardait la grenouille dans un bocal. Cette nuit-là, il dorma et dormit longtemps, le chien aussi. Mais la grenouille n'avait pas du tout envie de dormir. La grenouille sortit du bocal. Et quand la grenouille sortit, le garçon et le chien dormaient toujours. Le lendemain matin, il faisait beau dans le matin. Il faisait clair, et le soleil était beau et chaud. Soudain, quand il ouvrit les yeux, il regarda le bocal, et soudain la grenouille n'était plus là. Le bocal était vide. La grenouille était introuvable.»

Adolescent de 18 ans trisomique, avec un QI de 55

«La grenouille est dans le bocal. Le bocal est posé par terre. Le bocal par terre. C'est tout. Le tabouret est casse. Les habits traîne là.»

exemple, à recopier des dessins), mais leurs difficultés diffèrent de celles des enfants trisomiques. Les déficits auraient des origines cérébrales différentes. Ainsi, les personnes ayant un syndrome de Williams, comme celles qui ont eu l'hémisphère droit lésé par un accident vasculaire cérébral, repéreraient les composantes de l'image, mais ne sauraient pas «voir» la configuration générale. Au contraire, les trisomiques perçoivent l'organisation générale, mais captent difficilement les détails, comme des personnes ayant l'hémisphère gauche atteint par un accident vasculaire cérébral.

Il serait simpliste de croire, sur la seule base des tests cognitifs, que les anomalies chromosomiques du syndrome de Williams épargnent l'hémisphère gauche (la principale région du traitement du langage), mais perturbent l'organisation de l'hémisphère droit (l'hémisphère de la vision et de l'organisation spatiale) : les personnes ayant un syndrome de Williams n'expriment pas moins bien leurs sentiments, au contraire, que les personnes trisomiques. De surcroît, elles reconnaissent très bien les visages familiers parmi diverses photographies (une capacité assurée par l'hémisphère droit).

L'apport des études neurologiques

Les analyses par résonance magnétique et les autopsies de personnes décédées confirment que les modifications cérébrales sont complexes. Diverses anomalies anatomiques (par exemple, des groupes anormaux de neurones dans les aires visuelles) entraînent des déficits des capacités visuelles et spatiales. Toutefois, l'anomalie chromosomique semble épargner un réseau qui comprend des structures des lobes frontaux et temporaux, et du cervelet. Ce réseau serait le support neuro-anatomique des capacités linguistiques des personnes ayant un syndrome de Williams.

Les études neuro-anatomiques montrent que le cerveau des personnes ayant un syndrome de Williams ou une trisomie est moins gros que celui de témoins du même âge, mais que le volume de certaines régions diffère d'un groupe à l'autre. Ainsi, les lobes frontaux et les aires limbiques des lobes temporaux sont mieux préservés chez les personnes qui ont un syndrome

de Williams. Le système limbique participe aux activités cérébrales relatives à la mémoire et aux émotions ; la préservation de la région limbique expliquerait pourquoi les personnes ayant un syndrome de Williams sont si expressives.

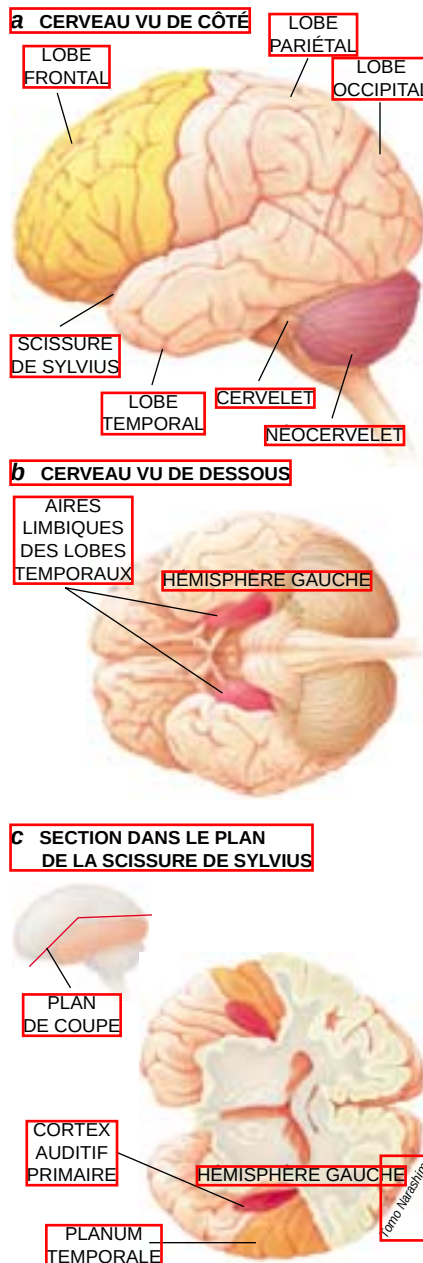
L'étude du cervelet a révélé d'autres différences entre les cerveaux des deux groupes : réduit chez les trisomiques, il est normal chez les per-

sonnes ayant un syndrome de Williams. Le néocervelet de ces dernières (la région que l'on considère comme étant la plus récente, sur le plan évolutif) est de même taille ou plus gros que dans la population générale du même âge, tandis qu'il est plus petit chez les trisomiques.

Longtemps on a pensé que le néocervelet servait surtout à la commande des mouvements. Pourtant, Steven Petersen et ses collègues de l'Université de Washington ont montré que le néocervelet s'active quand on pense simultanément à un verbe et à un nom (par exemple, «s'asseoir» et «chaise»). De surcroît, des tests réalisés sur des personnes ayant une lésion du cervelet (et donc des déficits des fonctions motrices) révèlent aussi des déficits des fonctions cognitives. Enfin, les neuro-anatomistes ont montré que le néocervelet établit avec le cortex frontal un réseau de communications plus développé chez l'homme que chez le singe (le néocervelet lui-même est plus volumineux chez l'homme).

Comme les hommes parlent, et non les singes, des neurobiologistes ont supposé que le néocervelet et la région du cortex frontal avec laquelle il communique auraient évolué simultanément, et assureraient le traitement du langage parlé ; ces deux régions seraient commandées par les mêmes gènes. Or, chez les personnes ayant un syndrome de Williams, le cortex frontal est quasi normal, le néocervelet est plus volumineux que la normale, et les capacités linguistiques sont bonnes : ces constatations confortent l'hypothèse précédente et celle du rôle probable du cervelet dans le traitement du langage.

D'autres caractéristiques anatomiques récemment découvertes expliqueraient en partie les talents musicaux des personnes ayant un syndrome de Williams : le cortex auditif primaire (localisé dans le lobe temporal) et la région auditive adjacente, le planum temporale (qui aurait un rôle important pour le langage et pour le sens de la musique), sont plus volumineux que la normale dans les quelques cerveaux de personnes ayant un syndrome de Williams examinés jusqu'à présent. De plus, le planum temporale est normalement plus volumineux dans l'hémisphère gauche que dans le droit, mais, chez certaines personnes ayant un syn-



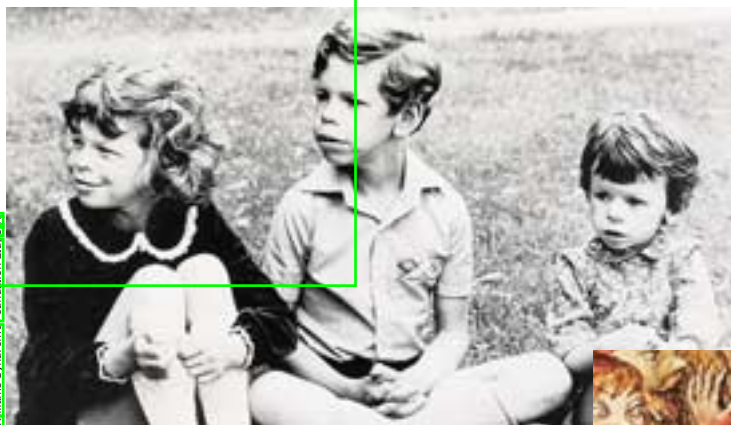
3. L'ANATOMIE DU CERVEAU des personnes ayant un syndrome de Williams est normale, mais le volume cérébral est un peu inférieur à la moyenne. Les aires les mieux préservées sont les lobes frontaux et une partie du cervelet nommée le néocervelet (a), les aires limbiques des lobes temporaux (b), le cortex auditif primaire et le planum tempore (c).

Le syndrome de Williams : à la base des contes de fées ?

De nombreuses légendes mentionnent de petits personnages magiques : des fées, des lutins, des trolls et autres êtres féeriques. Ces personnages ont certaines des caractéristiques physiques et comportementales des personnes ayant un syndrome de Williams, lesquelles auraient pu inspirer ces anciennes légendes. D'ailleurs, de nombreux historiens affirment que des événements réels ont inspiré une bonne partie du folklore et de la mythologie.

Le visage des enfants ayant un syndrome de Williams est souvent décrit comme celui d'un lutin : ils ont un petit nez en trompette, des yeux « gonflés », des oreilles ovales et une grande bouche avec des lèvres charnues, accentuées par un petit menton.

Ces traits sont si fréquents que ces enfants se ressemblent plus qu'ils ne ressemblent à leurs propres frères et sœurs. Les ressemblances s'estompent avec l'âge. Ils ne grandissent pas vite et, à l'âge adulte, ils sont plus petits que la moyenne.

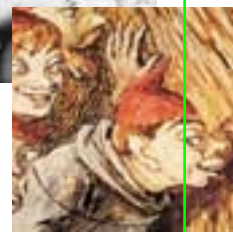


CES ENFANTS SE RESSEMBLENT, mais n'ont aucun lien de parenté. Ils ont tous les traits que les médecins associent au syndrome de Williams. Ce sont aussi les traits que l'on prête aux elfes ; celui qui est représenté à droite est l'œuvre de Richard Doyle (XIX^e siècle), un oncle d'Arthur Conan Doyle, le « père » de Sherlock Holmes.

un syndrome de Williams, qui, en dépit d'un QI inférieur à la moyenne, ont des capacités narratives et musicales inhabituelles. Les fées ont souvent de grandes oreilles pointues, ce qui symboliserait leur sensibilité et celle des personnes ayant un syndrome de Williams à la musique et aux sons.

Les personnes ayant un syndrome de Williams sont affectueuses, confiantes, charitables et très sensibles aux sentiments des autres. De même, les fées sont généralement bienveillantes et généreuses. Enfin, comme les fées, les personnes ayant un syndrome de Williams ont besoin d'ordre, d'un rythme de vie régulier, de connaître à l'avance les projets.

Par le passé, les conteurs ont inventé des légendes avec des êtres imaginaires pour tenter d'expliquer des phénomènes qu'ils ne comprenaient pas, par exemple les caractéristiques physiques et comportementales des personnes ayant un syndrome de Williams. Aujourd'hui, les biologistes s'intéressent au syndrome de Williams pour comprendre l'inconnu, pour découvrir quelques-uns des secrets du cerveau et de son fonctionnement.



La «fée» de Williams, d'Arthur Conan Doyle

drome de Williams, il est anormalement grand dans l'hémisphère gauche, comme chez les musiciens professionnels. Une perception auditive intacte expliquerait le talent musical et la faculté d'élocution associés au syndrome de Williams.

Des enregistrements de l'activité électrique cérébrale de personnes ayant un syndrome de Williams et d'autres personnes pendant diverses tâches renseignent aussi sur le développement du cerveau. Ainsi, en présence de stimuli grammaticaux, les sujets normaux ont une activation de l'hémisphère gauche supérieure à celle de l'hémisphère droit. En revanche, chez les personnes ayant un syndrome de Williams, les réactions des deux hémisphères sont symétriques, ce qui indique que l'hémisphère gauche n'a pas acquis sa spécialisation dans le traitement du langage. De plus, tandis que l'activité cérébrale est supérieure dans l'hémisphère droit des adultes normaux, lors du traitement d'images de visages, c'est le contraire chez les per-

sonnes ayant un syndrome de Williams. On suppose que, si le développement du cerveau est anormal, les rôles sont redistribués pour que de nouveaux circuits compensent les circuits déficients.

Les premières recherches sur le syndrome de Williams ont déjà apporté des informations sur l'organisation du cerveau. Elles permettent

notamment aux neurobiologistes de voir d'un regard nouveau les «handicapés mentaux» et ont révélé que des personnes ayant des QI faibles ont parfois des capacités surprenantes. Ne peut-on supposer que d'autres handicaps mentaux sont associés à des potentiels insoupçonnés qui ne demandent qu'à être découverts ?

Howard LENHOFF est professeur émérite de biologie à l'Université d'Irvine. Paul WANG est professeur de pédiatrie à la Faculté de médecine de Pennsylvanie. Franck GREENBERG travaille au Centre de recherche sur le génome humain, à l'Institut américain de la santé. Ursula BELLUGI dirige le laboratoire des neurosciences cognitives à l'Institut Salk de biologie.

A.K. EWART et al., *Hemizygosité at the Elastin Locus in a Developmental Disorder : Williams Syndrome*, in *Nature Genetics*, vol. 5, n° 1, pp. 11-16, septembre 1993.

U. BELLUGI, E.S. KLIMA et P.P. WANG,

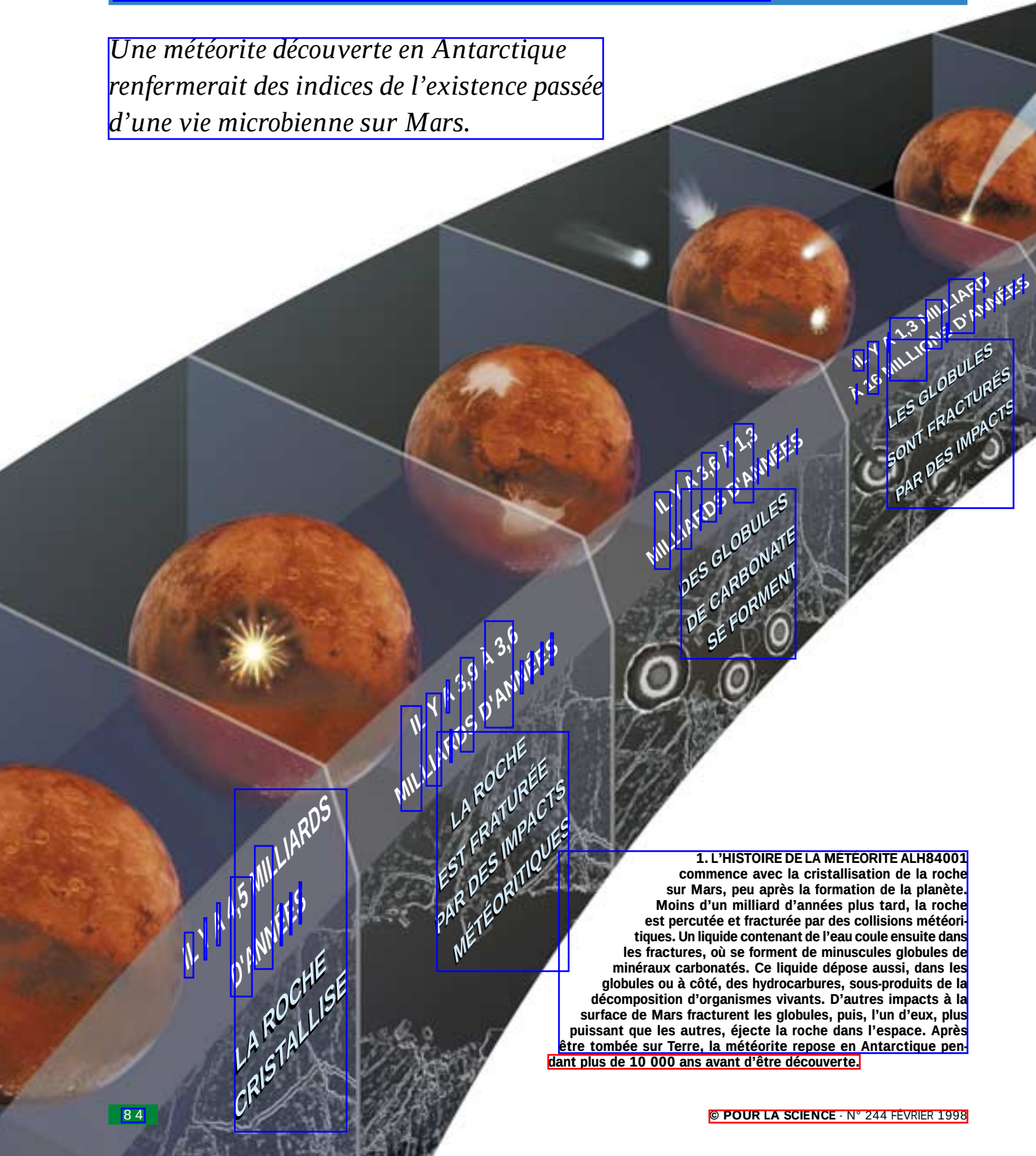
Cognitive and Neural Development : Clues from Genetically Based Syndromes, in *The Lifespan Development of Individuals : Behavioral, Neurobiological and Psychosocial Perspectives : A Synthesis*, Nobel symposium, sous la direction de D. Magnusson, Cambridge University Press, 1996.

Howard M. LENHOFF, *Real-World Source for the «Little People» : The Relationship of Fairies to Individuals with Williams Syndrome*, in *Nursery Realms : Children in the Worlds of Science Fiction, Fantasy and Horror*, sous la direction de Gary Westfahl et George Slusser, University of Georgia (à paraître).

Des fossiles venus de Mars?

E. GIBSON • D. MCKAY • K. THOMAS-KEPRTA • C. ROMANEK

Une météorite découverte en Antarctique renfermerait des indices de l'existence passée d'une vie microbienne sur Mars.





UN IMPACT MÉTÉORITIQUE
ÉJECTE LA ROCHE

LA MÉTÉORITE EST EXPOSÉE
AUX RAYONS COSMIQUES

IL Y A 15 MILLIONS D'ANNÉES
LA MÉTÉORITE TOMBE
EN ANTARCTIQUE

Sommes-nous seuls dans l'Univers? La vie est-elle apparue sur d'autres planètes? Ces questions sont anciennes, les spéculations ont abondé, et l'on a souvent supposé que la planète Mars avait été un havre de vie extraterrestre.

Tous les 15 ans, Mars s'approche à 56 millions de kilomètres de la Terre, et les astronomes observent alors sa surface avec une meilleure précision que d'habitude. Après l'un de ces rapprochements, à la fin du XIX^e siècle, l'astronome italien Giovanni Schiaparelli décrit de grandes lignes qui zèbrent la surface de la planète et qu'il nomme *canali*. Quelques années plus tard, l'astronome américain Percival Lowell traduit le mot italien *canali* par «canaux artificiels» et prétend qu'ils ont été creusés par une civilisation avancée. En fait, *canali* signifie tout autant «chenaux naturels». Cette conjecture est définitivement infirmée à la fin des années 1960 par les observations des premières sondes américaines et soviétiques envoyées vers la planète : les *canali* sont en réalité des dépôts sombres et clairs apportés par le vent. Les canyons naturels qui sillonnent la surface de Mars sont trop étroits pour que leur observation soit possible de la Terre. En 1976, les sondes *Viking* qui se posent sur Mars n'y trouvent aucune trace de vie.

Il n'y a pas de vie intelligente sur Mars, pas de «petits hommes verts». Des formes de vie très primitives sont-elles néanmoins apparues quand cette planète était plus chaude et plus humide qu'aujourd'hui? Des micro-organismes ont-ils occupé Mars, il y a quelques

milliards d'années? La découverte de tels organismes serait importante, car leur étude nous apprendrait beaucoup sur les conditions nécessaires à la vie et sur les mécanismes d'apparition de la vie sur Terre. De surcroît, nous pourrions alors envisager plus sérieusement la présence de vie ailleurs dans l'Univers.

En août 1996, avec des collègues de la NASA et de l'Université Stanford, nous avons publié, dans l'hebdomadaire *Science*, un article qui annonçait qu'une météorite originaire de Mars contenait des vestiges d'activité bactérienne. Cette interprétation est contestée : d'autres équipes expliquent les caractéristiques de la météorite par des réactions de chimie minérale pure, où la vie n'intervient pas. Néanmoins, nous sommes aujourd'hui plus convaincus que jamais de la justesse de notre théorie.

Un milieu hostile

Aujourd'hui, Mars n'est pas une planète accueillante pour la vie telle que nous la connaissons. Son atmosphère est composée de 95 pour cent de dioxyde de carbone, de 2,7 pour cent d'azote, de 1,6 pour cent d'argon et de petites quantités d'oxygène et de vapeur d'eau. La pression atmosphérique au sol est 100 fois inférieure à celle qui s'exerce sur la Terre, la température diurne est de -50 °C en moyenne : elle n'approche qu'exceptionnellement 0 °C, en été et sur les versants Sud. Enfin, l'eau liquide, l'un des ingrédients les plus fondamentaux pour la vie, ne semble pas exister à la surface de Mars. Il n'est donc pas surprenant que les deux sondes *Viking*, qui s'y posèrent en juillet et en septembre 1976, ne découvrirent ni micro-organismes ni molécules organiques (les détecteurs avaient pourtant une sensibilité d'une partie par milliard) dans la couche du sol qu'elles analysèrent, sur quelques centimètres de profondeur.

Ces observations n'excluent toutefois pas l'hypothèse d'une vie ancienne sur Mars : le climat martien était jadis plus hospitalier. Il y a

1984



RAMASSAGE
DE LA MÉTÉORITE
EN ANTARCTIQUE

1993



RECONNAISSANCE
DE L'ORIGINE MARTIENNE
DE LA MÉTÉORITE

1996



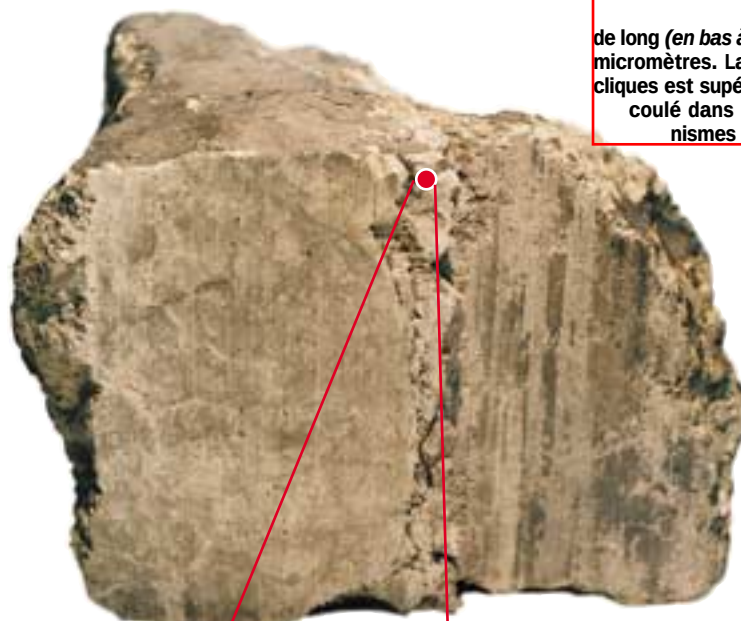
DE LA VIE SUR MARS?

NASA, JPL, SPACE CENTER, 1. PREMIER C. L'UNIVERS



2. LA MÉTÉORITE MARTIENNE ALH84001

est représentée ici grande nature (en haut à gauche). Elle est principalement composée d'un oxyde de silicium nommé orthopyroxène. La fissure verticale légèrement à droite du centre de la coupe (au centre) est une fracture à travers laquelle un liquide a coulé et a déposé des globules de carbonate. Un morceau de la météorite de deux millimètres de long (en bas à gauche) contient plusieurs globules, d'une dimension d'environ 200 micromètres. La concentration en molécules d'hydrocarbures aromatiques polycycliques est supérieure dans les globules carbonatés et autour d'eux : le liquide qui a coulé dans la fracture aurait contenu des produits de décomposition d'organismes vivants, qui se seraient déposés dans les globules en formation.



eu de l'eau liquide à la surface de Mars : les photographies de la planète prises par la sonde *Viking* et les observations de la mission *Mars Pathfinder*, en 1997, indiquent que de grands volumes d'eau ont sculpté cette surface il y a quelques milliards d'années, voire seulement quelques centaines de millions d'années. En outre, plusieurs météorites trouvées sur Terre et dont l'origine est fort probablement martienne, présentent des signes d'altération par l'eau : elles contiennent des carbonates, des sulfates, des hydrates et des argiles, qui ne se forment qu'en présence d'eau.

La météorite que nous avons étudiée, nommée ALH84001, a une forme de pomme de terre et elle pèse 1,9 kilogramme. C'est l'une des quelques météorites martiennes découvertes depuis le milieu des années 1970 dans l'Antarctique (voir l'encadré page 88) et dont l'origine a été établie par l'analyse isotopique des éléments chimiques constitutifs (les isotopes d'un élément chimique sont ses différentes formes, dont les noyaux atomiques contiennent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons). Elle aurait été arrachée de la surface de Mars par un impact violent d'astéroïde, puis captée par l'attraction terrestre.

Au début des années 1980, Donald Bogard et Pratt Johnson, de la NASA, ont analysé les minuscules bulles de gaz emprisonnées dans les minéraux vitrifiés de plusieurs de ces météorites (cette vitrification aurait eu lieu lors de



collisions de comètes et d'astéroïdes avec les roches de la surface de Mars). Les bulles de gaz contenues dans cinq météorites ont la même composition chimique et isotopique, à un milliardième près, que l'atmosphère martienne analysée par les sondes *Viking*. Comment ne pas admettre que ces météorites proviennent de Mars?

L'hypothèse est corroborée par l'analyse chimique des minéraux et, notamment, par l'analyse isotopique de l'oxygène des silicates, oxydes de silicium qui sont le principal constituant des météorites. Au début des années 1970, Robert Clayton, et ses collaborateurs de l'Université de Chicago, ont montré que les abondances relatives d'oxygène 16, d'oxygène 17 et d'oxygène 18 dans les silicates sont caractéristiques de l'origine des météorites : les corps du Système solaire, formés dans des régions différentes du disque protoplanétaire qui entourait le Soleil au début de sa vie, ont des compositions isotopiques différentes en oxygène. Selon ce critère, on retrouve dans le même groupe ALH84001, les cinq météorites dont les bulles de gaz ont la même composition que l'atmosphère martienne et cinq autres météorites également trouvées dans l'Antarctique : toutes ces météorites seraient donc d'origine martienne.

Un long parcours

L'analyse isotopique permet aussi de reconstituer l'histoire d'ALH84001, avec la formation de la roche sur Mars, son voyage interplanétaire et son séjour sur Terre. Le dosage de trois groupes d'éléments radioactifs (les isotopes du rubidium et du strontium, ceux du néodyme et du samarium, et ceux de l'argon) a montré que 4,5 milliards d'années se sont écoulés depuis que la roche s'est solidifiée, à partir de matériaux en fusion. C'est beaucoup, même à l'échelle géologique : la cristallisation s'est produite peu après la formation de Mars il y a 4,55 milliards d'années. Par comparaison, les 11 autres météorites martiennes du groupe ont entre 1,3 milliard et 165 millions d'années.

La durée du voyage interplanétaire de la météorite est connue grâce à d'autres isotopes : l'hélium 3, le néon 21 et l'argon 38. Dans l'espace, les météorites sont bombardées par les rayons cosmiques, particules de grande énergie, qui produisent ces trois isotopes en interagissant avec les noyaux des atomes. Le calcul des vitesses de production et la mesure des abondances de ces isotopes indiquent la durée d'exposition de la météorite aux rayons cosmiques, donc son temps de transit entre Mars et la Terre : 16 millions d'années.

Enfin Timothy Jull, de l'Université d'Arizona, a estimé la durée de résidence de la météorite dans les glaces de l'Antarctique, à partir de l'abondance du carbone 14. Quand les silicates sont exposés aux rayons cosmiques dans l'espace, du carbone 14 est produit à partir d'azote 14. Puis un équilibre s'établit : cette production est compensée par la désintégration radioactive du carbone 14. Lorsque la météorite tombe sur Terre, la production de carbone 14 cesse, et l'équilibre est rompu : la désintégration dans la roche se poursuit, réduisant de moitié la quantité de carbone 14 tous les 5 700 ans. La différence entre l'abondance du carbone 14 à l'équilibre et celle qui est mesurée aujourd'hui dans les silicates de la météorite indique que cette dernière est sur Terre depuis 13 000 ans.

Dès sa découverte, en 1984, par la géologue américaine Roberta Score, la météorite ALH84001 a passionné les planétologues. De couleur gris verdâtre pâle, elle reposait dans le champ de glace qui se trouve à l'Ouest des monts Allan, en Antarctique. La composition de la roche indique qu'elle s'est formée lentement en profondeur ou dans la croûte primitive de Mars : constituée à 98 pour cent de gros grains d'orthopyroxène, un silicate de magnésium et de fer, elle contient aussi d'autres silicates, des aluminosilicates, des oxydes et des sulfures métalliques, ainsi que des carbonates et des silicates hydratés.

Nous étions surtout étonnés par la présence de globules de carbonate, de 20 à 250 micromètres de diamètre, qui tapissent les parois internes des fissures

de la météorite (voir la figure 2). Aucune des 11 autres météorites martiennes ne possède de tels globules, vraisemblablement déposés à partir d'un liquide saturé en dioxyde de carbone, qui a coulé dans les fissures après la formation des silicates. Ces globules carbonatés rassemblent plusieurs caractéristiques qui, isolément, ne prouvent pas l'existence de vie sur Mars mais qui, toutes ensemble, forment un faisceau d'indices très favorables : une vie microbienne a très certainement été en contact avec la roche, à une époque où le climat sur Mars était plus proche qu'aujourd'hui du climat terrestre.

Des informations précieuses proviennent tout d'abord d'analyses isotopiques, réalisées par Monica Grady, du Muséum britannique d'histoire naturelle, et d'équipes de la NASA et de l'Open University, en Grande-Bretagne. Dans les globules, le carbone 13 est plus abondant que dans n'importe quel carbonate terrestre naturel : ce carbonate ne s'est donc pas formé sur Terre, ni sur Mars. En outre, le carbone 13 est aussi plus abondant dans les globules de carbonate que dans les 11 autres météorites martiennes : cet enrichissement confirme la précipitation du carbonate à partir d'un liquide et non directement à partir de l'atmosphère martienne.

D'autre part, les abondances relatives des isotopes de l'oxygène indiquent que les globules se sont formés à des températures inférieures à 100 °C, compatible avec la vie microbienne telle que nous la connaissons sur Terre (des organismes survivent jusqu'à 115 °C environ). Ce résultat a été confirmé au début de 1997 par John Valley, de l'Université de Madison, mais il a été ensuite contesté par Ralph Harvey et ses collègues de l'Université Case Western Reserve, qui ont analysé la composition chimique des minéraux dans les carbonates et ont conclu que les carbonates se sont formés à 700 °C. Ce résultat contradictoire reste toutefois isolé, et il n'est pas certain que les carbonates analysés par cette équipe proviennent des globules.

Un autre indice de vie martienne est la présence, dans les globules carbonatés, de minéraux dont la nature et



3. UNE GOUTTELETTE D'EAU MARTIENNE a été extraite en 1991 par chauffage d'un morceau d'une météorite martienne. L'eau, qui

coulait jadis à la surface de Mars et n'y est plus présente que sous forme de glace, est indispensable à la vie.

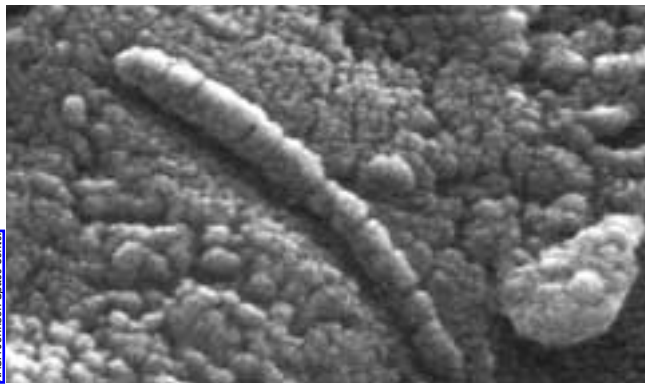
L'aspect sont très proches de minéraux terrestres déposés par des bactéries. L'intérieur des globules est riche en carbonate de magnésium et en carbonate de fer, et contient de petites quantités de carbonate de calcium et de carbonate de manganèse. Ces globules ne sont donc pas du simple calcaire, et leur composition est inhabituelle sur Terre : ils se sont probablement formés ailleurs. De fines particules de magnétite (un oxyde de fer) et de sulfures, de 10 à 100 nanomètres de côté, sont aussi présentes.

On trouve, sur Terre, des particules de magnétite associées à des bactéries fossilisées dans divers sédiments et

divers sols. Notamment, des particules de 20 à 100 nanomètres de côté sont présentes dans des calcaires terrestres anciens. Les cristaux de magnétites découverts dans ALH84001, de 40 à 60 nanomètres de côté en moyenne, leur ressemblent. Ils sont cubiques, en forme de larme ou irréguliers, et contiennent peu de défauts ou d'impuretés. Leur analyse, par microscopie électronique à transmission de haute résolution couplée avec une méthode d'analyse chimique locale, indique que leur taille, leur pureté, leur morphologie et leur structure cristalline sont proches de celles des magnétites produites par des bactéries terrestres. En outre, certains

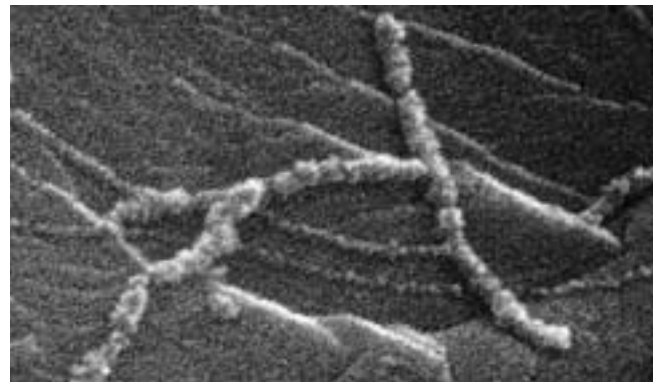
cristaux de magnétite d'ALH84001 sont disposés en ligne, telles les perles d'un collier. Les bactéries terrestres déposent souvent de la magnétite dans cette configuration, parce que les cristaux issus du métabolisme du fer et de l'oxygène de l'eau s'alignent naturellement dans le champ magnétique terrestre.

Dans ALH84001, les globules de carbonate contiennent aussi des molécules organiques, dont nous attribuons l'origine à une activité microbienne. Sur Terre, les organismes vivants qui meurent se décomposent et libèrent des hydrocarbures, que l'on retrouve dans le charbon, la tourbe et le pétrole ; parmi ces molécules figurent des hydrocar-



VASA-Johnson Space Center

4. UNE STRUCTURE SEGMENTÉE (à gauche) de 380 nanomètres de longueur a été découverte dans un globule carbonaté de la météorite ALH84001. Elle ressemble à une bactérie terrestre fossilisée (à



droite), découverte à 400 mètres de profondeur dans un type de formation géologique appelée basalte de la rivière Columbia (dans l'État de Washington).

La sonde spatiale du pauvre

En 1969, une équipe japonaise travaillant près des monts Yamato, dans l'Antarctique, a découvert huit météorites dans un champ de glace âgé de plus de 10 000 ans. Ces météorites, de quatre types différents, n'étaient pas toutes tombées en même temps, mais elles avaient été rassemblées par l'écoulement de la glace.

Les météorites qui tombent sur l'Antarctique s'enfoncent dans la neige comprimée qui se transforme en glace, puis en « vieille » glace, de couleur bleuâtre. Sous l'action de la gravité, les masses de glace se déplacent de deux à trois mètres par an, de l'intérieur relativement élevé du continent antarctique vers la périphérie. Quand un obstacle, telle une chaîne de montagnes, bloque l'écoulement horizontal de la glace, celle-ci remonte. Simultanément, la surface de la glace est érodée par le vent

(la glace est directement transformée en vapeur d'eau), à la vitesse de deux à trois centimètres par an. Les météorites parviennent donc à la surface du champ de glace au pied des montagnes antarctiques, où elles s'accumulent. Sur la Terre, seul l'Antarctique présente cette association de glaciers en mouvement et de barrières montagneuses.

Depuis 29 ans, plus de 17 000 météorites ont ainsi été découvertes. La plupart proviennent de la ceinture d'astéroïdes, située entre Mars et Jupiter, mais 14 sont d'origine lunaire et six d'origine martienne. Récupérées à peu de frais, ces météorites sont des sondes spatiales peu onéreuses. Avant la découverte du gisement antarctique de météorites, les collections mondiales n'en contenaient que 2 000 à 2 500 spécimens différents.



bures aromatiques polycycliques. Nous pensons que les hydrocarbures aromatiques polycycliques assez simples présents dans ALH84001 sont aussi les produits de décomposition d'organismes vivants, transportés par un

liquide et piégés lors de la formation des globules.

La présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans un échantillon ne prouve pas que des processus biologiques s'y sont produits : des

météorites provenant de la ceinture des astéroïdes, entre Mars et Jupiter, où la vie n'est certainement pas présente, contiennent aussi de telles molécules organiques, tout comme des poussières planétaires ou interstellaires. On trouve

Y a-t-il vraiment des fossiles de bactéries dans ALH84001?

En août 1996, David McKay et ses collègues ont annoncé la découverte de fossiles de bactéries martiennes dans une météorite nommée ALH84001. Cette annonce est-elle un coup médiatique, destiné à obtenir des crédits pour les programmes d'exploration planétaires de la NASA? Cet argument, qui écarte les faits sans les examiner scientifiquement, n'est pas satisfaisant : l'affaire est sérieuse. Rien n'est définitivement résolu.

Les collections de météorites contiennent 14 éléments atypiques, des roches de type «lave», qui se sont formées il y a environ un milliard d'années (sauf ALH84001, dont la formation, au sein de la croûte de Mars, remonte à 4,5 milliards d'années environ). Elles viennent donc d'un corps où le volcanisme était encore actif, ce qui semble exclure que leur origine soit la ceinture des astéroïdes, située entre Mars et Jupiter. On écarte aussi Vénus, car l'énergie à fournir à une roche pour qu'elle quitte Vénus, puis l'orbite de cette planète et arrive sur Terre est très grande. Par défaut, la seule origine possible de ces roches est donc Mars. Comme cinq d'entre elles présentent une «signature atmosphérique» martienne, la majorité des planétologues acceptent cette origine martienne.

Ils n'oublient toutefois pas les problèmes que cela pose. Citons-en deux. D'abord, selon le comptage des cratères de météorites sur Mars, le volcanisme s'est éteint sur cette planète il y a un milliard d'années : les volcans de cet âge ne couvrent que quelques pour cent de la surface. Comme toutes les météorites «martiennes», sauf ALH84001, ont au plus un milliard d'années, on doit admettre que les astéroïdes qui ont percuté Mars et en ont éjecté des débris sont tombés préférentiellement sur les volcans les plus jeunes. Par ailleurs, pourquoi ces météorites martiennes sont-elles aussi nombreuses que les météorites lunaires, alors que Mars est beaucoup plus

éloignée de la Terre? D. McKay et ses collègues présentent bien les caractéristiques de la météorite ALH84001 : elle est fracturée, et ces fractures contiennent des concrétions carbonatées (les globules), avec de la magnétite, des composés organiques, une certaine composition isotopique et des structures «en forme de bactéries». Quels phénomènes sont-ils à l'origine de ces caractéristiques? L'équipe de la NASA conclut, un peu vite, qu'«une vie microbienne a certainement été en contact avec la roche». Cette interprétation mérite plusieurs critiques.

La première concerne la nature de la météorite : la roche est une pyroxénite, formée entre 5 et 100 kilomètres de profondeur environ. Elle est peu altérée par l'eau, et elle n'a donc pas résidé longtemps en surface. La vie qui s'y serait développée serait donc plus proche des bactéries terrestres découvertes récemment à grande profondeur dans la croûte terrestre que des bactéries usuelles vivant à la surface de la Terre. L'interprétation des résidus en est compliquée. De surcroît, les restes retrouvés seraient ceux d'organismes très petits : les biologistes doutent que toutes les activités métaboliques se déroulent dans un si petit volume, et l'existence sur Terre des nanobactéries évoquées n'est pas encore admise par tous. Alors sur Mars...

En outre, si l'on récolte au hasard une roche équivalente à ALH84001 sur Terre (aussi ancienne, et formée aussi profondément), on n'a quasiment aucune chance d'y trouver des fossiles. La vie a-t-elle été très abondante dans Mars, ou l'astéroïde percuteur a-t-il bien visé, nous donnant la chance extraordinaire de recevoir un échantillon exceptionnel?

D'ailleurs, ces formes fossiles sont-elles vraiment des formes biologiques, non minérales? A-t-on regardé avec autant de précision les structures

qui se forment par des réactions de chimie minérale dans les fissures de roches terrestres parcourues par l'eau? Certains chercheurs ont même prétendu que ces «vermisseaux» sont des artefacts dus aux procédés de métallisation préalables à l'observation au microscope électronique.

L'origine martienne des molécules organiques présentes dans ALH84001 est aussi contestée. Leur teneur en carbone 13 et en carbone 14 indiquerait une contamination pendant le séjour de la météorite en Antarctique.

Enfin, l'un des points les plus controversés est la température de formation des carbonates. D. McKay et ses collègues proposent qu'ils soient apparus à moins de 100 °C, et ils réfutent rapidement les 700 °C avancés par une autre équipe. La liste des températures, obtenues par différentes méthodes, proposées dans les publications spécialisées, est toutefoix impressionnante : de 20 à 80 °C par géochimie classique, plus de 650 °C par l'étude des équilibres minéraux, moins de 300 °C par géochimie isotopique, plus de 550 °C par la morphologie des magnétites, moins de 325 °C par des arguments paléomagnétiques. Les températures mesurées par toutes ces équipes correspondent toutefois à des phénomènes différents, qui ont pu se produire à plusieurs étapes de l'histoire de la météorite et il n'est pas certain que ces possibles bactéries étaient contemporaines des globules ni de la magnétite...

La NASA a un projet de mission spatiale qui rapporterait des échantillons de roche martienne vers 2010. En attendant, bien que les données présentées par D. McKay et ses collaborateurs soient fiables, ils en oublient d'autres. Leur plaidoirie en faveur de la présence de fossiles martiens est intéressante, mais l'indicatif devrait souvent être remplacé par le conditionnel.

Pierre THOMAS,
École normale supérieure de Lyon

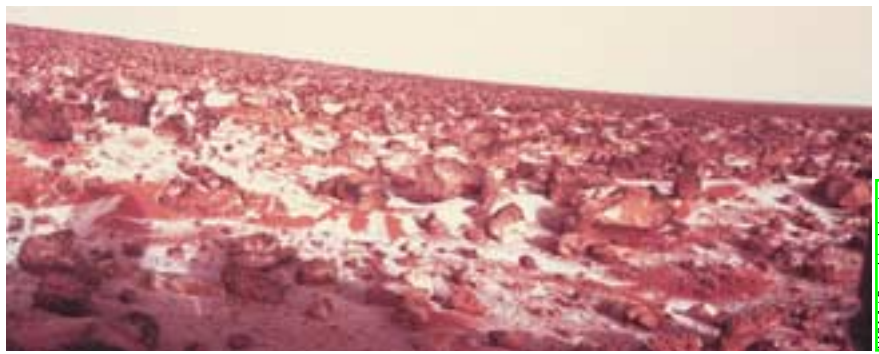
aussi des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les gaz d'échappement des automobiles, qui contaminent l'atmosphère terrestre. Toutefois, la localisation et l'association de ces hydrocarbures dans les globules carbonatés rend leur découverte intéressante : dans ALH84001, ils sont toujours dans des régions riches en carbonates, y compris dans les globules. Leur dépôt est donc associé à la circulation du liquide à l'origine des globules. En outre, Richard Zare et Simon Clemett, de l'Université de Stanford, ont montré, grâce à une technique analytique sensible, qu'ALH84001 contient peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques différents et que tous ont été retrouvés parmi les produits de décomposition de micro-organismes terrestres. Ces hydrocarbures étaient à l'intérieur de la météorite, où la contamination est très improbable : les carbonates sont bien martiens et contiennent les vestiges d'anciens organismes vivants.

Enfin, en 1996, une équipe de l'Open University a montré que le carbone de ces molécules organiques a une composition isotopique proche de celle de micro-organismes qui utiliseraient le méthane comme source nutritive. Si cette découverte est confirmée, elle sera l'une des indications les plus solides en faveur d'une activité biologique dans la météorite martienne.

Des fossiles de microbes ?

D'autres particularités de la roche indiquent qu'au moins des vestiges de microbes sont entrés en contact avec la roche : dans les globules de carbonate, on a trouvé des corps ovoïdes et tubulaires d'environ 380 nanomètres de long (voir la figure 4) qui seraient les restes fossilisés de microbes eux-mêmes. Une bactérie terrestre de cette taille pourrait sans difficulté contenir l'ensemble des organites nécessaires à son fonctionnement (la taille minimale est d'environ 250 nanomètres). D'autres structures tubulaires incurvées découvertes dans les globules ont des longueurs de 500 à 700 nanomètres.

D'autres structures, dix fois plus petites que les bactéries terrestres, sont présentes dans ALH84001 : ovoïdes de 40 à 80 nanomètres de long, corps tubulaires de 30 à 170 nanomètres de long et de 20 à 40 nanomètres de diamètre environ. Ce sont peut-être les fossiles de petits appendices de bactéries, analogues à ceux que possèdent certaines bactéries



NASA Jet Propulsion Laboratory

5. DE LA GLACE couvre parfois une partie du sol martien rocheux, rouge, sur à peine quelques micromètres d'épaisseur. La vie qui aurait laissé des traces sur la météorite ALH84001 se serait toutefois développée en profondeur, à plusieurs kilomètres de cette surface.

terrestres. Surtout, ces structures ovoïdes et allongées ressemblent, par leur taille et leurs formes, aux nanobactéries terrestres, de 20 à 400 nanomètres de long, dont des fossiles ont été découverts dans des basaltes du bassin de la rivière Columbia, dans l'État de Washington.

Si ALH84001 se trouvait sur Mars il y a 4,5 milliards d'années, lorsque la planète était plus humide, plus chaude et possédait une atmosphère plus dense, nous devrions trouver des indices que la roche a été en contact avec l'eau. Pourtant la météorite ne contient que de très petites quantités de minéraux argileux hydratés : elle n'a séjourné que peu de temps, voire pas du tout, à la surface de Mars, riche en eau. En outre, ces minéraux ont pu aussi bien se former pendant le séjour de la météorite en Antarctique.

Quand les traces de vie que nous observons dans ALH84001 sont-elles apparues ? Nous pourrions examiner cette question si nous connaissions l'âge des carbonates, mais nous n'avons qu'une certitude : les carbonates ont cristallisé dans les fissures de la météorite après la cristallisation de la roche elle-même. Des âges de 1,3 à 3,6 milliards d'années ont été avancés. Si les carbonates dans ALH84001 s'étaient formés voici 3,6 milliards d'années, ils seraient les vestiges de la toute première vie martienne.

Si des organismes vivants ont existé sur Mars, ils ont peut-être des descendants aujourd'hui, dans des nappes d'eau souterraines par exemple. Mars est abondamment couverte de basaltes, fracturés par un bombardement d'astéroïdes dans ses premiers 600 millions d'années. Ces fractures constituaient des voies d'infiltration pour l'eau et des abris pour la vie lorsque la planète s'est refroidie. Une situation analogue existe sur Terre : des espaces entre

des coulées de lave successives permettent la circulation et la retenue d'eau souterraine qui contient des bactéries vivantes. Des organismes pourraient aussi subsister ou se développer sur Mars autour de sources chaudes ou de systèmes hydrothermaux souterrains, où des déséquilibres chimiques seraient maintenus, comme sur les «cheminées chaudes» riches en minéraux des fonds océaniques terrestres.

Nous espérons maintenant une mission vers Mars qui rapporterait de nouveaux échantillons, afin de résoudre le problème de la vie sur cette planète. Les indications actuelles doivent devenir des certitudes.

Everett GIBSON, David MCKAY et Kathie THOMAS-KEPRTA travaillent au Centre spatial Johnson de la NASA à Houston. Christopher ROMANEK travaille à l'Université de Georgie.

Mars, sous la direction de Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder et Mildred S. Matthews, University of Arizona Press, 1992.

Harry Y. MCSWEEN, *What We Have Learned about Mars from SNC Meteorites*, in *Meteoritics*, vol. 29, n° 6, pp. 757-779, novembre 1994.

David S. MCKAY et al., *Search for Past Life on Mars : Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001*, in *Science*, vol. 273, pp. 924-930, 16 août 1996.

James FREDRICKSON et Tullis ONSTOTT, *Les micro-organismes de l'intérieur du Globe*, in *Pour la Science*, décembre 1996.

Michael H. CARR, *Water on Mars*, Oxford University Press, 1996.

Jay BARBREE, Martin CAIDIN et Susan WRIGHT, *Destination Mars : In Art, Myth and Science*, Penguin Studio, 1997.

Jeffrey KARGEL et Robert STROM, *Les changements climatiques sur Mars*, in *Pour la Science*, janvier 1997.

Agrégats métalliques et nombres magiques

MATTHIAS BRACK

L'observation de minuscules agrégats métalliques révèle pourquoi les solides réagissent différemment des atomes qui les composent.

Quand on chauffe un morceau de métal jusqu'à l'évaporation et que l'on injecte la vapeur dans une chambre à vide, le jet se condense en minuscules agrégats composés de quelques atomes à quelques milliers d'atomes. Ces agrégats métalliques, de taille bien inférieure à celle des grains de sable, constituent un arrangement de la matière aux propriétés étonnantes.

Bien que la plupart des expériences sur les agrégats mettent en jeu de minuscules solides, les agrégats métalliques

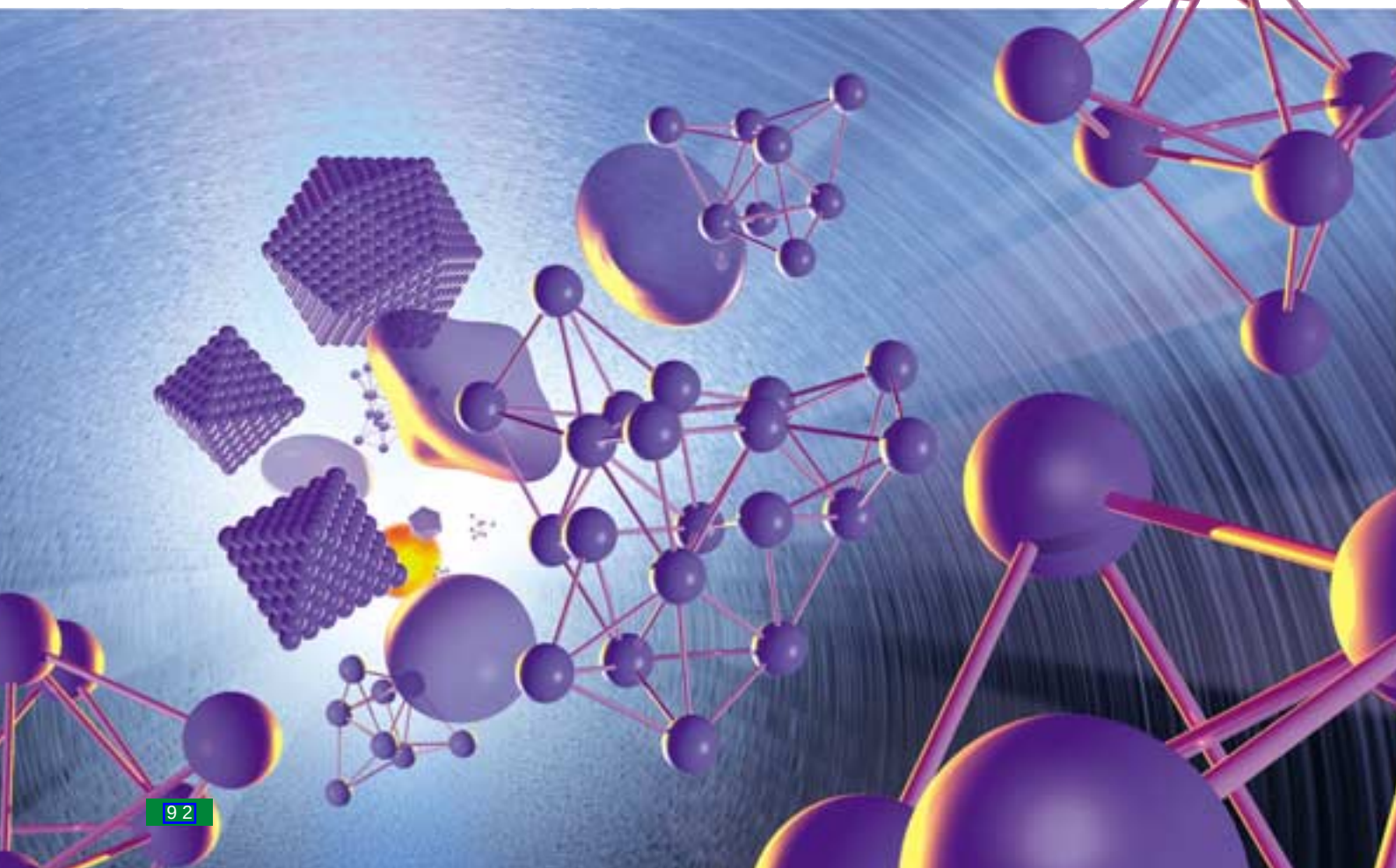
peuvent, en principe, être arbitrairement grands. Ce sont des systèmes intermédiaires entre les atomes, ou les molécules isolées, et les solides, ou les liquides macroscopiques. En ce sens, ils relient le microcosme au macrocosme.

Les physiciens s'étonnent de leurs propriétés. Pourquoi certains d'entre eux sont-ils plus stables que d'autres? À partir de combien d'atomes les propriétés d'un agrégat ressemblent-elles à celles de la matière organisée? Comment la structure d'un agrégat change-t-elle lorsqu'on lui ajoute des atomes?

Les chimistes, également, s'intéressent beaucoup aux agrégats, car ils savent que certains agrégats métalliques sont de remarquables catalyseurs de réactions chimiques. Ils aimeraient une meilleure compréhension de leurs propriétés, car ils en auraient ainsi une meilleure maîtrise. Après dix années de recherche, cette compréhension est proche.

Examinons d'abord

pourquoi, lorsque l'on forme des agrégats métalliques,



certaines tailles se forment plus fréquemment que d'autres. L'exploration des éléments chimiques, au siècle dernier, a fait apparaître un phénomène analogue : les éléments les plus stables possèdent 2, 10, 18, 36 ou 54 électrons. Ce sont les «gaz rares», qui sont chimiquement inertes. Puis, au cours du XX^e siècle, les physiciens ont découvert que les noyaux atomiques contenant 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 protons ou neutrons sont également exceptionnellement stables. Pour cette raison, ces noyaux sont dits «magiques». Le noyau du plomb, qui contient 82 protons, est «magiquement stable», et la forme de cet élément contenant 126 neutrons est «doublement magique».

Stabilité magique

Les agrégats métalliques peuvent être également magiques. En 1984, des physiciens de l'Université de Berkeley ont étudié des agrégats formés à partir de sodium métallique chauffé. Ils ont observé que les agrégats à 8, 20, 40 ou 58 atomes sont beaucoup plus nombreux que les autres. Cette abondance est due à leur exceptionnelle stabilité.

Aujourd'hui les physiciens savent que, quand on chauffe des agrégats instables à une température suffisante, ils perdent des atomes et se transforment en agrégats plus petits et plus stables. Pour les agrégats stables de sodium chaud, la séquence des nombres magiques continue avec 92, 138, 198, 344, 442, 554... Les agrégats de sodium (et de plusieurs autres métaux) contenant ce nombre d'atomes demeurent stables même lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à devenir des gouttelettes liquides.

Pourquoi ces nombres ? Parce que les électrons de liaison ne peuvent avoir que certaines énergies.

Dans les atomes isolés, les électrons surnuméraires par rapport au nombre d'électrons des gaz rares sont faiblement liés et

s'éloignent facilement de l'atome. Ces électrons «de valence» sont responsables des différentes propriétés chimiques des éléments.

Dans un agrégat métallique (ou dans un morceau de métal plus gros) les électrons de valence ne restent pas attachés à leur atome d'origine, mais se déplacent librement entre les atomes : ils sont délocalisés. Néanmoins, ils demeurent à l'intérieur ou à proximité de l'agrégat, parce qu'ils sont attirés par les charges devenues positives des atomes qu'ils quittent (sans les électrons de valence, les charges positives du noyau ne sont plus équilibrées par un nombre égal de charges négatives, et l'atome, précédemment neutre, devient un ion positif).

Pour comprendre pourquoi un agrégat particulier est stable, les physiciens devraient calculer la configuration détaillée de tous les ions internes et de tous les électrons de valence. Le calcul de cette configuration est difficile, mais on obtient de bons résultats en modélisant un agrégat métallique par une «gelée» homogène, chargée positivement et capable d'attirer les électrons de valence.

Les énergies des électrons de valence sont quantifiées, c'est-à-dire que leurs énergies ont des valeurs déterminées, jamais des valeurs intermédiaires. En outre, dans un agrégat métallique tout comme dans un atome, les énergies accessibles ne sont pas espacées régulièrement, mais groupées en paquets de niveaux proches, séparés par de grands espaces. Pour des raisons historiques, ces paquets de niveaux d'énergie sont nommés couches électroniques, bien que les électrons ne soient pas phy-

siquement dans des couches. Le nombre d'électrons que peut contenir chaque couche est limité et, lorsqu'une couche est pleine, l'atome ne réagit pas avec les autres atomes. Les atomes dont les couches sont entièrement remplies sont ainsi particulièrement stables.

Dans les agrégats métalliques, les nombres magiques correspondent au nombre d'électrons de valence qui remplissent complètement une ou plusieurs couches et rendent ces agrégats stables (le même phénomène préside à la stabilité des noyaux atomiques : lorsque les protons et les neutrons remplissent complètement une couche, le noyau est stable).

Les agrégats métalliques les plus stables sont quasi sphériques ; les autres sont étirés ou aplatis, comme des crêpes ou des ballons de rugby, voire des poires, des citrons, des diamants ; parfois même, ils ne présentent aucune symétrie. Dans tous les cas, la forme est celle pour laquelle l'énergie totale de l'agrégat est minimale. Comme le même phénomène de déformation se retrouve à propos des noyaux atomiques, les physiciens des agrégats ont repris certains outils théoriques utilisés en physique nucléaire.

La mécanique quantique décrit parfaitement les couches électroniques des agrégats et les nombres magiques qui leur correspondent. Cette théorie est peu intuitive, mais on peut comprendre l'existence des nombres magiques en se fondant uniquement sur les concepts classiques, qui s'appliquent aux objets macroscopiques.

On doit alors utiliser la théorie des orbites périodiques, mise au point au début des années 1970 pour établir une passerelle entre la mécanique quantique et la mécanique classique. À l'aide de cette théorie, on détermine les énergies des principales couches dans un système contenant des électrons ou d'autres petites particules.

1. LORSQUE DU MÉTAL EST VAPORISÉ dans une longue tuyère où règne le vide, les agrégats métalliques créés peuvent être de petites molécules avec des liaisons rigides, de gros agrégats d'atomes qui s'empilent en polyèdres réguliers, ou bien des «gouttes liquides». Au cours d'expériences différentes, on obtient ces différentes variétés en abondance.

Supercouches

Comment appliquer cette théorie aux agrégats? Un gros agrégat métallique peut être considéré comme une sphère creuse contenant des électrons de valence qui se déplacent à vitesse constante le long de lignes droites. Ces électrons rebondissent sur la surface interne de la sphère avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, à la façon d'ondes lumineuses réfléchies par un miroir. Ce modèle simple suffit, parce que les électrons de valence se déplacent librement à l'intérieur de l'agrégat sans pouvoir s'en échapper.

Les particules à l'intérieur d'une cavité sphérique ont des trajectoires périodiques : elles vont et viennent le long d'un diamètre ou se déplacent selon des polygones réguliers. En tenant uniquement compte des orbites périodiques les plus courtes et les plus fréquentes, les physiciens calculent une valeur approchée de la répartition des niveaux d'énergie permis. Les trois orbites les plus courtes sont les diamètres, les triangles équilatéraux et les carrés, mais, pour des raisons géométriques, les diamètres sont assez rares.

En n'utilisant que des trajectoires triangulaires ou carrées, on calcule une répartition des niveaux d'énergie que l'on peut qualifier, en un sens, de périodique : en fonction de l'énergie, les niveaux d'énergie permis sont régulièrement espacés. Cependant, la périodicité n'a pas une valeur unique : deux périodes coexistent qui correspondent aux deux orbites dominantes (triangle et carré). De même que deux ondes sonores de fréquences proches interfèrent et produisent des battements de fréquence inférieure, les deux

ensembles de couches interfèrent pour produire des regroupements des niveaux d'énergie, nommés supercouches (voir la figure 2).

En principe, les supercouches devraient également exister dans les noyaux atomiques, mais on ne les y observe pas, car les noyaux ne sont jamais assez gros : il faut 800 à 1 000 particules pour produire la première supercouche d'énergie, alors que le plus gros noyau jamais créé ne contient pas plus de 200 neutrons et de 120 protons. En 1991, des physiciens de l'Institut Niels Bohr de Copenhague et de l'Institut Max Planck de Stuttgart ont découvert des supercouches dans des agrégats chauds de sodium. Peu après, des chercheurs du Laboratoire Aimé Cotton, à Orsay, ont détecté des supercouches dans des agrégats de lithium, tandis que des physiciens de l'Université de Lyon-I en ont trouvé dans des agrégats de gallium.

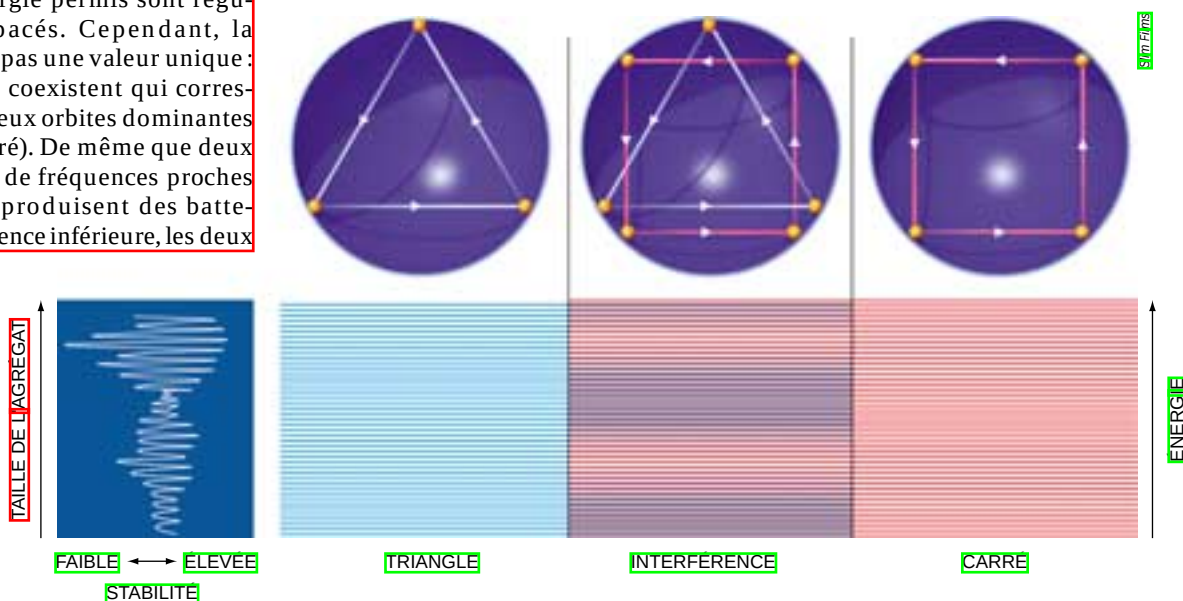
La théorie des orbites périodiques prévoit que la racine cubique des nombres magiques (approximativement, le rayon de l'agrégat) croît d'une même quantité d'une couche à la suivante. Effectivement, quand on représente la racine cubique des nombres magiques trouvés pour plusieurs agrégats métalliques chauds en fonction du nombre de couches, on obtient une

droite dont la pente est égale à 0,61 (voir la figure 3). Ce résultat expérimental est en accord à un pour cent près avec le calcul théorique effectué pour la cavité sphérique (0,603). Le calcul informatique qui utilise le modèle de la gelée et les règles de la mécanique quantique prédit exactement la même pente (pour les agrégats comprenant plus de quelques milliers d'atomes, le temps de calcul informatique est toutefois trop long).

Polyèdres parfaits

Platon pensait que les constituants ultimes de la matière avaient la forme des cinq polyèdres réguliers (cube, tétraèdre, octaèdre, icosaèdre et dodécaèdre). Pour les agrégats métalliques froids, il n'était pas très loin de la réalité : lorsque de nombreux atomes métalliques (plus de 1 000) s'assemblent lentement, à des températures relativement basses, ils s'empilent de manière compacte, comme des oranges sur un étalage, et forment des solides de forme régulière. Les physiciens déduisent la configuration de ces agrégats froids en observant comment leur stabilité dépend de leur taille.

Cette relation entre la forme et la stabilité est apparue en 1991, lorsque des physiciens de Stuttgart ont produit des atomes de sodium qu'ils



2. DANS LA THEORIE DES ORBITES PERIODIQUES, on considère que les agrégats métalliques forment des sphères creuses contenant des électrons qui rebondissent sur les parois (en haut). À l'aide de cette théorie, les physiciens calculent les niveaux d'énergie approximatifs des électrons (barres horizontales sur les trois diagrammes en bas, à droite). Les deux trajectoires périodiques principales (triangles et carrés) interfèrent pour former des

ensembles de couches nommées supercouches (bandes alternativement claires et sombres dans le diagramme central). À partir de la figure d'interférence calculée pour une taille d'agrégat donnée, on calcule la stabilité de l'agrégat. En répétant ce calcul en fonction de la taille, on obtient le diagramme de gauche, dans lequel le regroupement des niveaux d'énergie apparaît. Deux supercouches sont ainsi visibles.

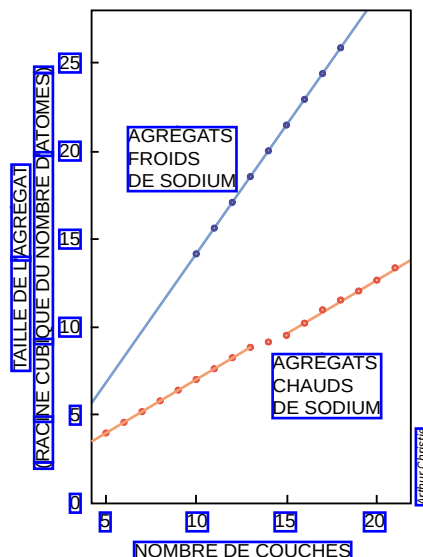
ont laissés s'associer à basse température. Curieusement, les agrégats les plus stables sont différents de ceux qui se forment à température élevée : de nouveaux nombres magiques apparaissent, correspondant à des groupes d'atomes rassemblés en icosaèdres parfaits, volumes à 20 faces triangulaires.

Ces icosaèdres grossissaient progressivement, par ajout de couches d'un atome de sodium d'épaisseur. Le nombre d'atomes ajoutés à chaque couche forme la séquence de nombres magiques. Les formes polyédriques simples créées de cette façon sont plus stables que des arrangements irréguliers, car l'énergie nécessaire pour maintenir les atomes en place est inférieure lorsque le nombre d'arêtes est minimisé.

La taille des agrégats métalliques froids magiques augmente linéairement avec le nombre de couches atomiques, mais moins vite que la taille des agrégats métalliques chauds magiques n'augmente avec le nombre de couches électroniques. De surcroît, la pente de la droite qui représente la taille en fonction du nombre de couches varie selon le type d'agrégats froids : différentes pentes indiqueraient des polyèdres de formes différentes. Les agrégats froids de sodium ou de calcium, par exemple, pour lesquels la pente est égale à 1,5 environ, sont très probablement des icosaèdres. La pente pour des agrégats comportant un nombre égal d'atomes de sodium et d'iode ou de sodium et de chlore est exactement égale à 1, ce qui signifie qu'ils ont la forme d'un cube. La raison pour laquelle l'une des formes apparaît plutôt qu'une autre demeure mal comprise.

Le cas des agrégats froids d'aluminium ou d'indium est particulier. En traçant leur taille (en fait, la racine cubique des nombres magiques correspondants) en fonction du nombre de couches, on trouve une pente égale à 0,220, inférieure à celle trouvée dans le cas de couches électroniques stables (0,6) et à celles d'atomes assemblés sous forme de tétraèdres (0,550), d'octaèdres (0,874), d'icosaèdres (1,493) ou de cubes (1,0). Aucun assemblage d'atomes en polyèdres réguliers ne correspond à la série de nombres magiques trouvés pour ces agrégats. Quelle forme ont-ils ?

Des physiciens de l'équipe de Stuttgart ont proposé une explication :



3. LA TAILLE DES AGRÉGATS, exprimée par la racine cubique du nombre d'atomes qu'ils contiennent, croît linéairement avec le nombre de couches. La pente de la droite dépend de la température des agrégats dans le jet. Les agrégats froids de sodium sont constitués d'arrangements compacts d'atomes en couches d'icosaèdres. Cette géométrie donne une pente d'environ 1,5 (droite bleue). À l'inverse, la forme géométrique des agrégats chauds de sodium est commandée par les couches électroniques donnant une pente d'environ 0,6 (droite rouge). Le décalage visible pour la couche 14 est la manifestation d'une super-couche telle qu'elle est prévue par la théorie des orbites périodiques.

ces agrégats d'aluminium et d'indium formeraient des octaèdres, mais, entre un nombre magique et le suivant, les atomes ajoutés couvriraient seulement une des faces triangulaires de l'octaèdre. Ce comportement expliquerait la faible valeur de la pente. Cette interprétation plausible soulève cependant une nouvelle question : pourquoi des octaèdres complets ne sont-ils pas plus stables que ceux dont une ou deux faces triangulaires seulement est recouverte ?

Les nombres magiques provenant de l'empilement des atomes ne déterminent pas de manière univoque la forme des polyèdres formés. Par exemple, la série des nombres magiques associés aux agrégats en forme d'icosaèdre est identique à celle que l'on trouve pour des cubo-octaèdres (des cubes aux coins coupés). L'étude d'agrégats froids de calcium indique que, pour cette suite de nombres magiques, les agrégats formés sont des icosaèdres, mais comment en être certain, alors qu'on n'a jamais vu d'icosaèdres directement ? S'ils étaient au repos, les agrégats les plus gros pour-

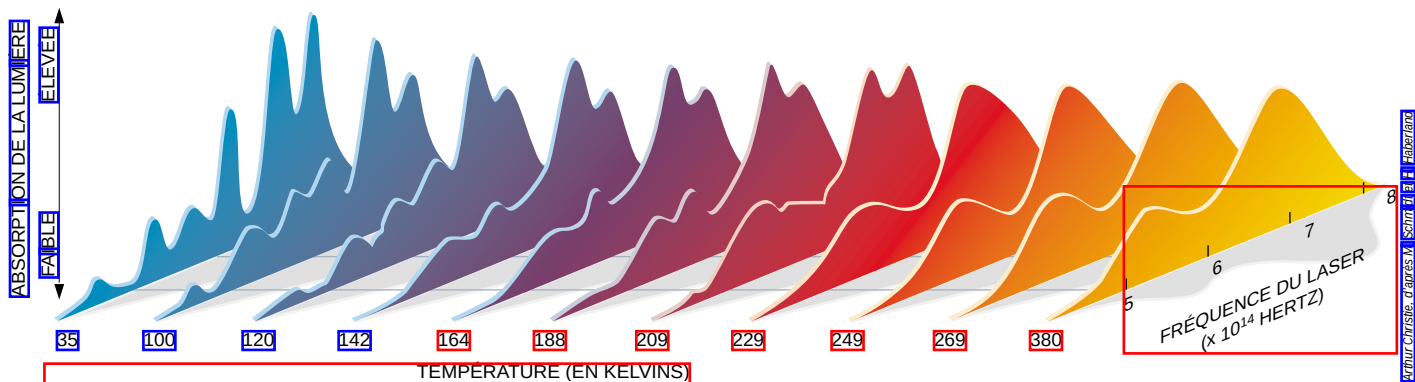
raient être observés au microscope électronique, mais les agrégats sont formés à l'intérieur du jet d'atomes, et on ne peut les arrêter sans les déformer.

Couches en compétition

La forme et la stabilité des agrégats métalliques sont déterminées par les niveaux d'énergie électronique et les niveaux d'énergie atomique. La dimension et la température sont des facteurs décisifs qui commandent quel type de couche prévaut. Toutefois, la mesure de la température des agrégats est difficile dans les jets ; peut-on même définir une température ? En physique, on ne peut définir une température que pour des systèmes composés de nombreuses particules en équilibre thermodynamique. Or, dans les jets, chaque agrégat suit son propre chemin, sans interaction avec ses voisins : isolé, il n'est pas en équilibre thermodynamique avec ses voisins.

Malgré tout, les tendances sont claires. Lorsque l'on chauffe la tuyère de la source, les couches d'icosaèdres bien formés d'agrégats froids de sodium semblent disparaître. Cette transition correspond probablement à la fusion des agrégats, de sorte qu'ici la température de fusion dépend de la taille des agrégats.

La même transition de phase a lieu dans des agrégats d'aluminium. Lorsque la température de la source est supérieure à 225 °C, température bien inférieure à la température de fusion de l'aluminium solide (660 °C), la pente de la droite représentant la taille des agrégats magiquement stables en fonction du nombre de couches n'est plus égale à 0,220, comme c'est le cas lorsque les agrégats sont octaédriques, mais à 0,6 environ, valeur qui correspond à une stabilité déterminée par les couches électroniques. Bien que la température de la tuyère soit inférieure à la température de fusion du métal solide, on peut supposer que ces agrégats ont fondu. Il n'y a pas lieu de s'étonner : la notion de température, comme celle de transition de phase entre solide et liquide, est mal définie pour des objets de cette taille. La surface des agrégats, en fondant localement, pourrait détruire l'assemblage ionique, ce qui permettrait à la stabilité que confèrent les couches électroniques complètement remplies de prendre le contrôle.



4. L'ABSORPTION DE LA LUMIERE LASER par les agrégats de sodium révèle que leur structure dépend de leur température de formation. À basse température, l'absorption varie beaucoup avec la fréquence (*en bleu*), une caractéristique de l'absorption par des molé-

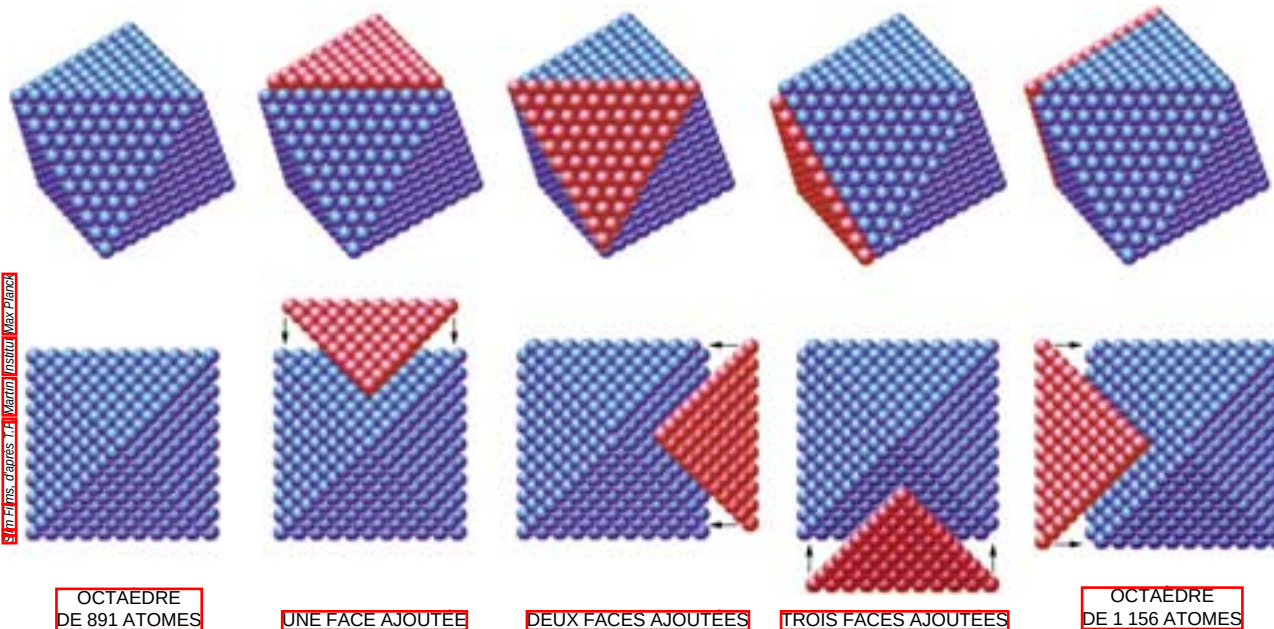
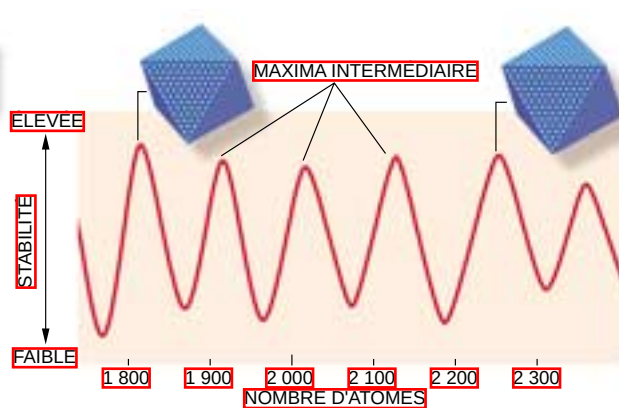
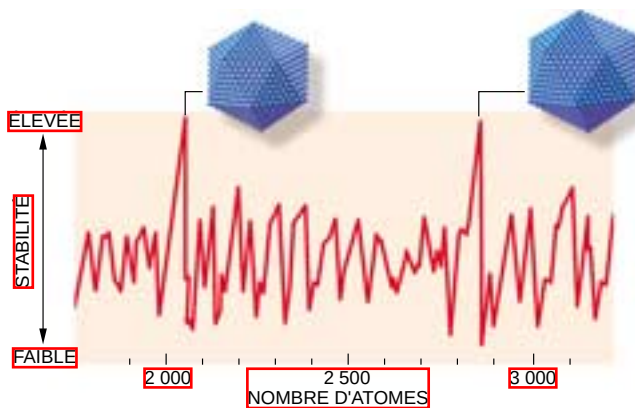
cules. A mesure que la température augmente, le spectre devient plus régulier, avec seulement deux gros renflements (*en orange*) : c'est l'indication que les agrégats sont «liquides», dépourvus de structure interne.

L'assemblage des atomes dans les agrégats froids

Les physiciens expliquent la stabilité exceptionnelle des agrégats métalliques froids à l'aide de la géométrie. Les agrégats froids de sodium, par exemple, sont particulièrement stables lorsque les atomes se disposent sous la forme d'icosaèdres, des polyèdres à 20 faces (*à gauche*).

La stabilité d'agrégats froids d'atomes d'aluminium assemblés en minuscules octaèdres est plus difficile à expliquer. Elle est

importante lorsque les atomes forment des octaèdres réguliers (*à droite*), mais des maxima se produisent également pour des octaèdres irréguliers : on suppose que la stabilité est également accrue lorsque les atomes ne couvrent qu'une seule des faces d'un octaèdre (*parties colorées en rouge, ci-dessous*). Comme l'ajout d'une quatrième face conduirait à un octaèdre parfait, on s'attend à ne trouver que trois maxima intermédiaires de stabilité, ce qui est le cas.



S. T. H. F. M. S. G. A. G. R. E. S. T. P. W. A. R. T. I. N. I. S. T. I. T. U. T. I. O. N. M. A. R. P. I. A. N. C. E.

Récemment, des physiciens de l'Université de Fribourg ont observé une transition de phase un peu différente, mais non sans rapport. Pour mieux contrôler la température de petits agrégats de sodium, ils les ont étudiés dans de l'hélium gazeux dont ils savaient ajuster la température avec précision. Dans ce mélange d'atomes d'hélium et d'agrégats de sodium, de nombreuses collisions se produisent. Toutefois, l'hélium étant chimiquement inerte, la structure des agrégats n'est pas modifiée, tout au moins à des températures modérées. L'hélium est donc un milieu où un équilibre thermodynamique s'établit.

Les physiciens ont étudié la manière dont les agrégats de sodium d'une taille donnée absorbent la lumière d'un faisceau laser : l'absorption de la lumière en fonction de la fréquence du laser – ce que l'on nomme le spectre d'absorption – renseigne sur l'état physique des particules éclairées. Ils ont observé que le spectre de molécules froides et solides diffère de celui que l'on obtient pour des gouttelettes chaudes et liquides. À une température inférieure à -173°C , le spectre comporte plusieurs pics étroits, ce qui est caractéristique d'une molécule rigide. Aux températures supérieures à 107°C , le spectre possède uniquement deux renflements, dont les maxima se trouvent à des fréquences prévues par la théorie de la «gelée» sans structure.

Pour les agrégats les plus petits, dont la structure interne est importante, on peut calculer rigoureusement, à l'aide de la mécanique quantique, le comportement de tous les électrons de chaque atome. Ces calculs révèlent la structure moléculaire de ces agrégats et expliquent de façon précise leur stabilité. Dans le cas des agrégats plus gros, contenant une

centaine d'atomes ou même davantage, de tels calculs sont excessivement longs, et les physiciens utilisent le modèle de la gelée. Pour les agrégats de plusieurs milliers d'atomes, les physiciens doivent renoncer à la mécanique quantique et employer la théorie simplifiée des orbites périodiques, à moins qu'ils ne s'en remettent à l'information indirecte que donnent les nombres magiques obtenus expérimentalement, à partir de la mesure de la proportion des agrégats produits suivant leur taille (les plus abondants étant les plus stables).

Depuis 1984, les physiciens ont parcouru un long chemin dans la compréhension et l'application des nombres magiques aux agrégats métalliques. Des agrégats icosaoédriques de sodium contenant jusqu'à 21 000 atomes ont été fabriqués. Pourtant, la structure cristalline du sodium solide n'est pas l'icosaèdre, car aucun matériau solide ne peut être construit en empilant des icosaèdres : de même que des tuiles pentagonales ne couvrent pas parfaitement un plan, sans vides ni chevauchements, les icosaèdres n'ont pas la symétrie qui permet de remplir entièrement l'espace. Pour cette raison, même les plus gros agrégats de sodium fabriqués à ce jour n'ont pas une organisation de leurs atomes semblable à celle que l'on trouve dans le sodium solide.

Si les physiciens ont obtenu une foule d'informations sur les agrégats métalliques et sur les nombres magiques qui assurent leur stabilité, ils ignorent toujours la réponse à cette question fondamentale : à quel moment et comment la transformation entre un agrégat et un solide massif se produit-elle ? Les agrégats métalliques constituent un étrange arrangement de la matière qui réserve certainement bien des surprises.

Matthias BRACK est professeur de physique théorique à l'Université de Ratisbonne, en Allemagne.

Pierre JOYES, *Les agrégats inorganiques élémentaires*, éditions de physique, 1990.

Sven BJØRNHOLM, *Clusters, Condensed Matter in Embryonic Form*, in *Contemporary Physics*, vol. 31, n° 5, pp. 309-324, septembre 1990.

M.L. COHEN et W.D. KNIGHT, *The Physics of Metal Clusters*, in *Physics Today*,

vol. 43, n° 12, pp. 42-50, décembre 1990.

Walt A. de HEER, *The Physics of Simple Metal Clusters : Experimental Aspects and Simple Models*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 65, n° 3, 1^{ère} partie, pp. 611-676, juillet 1993.

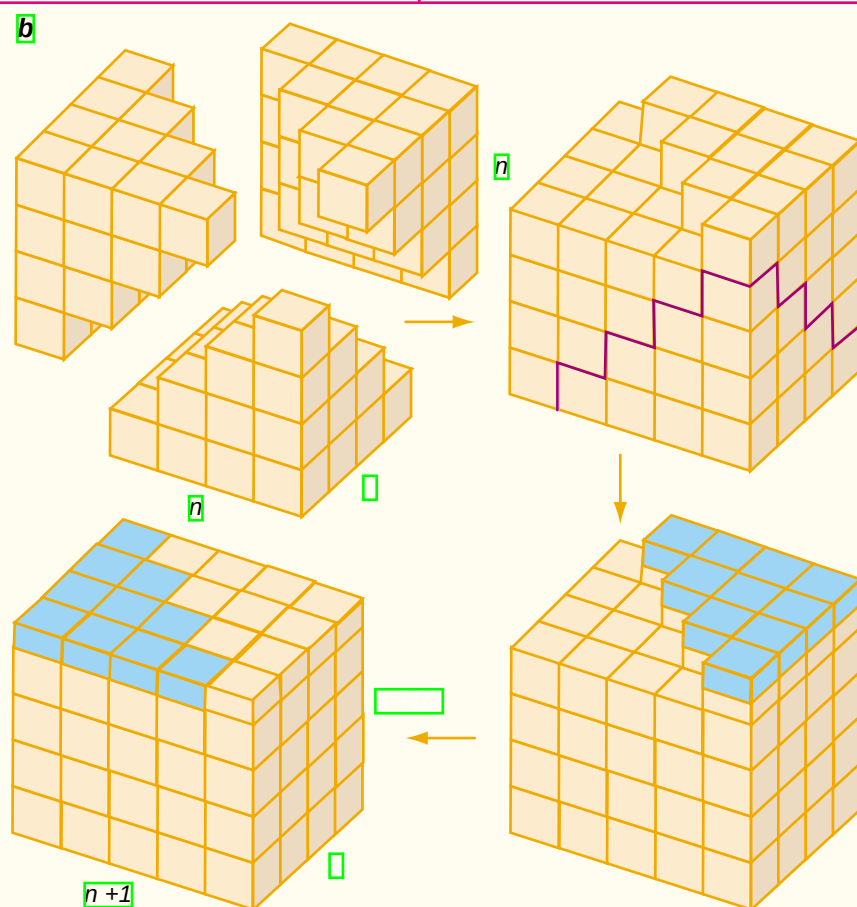
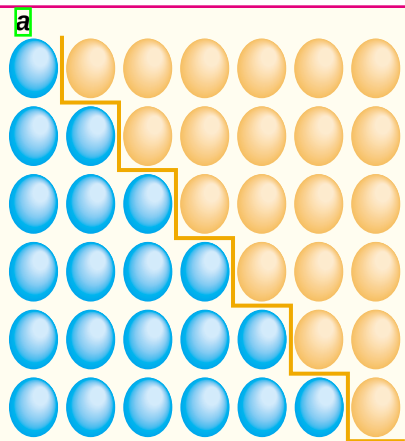
Matthias BRACK, *Self-Consistent Jellium Model and Semiclassical Approaches*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 65, n° 3, 1^{ère} partie, pp. 677-732, juillet 1993.

T.P. MARTIN, *Shells of Atoms*, in *Physics Reports*, vol. 273, n° 4, pp. 199-242, août 1996.

Les preuves sans mots

JEAN-PAUL DELAHAYE

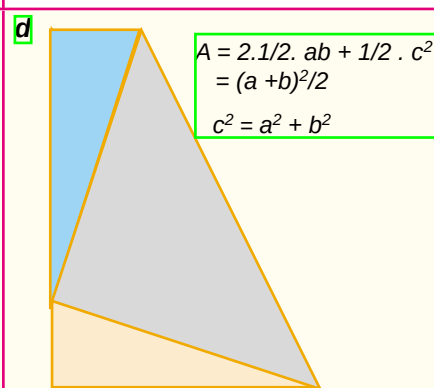
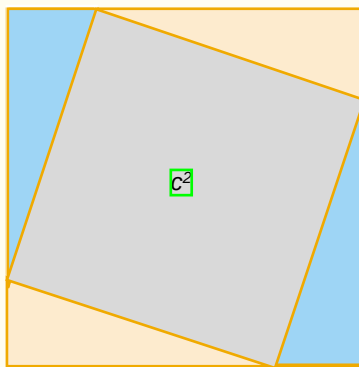
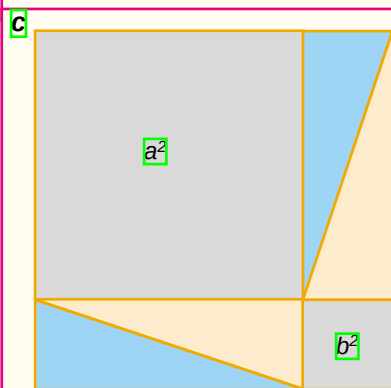
En mathématiques, un petit dessin vaut-il mieux qu'un long discours ?



I y a quelques années, il était bien vu de mettre le moins possible de dessins dans un livre de géométrie. On trouve encore en vente des ouvrages de géométrie dont certains chapitres ne comportent absolument aucune figure : j'en ai un chez moi, paru en 1967, dont le chapitre sur les barycentres ne contient aucun triangle, aucun segment, ni aucune illustration d'aucune sorte !

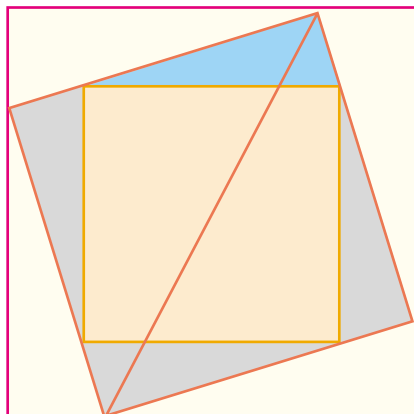
Le grand traité de mathématiques de Nicolas Bourbaki ne possède pas de tome consacré exclusivement à la géométrie, mais inclut quand même un livre d'algèbre de plus de 500 pages qui traite de droites, de plans, d'espaces, de parallèles, de parallélogrammes, de symétries, d'homothéties, de projections, de quadrilatères, du théorème fondamental de la géométrie projective, du théorème de Pappus, du théorème de Desargues, etc. Pas une figure !

L'idée derrière ce qui semble de navrantes aberrations est qu'une figure ne prouve rien et qu'au contraire, il faut s'en méfier, car elle n'est jamais *quelconque* : quand vous dessinez un triangle, il possède peut-être une caractéristique particulière qui vous donne l'illusion d'un résultat général erroné. Le raisonnement, même quand il concerne des

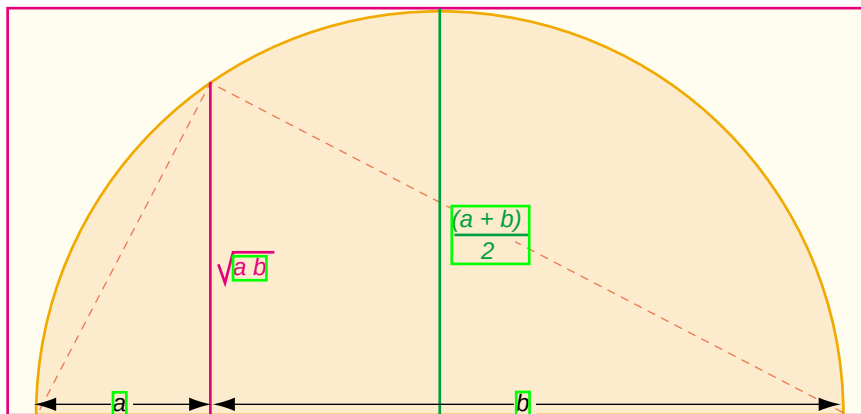


1. (a) : Preuve de $1 + 2 + 3 + \dots + n = n(n+1)/2$. (b) : Preuve de $1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = 1/3[n(n+1)(n+1/2)]$. Preuve due à Man-Keung Siu (1984). (c) et (d) : deux démonstrations du théorème de

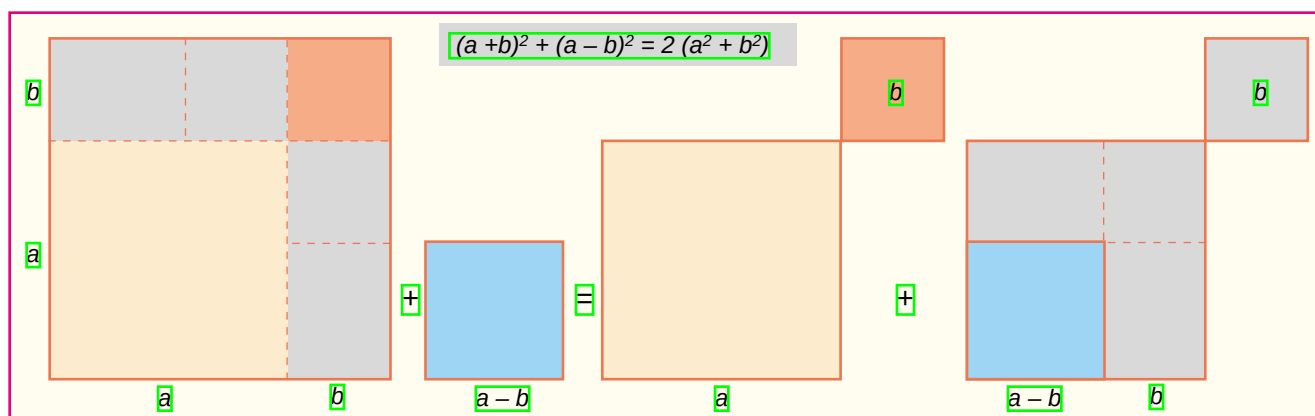
Pythagore. La première est due à un auteur inconnu qui vivait en Chine, vers -200 avant J.-C. La seconde est l'œuvre du vingtième président des États-Unis, James Garfield.



2. La bissectrice de l'angle droit d'un triangle rectangle coupe le carré construit sur l'hypoténuse en deux moitiés (R. Eddy, 1991).



3. La moyenne géométrique de deux nombres a et b , soit $\sqrt{ab}$, est toujours inférieure à la moyenne arithmétique de ces deux nombres, $(a + b)/2$. Cette preuve est due à Charles D. Gallant (1977).



4. Une identité algébrique peut se voir. En voici un exemple dû à Shirley Wakin (1984).

objets géométriques, ne doit pas s'appuyer sur ce qu'on voit : en mathématiques, méfions-nous des sens!

Plusieurs raisonnements géométriques apparemment irréprochables conduisent à des paradoxes. L'erreur provient le plus souvent de la figure dont on s'aide pour le raisonnement, qui est imperceptiblement trompeuse et nous conduit dans un piège. L'un de ces raisonnements établit que «tout triangle est isocèle» (voir la figure 5). Il fut inventé par Lewis Carroll, qui le présenta dans son ouvrage *The Lewis Carroll Picture Book* (1899).

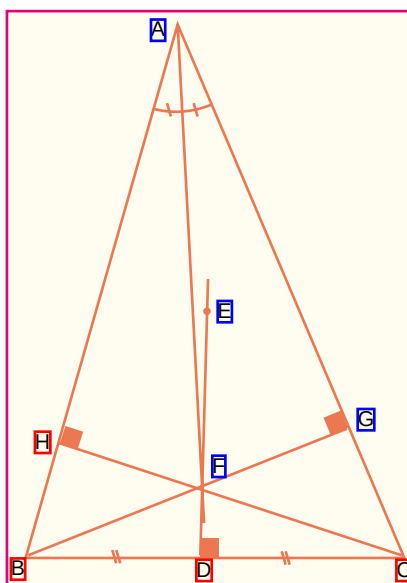
Après avoir constaté les ravages produits par la conception de la géométrie sans figure sur les jeunes esprits que cette forme d'intégrisme dégoûtait des mathématiques, on accepte plus facilement d'illustrer une démonstration par un dessin qui en facilite l'assimilation, même si l'on en connaît les risques.

DÉMONSTRATIONS PAR LES FIGURES

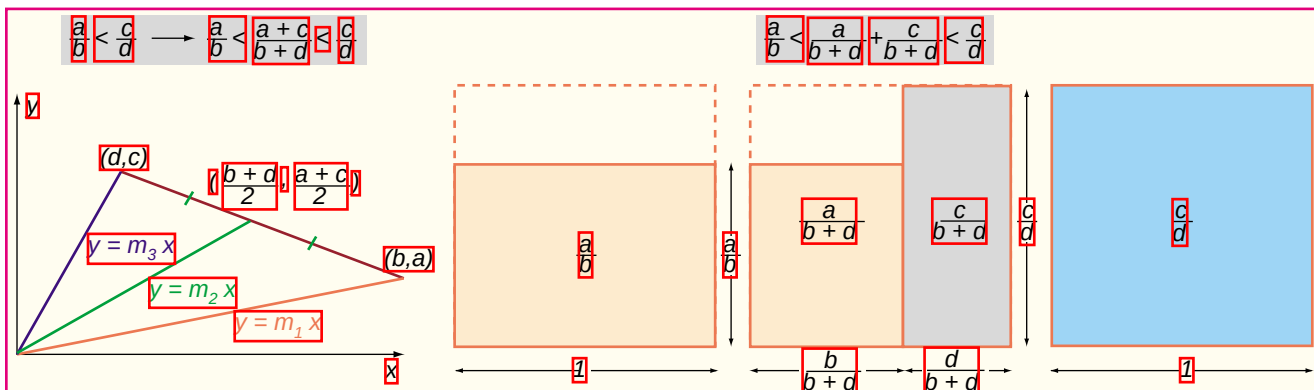
A l'exact opposé des démonstrations géométriques sans figure, un jeu étrange et subtil s'est développé aux

Etats-Unis : celui des *démonstrations sans mots*. Encouragé par plusieurs revues mathématiques destinées aux enseignants, il a conduit à de remarquables preuves sans un seul mot, qu'un livre de Roger Nelsen a collec-

tées et que nous recommandons à tous ceux que les dessins de cet article auront stimulés (le livre est en anglais, mais, vu son objet, même s'il était en moldave méridional ou en malais primitif, je n'hésiterais pas à le conseiller).



5. ABC est un triangle quelconque. Traçons la perpendiculaire au milieu D de BC, soit E un point de cette perpendiculaire. Considérons la bissectrice de l'angle A. Si DE et cette bissectrice ne se rencontrent pas, cette bissectrice est orthogonale à BC, et donc le triangle est isocèle. Si DE et cette bissectrice se rencontrent en un point F, traçons FB et FC, puis la perpendiculaire FH à AB passant par F, et enfin la perpendiculaire FG à AC passant par F. Les triangles AFG et AFH sont égaux, car ils ont un côté commun et deux angles égaux. Donc AH=AG et FH=FG. Les triangles BDF et CDF sont aussi égaux (car BD=DC, DF commun et les angles en D égaux) et donc FB=FC. De même encore, les triangles FGC et FHB sont égaux (deux côtés et un angle égaux), donc HB=GC, et donc (en utilisant que HA=GA) on en déduit que AB=AC, c'est-à-dire que le triangle ABC est isocèle (l'erreur provient de ce que, si on construit F soigneusement, il se trouve toujours à l'extérieur du triangle ABC, ce qui interdit la suite du raisonnement).



6. La règle des nombres moyens de Nicolas Chuquet datant de 1484. Deux preuves sans mots, la première (à gauche) de Li Changming (1988), la seconde (à droite) de Roger Nelsen (1993).

Le jeu des *démonstrations sans mots* consiste à concevoir des figures – accompagnées éventuellement de quelques équations – suffisamment bien conçues pour qu'en les regardant on se trouve persuadé de résultats mathématiques qui, sans la figure, ne sont pas évidents, ou même sont difficiles. Bien sûr, l'observateur doit connaître un minimum de résultats élémentaires : cas d'égalités des triangles, formule de la surface d'un carré, d'un triangle, d'un rectangle, etc.

Toutes les preuves sans mots ne sont néanmoins pas évidentes. Parfois il faut regarder et réfléchir longuement sur les figures pour comprendre pourquoi elles constituent une preuve du résultat annoncé. Parfois même on n'y arrivera pas : nul ne prétend que les mathématiques puissent être totalement évidentes. Le plaisir qu'on éprouve à saisir une démonstration graphique est

si délicieux que l'on en redemande aussitôt. Les exemples de cette rubrique seront bien sûr insuffisants pour étancher votre soif. Ils nous serviront à réfléchir à ce qu'est une preuve mathématique.

PREUVES PARLANTES ET PREUVES MUETTES

Les exemples les plus simples de preuve sans mots concernent la formule :

$$1 + 2 + 3 + \dots + n = n(n+1)/2$$

La figure 1a en indique une qui était connue dans la Grèce antique.

Pourtant, si on voulait écrire une «démonstration complète et rigoureuse», au sens que donne à cette expression un mathématicien contemporain, il faudrait utiliser un raisonnement par récurrence.

La formule est vraie pour $n = 0$. Supposons qu'elle est vraie pour m et étudions le cas $m + 1$:

$$1+2+\dots+m+(m+1)=m(m+1)/2+(m+1),$$

(par utilisation de l'hypothèse que la formule est vraie pour m)

$$=(m+1)(m/2+1)$$

(en factorisant $(m+1)$)

$$=(m+1)(m+2)/2,$$

(en réduisant au même dénominateur la seconde parenthèse).

L'égalité obtenue en prenant le premier et le dernier éléments de cette suite d'égalités est la formule cherchée pour $m+1$. Donc la formule est vraie pour tout entier.

Le principe du *raisonnement par récurrence* est : «Si une propriété P est vraie pour 0, et que l'on a l'implication $\{P \text{ vrai pour } m\} \Rightarrow \{P \text{ vrai pour } m+1\}$, alors P est vraie pour tout entier.»

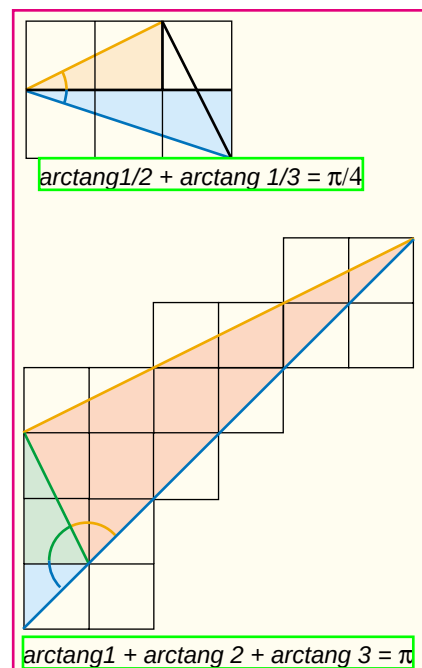
La démonstration rigoureuse est plus longue et surtout moins claire. La démonstration visuelle nous donne le sentiment de mieux saisir ce qui se passe. Le raisonnement par récurrence laisse sur sa faim : il *démontre* le résultat, il ne le *montre* pas.

NE RÊVONS PAS TROP

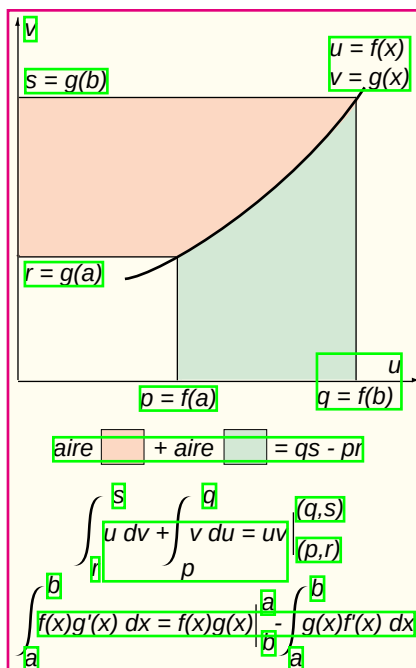
Il serait cependant trop simple de condamner le raisonnement par récurrence et les preuves habituelles des mathématiciens. Même si l'on éprouve une joie intense à observer et à réfléchir sur des *preuves sans mots*, il faut défendre les *preuves avec mots* et, pour commencer, la preuve par récurrence présentée au-dessus.

Son premier avantage est que, pour une multitude de formules analogues, elle marche mécaniquement. On savait, avant de commencer à l'écrire, qu'on allait aboutir, et l'on sait qu'on pourrait par la même méthode démontrer que $1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = 1/3 n(n+1)(n+2)$. Il ne semble pas que la magnifique démonstration sans mots de Man-Keung Siu (voir la figure 1a) puisse être produite automatiquement.

Un second avantage des preuves avec mots est qu'elles peuvent être défi-



7. Deux formules d'arctangentes. La première démonstration est très classique, la seconde est due à Edward Harris (1987).



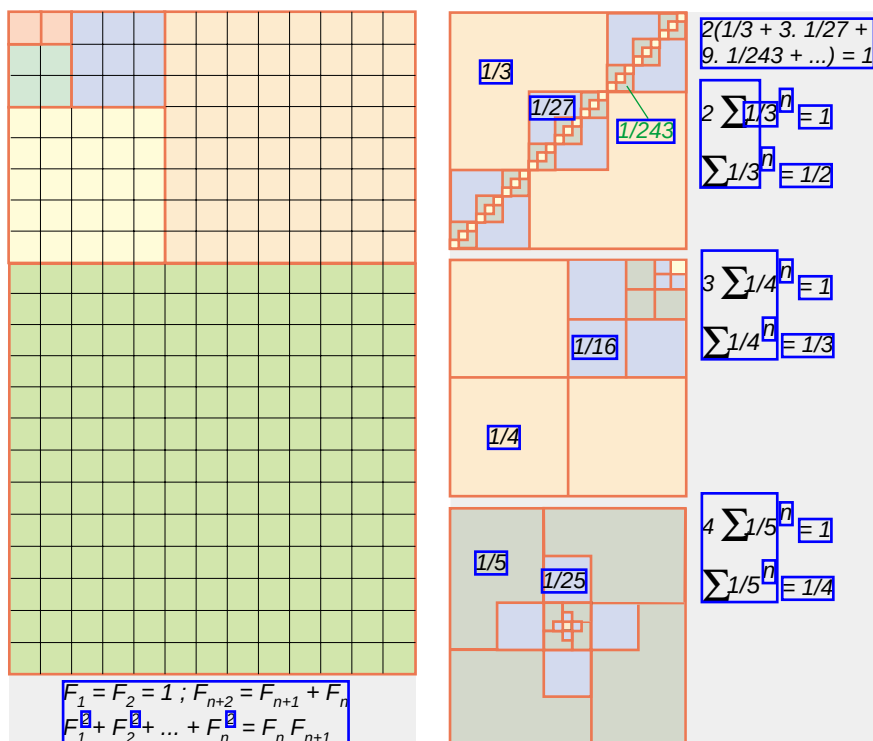
8. Démonstration sans mots de l'intégration par parties due au mathématicien américain Richard Courant (1937).

nies avec une précision parfaite : on parle alors de *preuve formelle*. Lorsqu'une preuve formelle détaillée est écrite, plus aucune intelligence n'est nécessaire pour la comprendre et en vérifier l'exactitude ; il suffit d'en suivre les différents pas en contrôlant que chacun est autorisé, car conforme aux règles exhaustivement fixées au départ. Un mathématicien qui détaille suffisamment une démonstration est certain d'être compris de ses collègues.

On pourrait critiquer ces prétendus avantages des preuves formelles de deux façons. D'une part, on sait qu'aucune notion absolue de preuve ne peut être définie (c'est le sens profond des théorèmes de limitation en logique) ; d'autre part, il n'est pas vrai que tout mathématicien comprend facilement les preuves avec les mots que ses collègues écrivent.

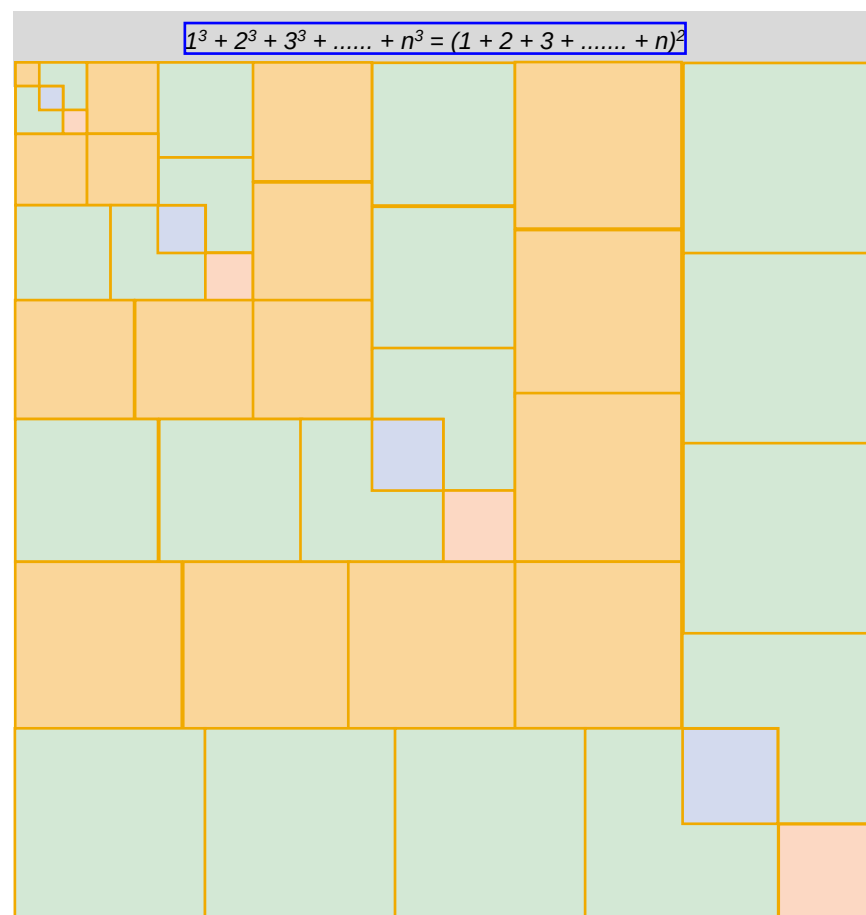
A la première critique, il faut répondre que, même si aucune notion de preuve formelle ne peut convenir simultanément à tous les domaines des mathématiques, certaines notions, comme celles utilisées par Bourbaki (le premier livre du *Bourbaki* est consacré à la définition de la notion de preuve formelle sur laquelle s'appuient tous les autres livres), conviennent pour 99,9 pour cent des mathématiques. De plus, pour chaque partie des mathématiques qui échappe à cette notion formelle de preuve, on trouve une autre notion de preuve formelle qui convient. Contrairement à ce que certains philosophes naïfs croient, les développements de la logique moderne depuis un siècle n'ont pas rendu caduque la notion de *formalisation*, mais, au contraire, l'ont installée de manière définitive au cœur des mathématiques. Cela est si vrai d'ailleurs que, même les intuitionnistes (un courant de pensée en logique qui préconise d'adopter une attitude prudente vis-à-vis du traitement de l'infini), qui étaient rétifs à l'utilisation des systèmes formels de preuve, les ont acceptés. Même si l'on sait qu'aucun véhicule ne permettra jamais d'aller à la vitesse de la lumière, nous ne renonçons pas aux véhicules pour nous déplacer ; il en va de même pour les systèmes formels de preuves.

Pour répondre à la seconde critique : l'incapacité des mathématiciens à se comprendre entre eux, il suffit simplement de dire que c'est là une marque de la limitation des cerveaux humains, pas d'une limitation théorique. Personne aujourd'hui n'est en mesure de comprendre toutes les mathématiques qui sont écrites, comme personne n'est capable de lire tous les romans qui sont publiés. Reste qu'il est vrai que tout bon mathématicien à qui on présenterait une preuve élaborée par un collègue finirait, s'il en faisait l'effort, par la comprendre même si, dans certains cas,

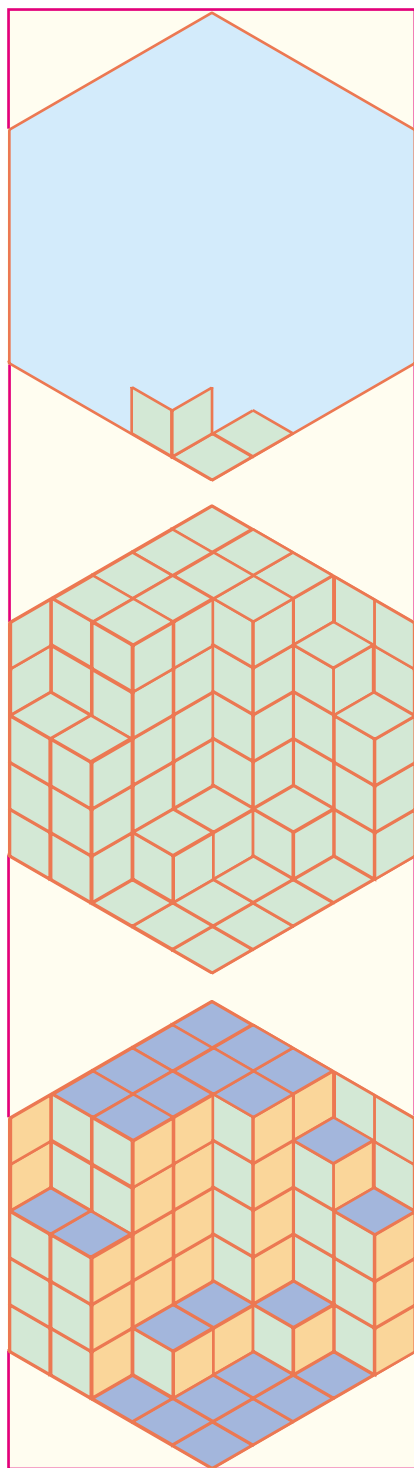


9. La somme des carrés des \$n\$ premiers nombres de Fibonacci est égale au produit du \$n\$-ième par le \$(n+1)\$-ième. Démonstration due à A. Brousseau.

10. Quelques jolies séries sur la somme des inverses de \$3^n\$, des inverses de \$4^n\$, des inverses de \$5^n\$. Ces preuves sont dues à Elisabeth Markham (1993).



11. La somme des cubes des \$n\$ premiers entiers. La preuve sans mots a été proposée en 1984 par Solomon Colomb, le grand spécialiste des polyominos.



16. Le problème des calissons. Un calisson est un losange obtenu par accolement de deux triangles équilatéraux. Le *Théorème des calissons* stipule que, dans une boîte hexagonale dont le côté est n , lorsqu'on range des calissons de côté 1, il y en a un nombre identique, orientés dans chacune des trois directions possibles. Ici la preuve sans mots (proposée en 1989 par Guy David et Carlos Tomei) est fulgurante : notre vision tridimensionnelle fait tout le travail. N'arrivant pas à me persuader que le dessin constituait ici une véritable preuve du théorème des calissons, j'avoue que, pour me convaincre de son exactitude, je l'ai rétabli par une méthode différente.

cela nécessiterait un travail de plusieurs mois, ou même de plusieurs années.

Au total, les notions de preuves formelles tirées des preuves avec les mots sont bel et bien des outils puissants et généraux que les preuves sans mots ne détrôneront pas.

LE THÉORÈME DES VALEURS INTERMÉDIAIRES

Aussi amusantes qu'elles soient, les preuves sans mots atteignent vite leurs limites et ne doivent donc pas être prises trop au sérieux, comme l'exemple suivant le montre encore.

Le résultat d'analyse appelé *théorème des valeurs intermédiaires* nécessite une démonstration assez compliquée qui ne fut formulée qu'au XIX^e siècle par le mathématicien tchèque Bolzano. En revanche, son sens est perçu sur une figure simple qu'on pourrait voir comme une démonstration sans mots.

Le théorème des valeurs intermédiaires affirme que, si f est une fonction continue (quand on en dessine la courbe il n'y a pas besoin de lever le crayon) définie entre deux valeurs a et b , alors pour toute valeur v entre $f(a)$ et $f(b)$ il existe au moins un nombre c tel que $f(c) = v$. Graphiquement, cela signifie simplement que, pour tracer un trait sans lever le crayon d'un point sous la droite $y = v$ à un point au-dessus de la droite, vous devez la traverser.

Un dessin en constitue certainement une preuve visuelle, mais, contrairement à la preuve donnée par les mathématiciens aujourd'hui, elle ne fait pas réfléchir à la structure des nombres réels et, en fait, ne montre rien !

La preuve visuelle du théorème des valeurs intermédiaires est trop évidente, et c'est cela sa faiblesse ! En cherchant à comprendre cette évidence, les mathématiciens ont été amenés à approfondir la notion de continuité, puis la structure de l'ensemble des nombres réels, puis finalement tout un domaine mathématique qui constitue la puissante analyse contemporaine sans laquelle bien des questions de physique resteraient énigmatiques. L'évidence graphique est parfois dangereuse : elle incite à la paresse ; c'est en la refusant ou en essayant de la traduire sous une autre forme qu'avance notre compréhension.

TOUT NE PEUT PAS SE DÉMONSTRER VISUELLEMENT

L'habitude que nous avons de vivre dans un espace à trois dimensions et la bonne adaptation de notre cerveau à cette situation nous dotent d'une intuition géomé-

trique qu'il faut utiliser pour faire aimer les mathématiques aux enfants. Cependant notre situation d'objet physique dans un espace physique particulier a aussi ses inconvénients : nous n'arrivons pas à percevoir très clairement ce qu'est une sphère à quatre dimensions ou un espace à une infinité de dimensions, comme les physiciens en ont besoin aujourd'hui. Seule l'approche non géométrique des démonstrations nous conduit dans ces mondes mathématiques.

C'est sans doute à cause de tout cela que la grande époque de la géométrie est passée et qu'en tout cas il serait absurde de remplacer la notion classique de preuve avec des mots par une notion purement géométrique. Même si finalement cela nous désole, le point de vue formaliste (accepter de définir avec précision ce qu'est une preuve avec des mots et tout y ramener) est bien le meilleur et le plus puissant. Tout en lui restant fidèle dans les travaux les plus avancés, il faut refuser de se laisser obnubiler par lui, et il ne faut jamais perdre de vue qu'il n'est que l'aboutissement d'une longue maturation. Les élèves doivent parcourir un chemin dans lequel les preuves sans mots ont un rôle important à jouer, et l'on doit suggérer aux pédagogues de s'y intéresser en France, comme ils l'ont fait aux États-Unis : les preuves sans mots, en ancrant les mathématiques dans un réel immédiat, les rendent sympathiques, font ressentir que ce qu'elles disent est concret et permettent de plus de mémoriser sans mal des résultats à l'aspect rébarbatif.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lil.fr

N. BOURBAKI, *Éléments de mathématique. Algèbre I* (chapitres 1 à 3), Hermann, Paris, 1970.

Roger B. NELSEN, *Proofs Without Words : Exercises in Visual Thinking*, Classroom Resource Materials, n° 1, The American Mathematical Association of America, MAA Service Center, Washington DC, 1993.

H. EVES, *An Introduction to the History of Mathematics*, Sixth Edition, Saunders College Publishing, New York, 1992.

M. GARDNER, *Wheels, Life and other Mathematical Amusements*, W.H. Freeman and Company, New York, 1983, chapitre 6, *Geometrical Fallacies*.

B. d'AMORE, *Paradoxes en géométrie*, Plot n° 58, 1^{er} trimestre 1992, Association régionale de l'APMEP (Association des professeurs de mathématiques de l'enseignement public), Université d'Orléans, pp. 13-18.



Bateau à savon

MARTIN SHANAHAN

Son mouvement démontre l'effet des forces de surface.

Les physiciens qui s'intéressent aux surfaces explorent depuis quelques années les phénomènes de mécano-chimie que l'on observe quand on pose une gouttelette de liquide sur une surface horizontale, par exemple. Habituellement la goutte s'étale plus ou moins, selon que le substrat est «mouillable» ou non, puis elle s'immobilise ; en revanche, quand le liquide réagit avec le solide sur lequel il est posé, rendant ce dernier moins mouillable après contact, une dissymétrie déplace la goutte vers les parties qui n'ont pas réagi et restent donc plus mouillables. La goutte continue de filer sur le substrat tant qu'il reste des zones non parcourues.

Les phénomènes de ce type, qui semblent avoir lieu dans diverses réactions biologiques (opération des muscles, fonctionnement des capillaires dans les plantes), ont été identifiés il y a peu, mais un de leurs avatars est bien connu des amateurs d'expériences et des enfants qui jouent avec de l'eau : du camphre ou, plus simplement, du

savon, propulsent de petits bateaux. Dans ce cas, l'énergie provient de la tension superficielle de l'eau, modifiée par le savon ou par le camphre.

Pour faire l'expérience, je vous conseille de tailler un petit bateau dans du bois ou dans une feuille de plastique d'emballage, plate et rigide, telles celles qui encapsulent les briquets, les fiches électriques et de multiples petits articles ménagers. Découpons la feuille en forme de bateau simple (voir la figure 1), avec une longueur de cinq centimètres et une largeur de un centimètre environ. Ajoutons le «moteur» : sur l'arrière du bateau, nous attachons un petit morceau de pâte à modeler où nous incrustons quelques miettes de savon (le «carburant») ou de camphre (on en trouve en pharmacie).

Dans une baignoire, faisons couler une petite profondeur d'eau (il faudra renouveler l'eau souvent, car sa surface se couvre de «carburant» quand le bateau fonctionne). Attendons que les courants cessent et évitons les courants d'air. Puis posons délicatement le bateau sur la sur-

face de l'eau : presque immédiatement, il se met en mouvement et atteint une vitesse constante de quelques centimètres par seconde. Si on l'a muni d'un gouvernail qui évite les collisions contre les bords, il tourne sans interruption pendant quelques dizaines de minutes.

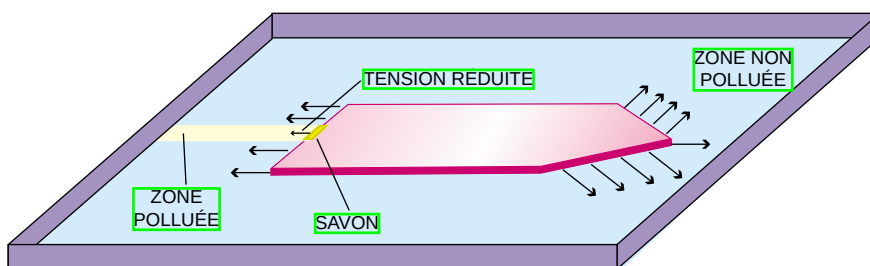
Pourquoi ce mouvement ? Parce que des forces de tension superficielle s'exercent entre l'eau et le bateau. Imaginons une goutte d'eau isolée dans l'espace, sans pesanteur. Les molécules d'eau au centre sont attirées par toutes leurs voisines, dans toute les directions. En revanche, à la surface de la goutte, les molécules ne sont tirées que par les molécules voisines, situées sur les côtés et en dessous ; la force résultante qui les tire vers le centre est la tension superficielle.

Ainsi la surface d'un liquide agit un peu comme si elle était une membrane emprisonnant ce liquide : la tension superficielle permet de remplir une cuillère à café avec de l'eau à un niveau un peu supérieur à son bord (sans la tension superficielle, l'eau qui dépasse de la cuillère s'écoulerait).

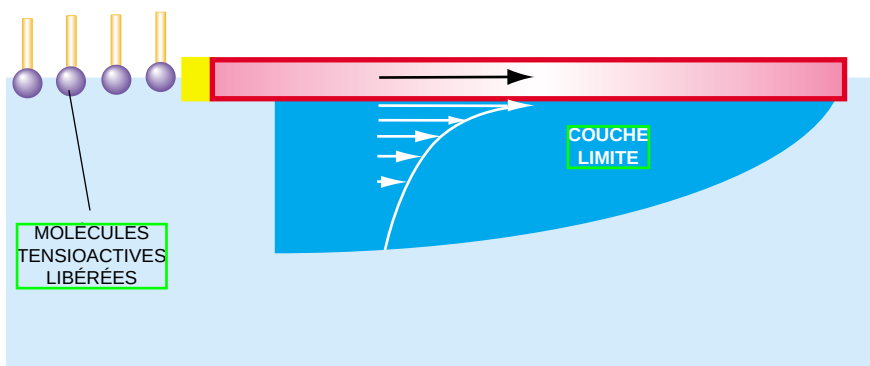
Les mêmes types de forces qui maintiennent solidaires les molécules d'eau sont responsables d'une attraction entre les molécules d'eau et les molécules de matière plastique. La force de traction sur un bord du bateau est égale à la tension superficielle multipliée par la largeur du bord.

Lorsque l'eau est pure, la force qui tire sur la poupe est égale à celle qui s'exerce sur la proue : les deux forces se compensent : le bateau reste immobile. Toutefois le «carburant», savon ou camphre, est «tensioactif» : sa présence réduit localement la tension superficielle de l'eau, de sorte que la force de traction vers l'avant est supérieure à la force de traction vers l'arrière. La force résultante tire le bateau vers l'avant (la vitesse est supérieure lorsqu'on utilise du savon, parce que ce dernier réduit davantage la tension superficielle ; en contrepartie, le bateau tourne plus longtemps avec un moteur à camphre, parce qu'il pollue moins vite la surface de l'eau).

Pourquoi cette force n'engendret-elle pas une accélération constante ?



1. Le bateau à savon est mis en mouvement par un petit morceau de savon, à la poupe.



2. L'écoulement de l'eau sous le bateau : seule une couche limite est entraînée (zone bleu foncé) à une vitesse qui diminue avec la profondeur (flèches blanches).

Calcul de la vitesse d'un bateau à tensioactif

La vitesse de croisière U d'un bateau propulsé par des phénomènes de tension superficielle peut être estimée à partir d'une analyse simple. Devant le bateau, la force propulsive est égale à $\gamma_0 W$, où γ_0 est la tension superficielle de l'eau pure, et W la largeur du bateau. Derrière, la force résistante due à la tension superficielle est égale à la somme de $\gamma_0(W - w)$, pour la partie qui ne comporte pas le moteur (de largeur w), et de γw pour le moteur (où γ est la tension superficielle de l'eau additionnée de produit tensioactif, inférieure à γ_0).

Lorsque la vitesse est constante, la force de propulsion totale, $(\gamma_0 - \gamma)w$, est équilibrée dynamiquement par une force hydrodynamique de freinage. En effet, une mince couche d'eau est entraînée par le fond du bateau. Un cisaillement se produit dans cette couche d'épaisseur d , nommée couche limite. L'épaisseur d augmente avec la distance de la proue, mais, dans les conditions examinées ici, elle reste très mince, ne dépassant guère un millimètre. Les molécules d'eau directement en contact avec le bateau ne glissent pas sur lui et se déplacent à la vitesse U . Le cisaillement dû à la variation de vitesse de l'eau, entre le fond du bateau et la partie inférieure de la couche limite, est responsable de la force de freinage.

L'écoulement est-il régulier ou turbulent? Pour répondre à cette question, les hydrodynamiciens utilisent le nombre de Reynolds, égal à $UL\rho/\eta$, où L est la longueur du bateau, ρ la masse volumique de l'eau et η sa viscosité. Le nombre de Reynolds représente le rapport des forces inertielles du liquide sur les forces visqueuses : il est petit lorsque la viscosité l'emporte, auquel cas l'écoulement n'est pas turbulent ; inversement, lorsqu'il est grand, l'inertie l'emporte sur la viscosité, et l'écoulement devient turbulent. Ici, avec une longueur de cinq centimètres et une vitesse de dix centimètres par seconde, on calcule un nombre de Reynolds égal à 5 000 environ, de sorte que l'écoulement est laminaire. Dans ces conditions, on peut assimiler le bateau à une plaque mince, dont la résistance à l'avancement par unité de largeur, f , est égale à :

$$0,66 (\eta \rho L U^3)^{1/2}.$$

La résistance totale au mouvement du bateau est Wf , de sorte que, si l'on écrit qu'à la vitesse de croisière les forces propulsives sont égales aux forces résistantes, on obtient la vitesse :

$$U = 1,3 (w^2 (\gamma_0 - \gamma)^2 / \eta \rho L W^2)^{1/3}.$$

Avec les valeurs des paramètres ($\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$, $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$, $\gamma - \gamma_0 = 40 \text{ mN/m}$), la vitesse est de dix centimètres par seconde environ.

Parce que le bateau entraîne les molécules d'eau à son contact (voir la figure 2) ; la viscosité de l'eau exerce une résistance qui équilibre la force propulsive.

Cette situation d'équilibre dynamique subsiste tant que l'eau située devant la proue reste pure ou, du moins tant qu'elle présente une tension superficielle supérieure à celle de la poupe. Un calcul simple (voir l'encadré) de la vitesse de croisière du bateau déter-

mine la vitesse effectivement observée et, de ce fait, confirme l'analyse proposée : avec les dimensions choisies pour le bateau, une largeur de «moteur» égale à un millimètre, on obtient une vitesse de croisière de dix centimètres par seconde environ, en bon accord avec les observations.

Puis, quand la surface se pollue, la force de propulsion diminue, et le bateau ralentit. Il faut alors changer l'eau pour reprendre les études.

Martin SHANAHAN est directeur de recherche au Centre des matériaux Pierre-Marie Fourt (École des Mines de Paris), à Évry.

C.D. BAIN, G.D. BURNETT-HALL et R.R. MONTGOMERIE, *Rapid Motion of Liquid Drops*, in *Nature*, vol. 372, p. 414, 1994.

F. BROCHARD-WYART et P.-G. de GENNES, *Spontaneous Motion of a Reactive Drop*, in *Comptes rendus de l'Académie des*

sciences, vol. 321 (série lib), p. 285, 1995.

F. DOMINGUES dos SANTOS et T. ONDARÇUHU, *Free Running Droplets*, in *Physical Review Letters*, vol. 75, p. 2972, 1995.

M.E.R. SHANAHAN et P.-G. de GENNES, *Start-up of a Reactive Droplet*, in *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 324 (série lib), p. 261, 1997.

Traînées de navires

Les traces blanches sur l'image de droite évoquent les traînées de condensation que laissent des avions dans un ciel clair. Sur cette photographie infrarouge (à la longueur d'onde de 3,7 micromètres) prise au large de la Californie, par un satellite météorologique américain, ce sont des particules émises par des cheminées de navires qui ont modifié les propriétés optiques des nuages au-dessus de l'océan Pacifique. La photographie permet de suivre les navires à la trace.

On a ajouté de fausses couleurs à l'image originale : du marron pour les masses continentales et du bleu pour l'océan. Les zones sombres correspondent aux régions de ciel clair, et les zones blanchâtres indiquent la présence de nuages, bancs de stratocumulus fréquents dans cette région océanique. Plus le nuage réfléchit le rayonnement solaire à la longueur d'onde d'observation, plus il apparaît brillant.

Comme tout moteur à combustion, les moteurs des navires émettent des particules, plus souvent appelées aérosols. Lorsque ces particules pénètrent dans un nuage, des gouttelettes d'eau

se forment sur certaines d'entre elles. La présence de ces particules, qui s'ajoutent aux aérosols naturels, accroît donc le nombre de gouttelettes dans le nuage.

La quantité d'eau restant constante, la taille moyenne des gouttelettes diminue (voir le schéma) et leur surface totale augmente. Selon des mesures *in situ* par avion, le diamètre des gouttelettes varie de 10 micromètres dans un stratocumulus à 7 micromètres dans une traînée de navire.

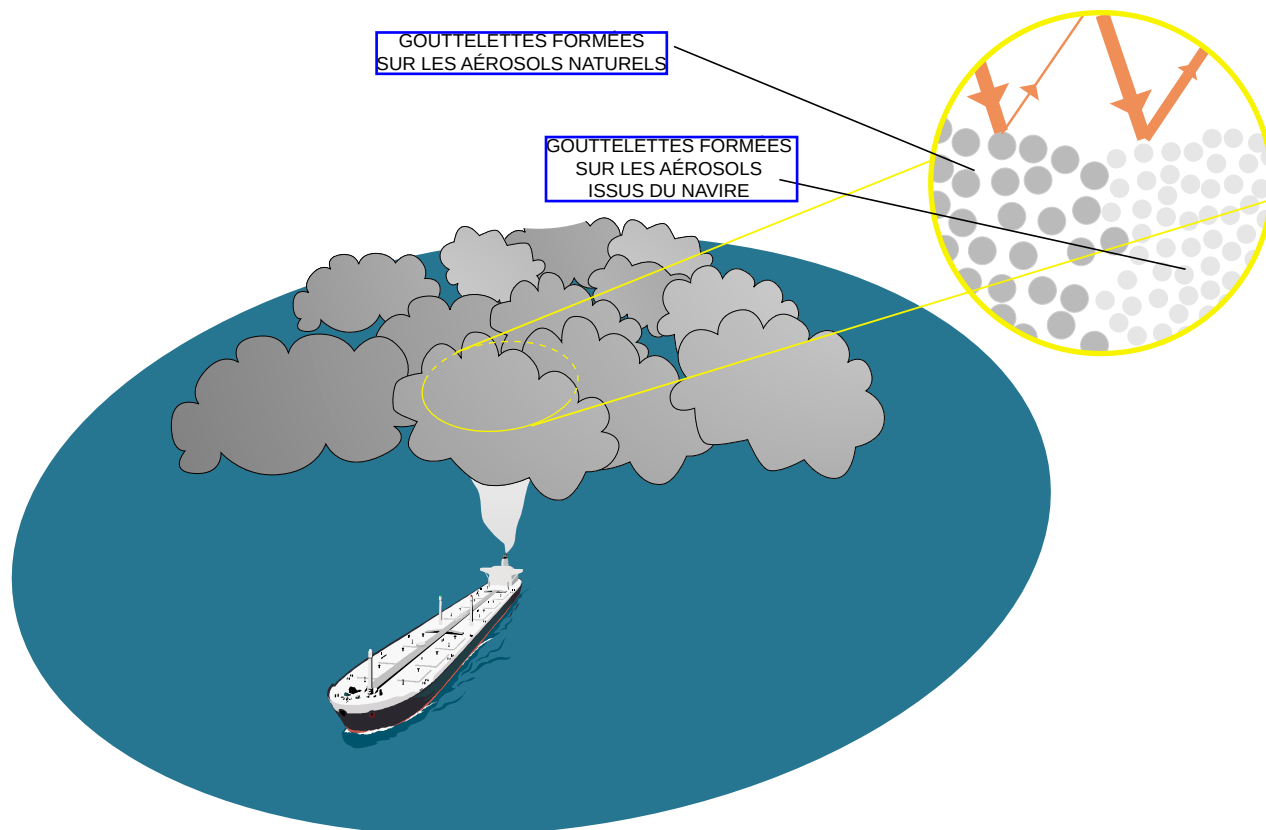
Aux longueurs d'onde du rayonnement visible (cartouche en haut à gauche, photographie à 0,63 micromètres), l'augmentation de la surface des gouttelettes augmente la diffusion du rayonnement solaire par le nuage : celui-ci est plus brillant. Ce phénomène est toutefois masqué par les variations de la brillance des nuages liées aux variations de leur épaisseur.

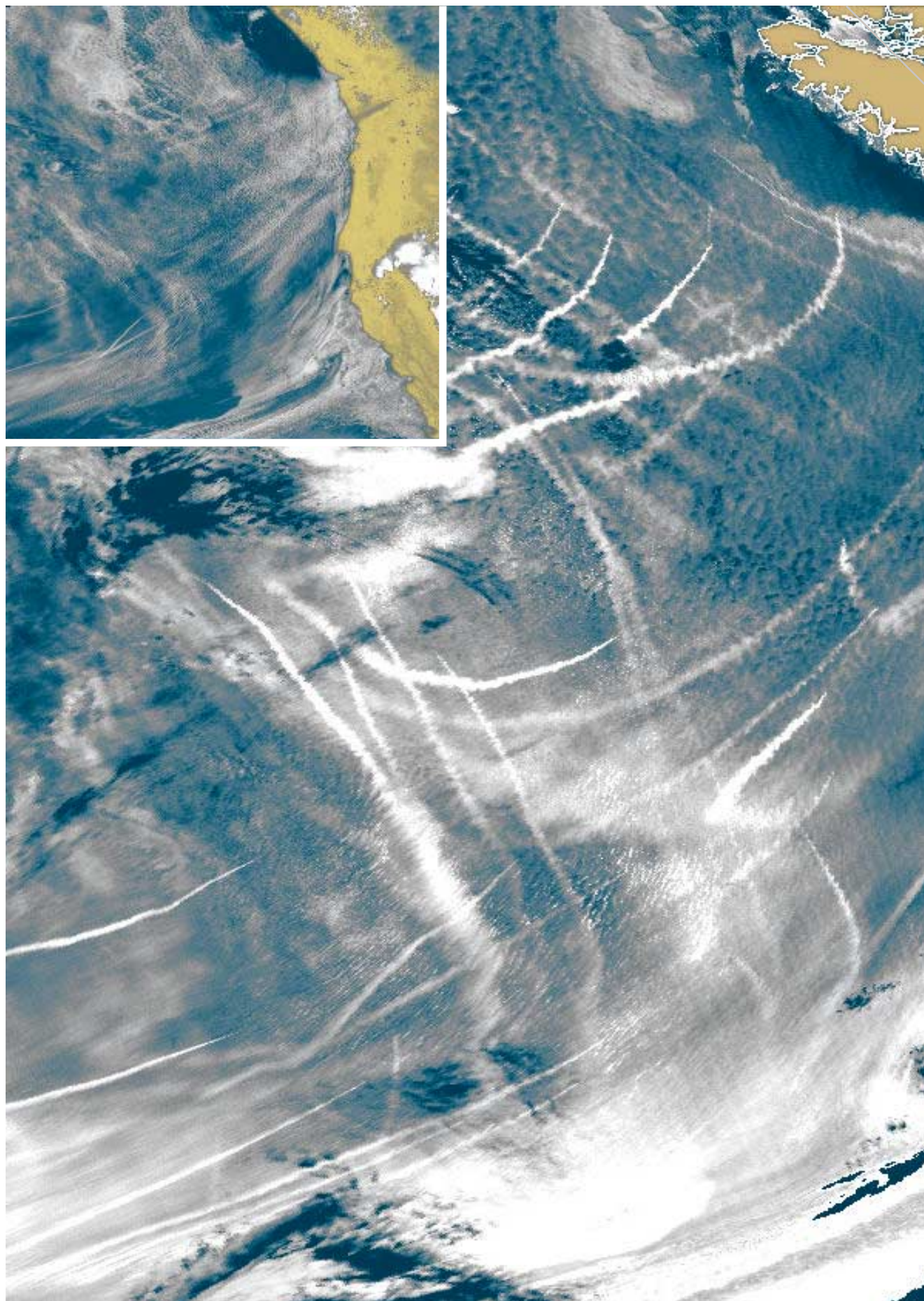
A la longueur d'onde de 3,7 micromètres, le rayonnement est fortement absorbé par l'eau. Lorsque la taille des gouttelettes diminue et que leur nombre augmente, à quantité d'eau constante, l'absorption totale augmente, mais moins vite que la diffusion : le contraste avec les régions environ-

nantes est donc plus marqué qu'à la longueur d'onde de 0,63 micromètre, et les traînées de navires sont bien plus visibles en infrarouge.

L'observation de ces traînées de navires, corroborée par des mesures *in situ*, nous fait soupçonner un effet similaire mais à plus grande échelle, lié aux aérosols d'origine industrielle (sulfates et aérosols carbonés) : l'augmentation de la réflexion du rayonnement solaire par les nuages bas des continents et des océans adjacents. Ce phénomène tendrait à refroidir le système climatique. Suffirait-il à compenser l'augmentation artificielle de l'effet de serre, liée à l'émission de gaz tels que le dioxyde de carbone ou le méthane par les activités humaines? Probablement pas, car les gaz à effet de serre résident plusieurs dizaines d'années dans l'atmosphère, tandis que les aérosols en disparaissent en une dizaine de jours. Les premiers «s'accumulent» dans l'atmosphère, tandis que la concentration en aérosols industriels reste à peu près proportionnelle aux flux émis.

Olivier BOUCHER,
Lab. d'optique atmosphérique,
Université de Lille I





© 1998 NASA. All rights reserved. Reproduction of this image is prohibited without the written permission of NASA.

Religion

La Bible : le code secret

Michael Drosnin. Éditions Robert Laffont, 1997.

Le mathématicien Émile Borel a démontré un théorème remarquable : en prenant au hasard une suite infinie de symboles typographiques, vous y trouverez tous les textes possibles et imaginables. Vous y trouverez donc le livre de Michael Drosnin. C'est bien dommage, car le livre en question est fondé sur une escroquerie à trois étages (la superposition de trois escroqueries est sa seule originalité).

Commençons par la plus évidente, qui se fonde sur un fait élémentaire que le théorème de Borel exprime dans toute sa pureté mathématique : en prenant un grand nombre de combinaisons de lettres, on trouve des mots connus et même des rapprochements de mots connus où, sans se forcer beaucoup, on réussit à voir le présent et le passé (ce qui permet alors de prétendre y lire l'avenir).

Techniquement – c'est un bien grand mot ici –, la méthode de M. Drosnin est de prendre le texte de la Bible et d'envisager les combinaisons de lettres qu'on peut extraire en partant d'une lettre, puis en sautant 20 lettres plus loin, puis 20 lettres plus loin, etc. Bien sûr, à la place de 20, vous pouvez essayer 19, 3, 249 ou n'importe quel autre nombre ; le choix est grand.

Sur un texte de 1 000 lettres, vous pouvez ainsi extraire plusieurs millions de mots par cette méthode des *equidistant letter sequence* (ELS). C'est le diable si vous n'en trouvez pas un qui vous évoque votre grand-tante ou les poils de 14-18. À ce jeu, on ne perd jamais. Des expériences ont été menées à partir d'autres textes que celui de la Bible. Le procédé est remarquablement efficace : on a découvert une annonce de la mort de la princesse Diana dans *Moby Dick* et toutes sortes de choses vraies et fausses dans toutes sortes de livres.

Le second étage de l'escroquerie est un peu plus intéressant. Pour justifier sa méthode des ELS pris n'importe où et n'importe comment, l'auteur prétend s'appuyer sur un article mathématique publié en 1994 par les mathématiciens Doron Witztum, Eliahu Rips et Yoav Rosenberg dans la revue spécialisée *Statistical Science*. Les édi-

teurs français de M. Drosnin reproduisent l'article mathématique (sans le traduire : pourquoi donc ?).

Les revues mathématiques confient les articles qu'on leur propose à des experts, pris parmi des spécialistes des domaines concernés, qui restent le plus souvent anonymes et qui décident de la publication ou non de l'article, suggérant parfois des corrections ou des améliorations : une objectivité et une indépendance de jugement sont ainsi assurées. Donc la méthode de M. Drosnin est scientifiquement validée par les plus hautes autorités mathématiques.

En fait, il n'en est rien, car l'article de la revue *Statistical Science* ne fonde absolument pas les tripatouillages arbitraires de M. Drosnin : l'article étudie un problème très particulier d'ELS dans la Bible, par une méthode assez complexe, mais parfaitement fixée, et propose une formule d'évaluation des résultats. Il s'agit de savoir s'il y a une corrélation anormale entre l'apparition dans des ELS des noms des personnages importants de l'histoire du judaïsme et leurs dates de naissance ou de mort.

La méthode de mesure de la corrélation, qui est une partie importante de l'article, conduit à un résultat qui, semble-t-il, s'écarte nettement de ce que donnerait une suite de lettres ordinaires. La Bible serait donc statistiquement porteuse d'informations sur l'histoire du judaïsme, ce qui est remarquable. Toutefois, l'article scientifique ne parle pas de Kennedy et d'Oswald, ni de l'assassinat de Yitzhak Rabin, ni de bombe atomique, comme le livre de M. Drosnin, dont je vous ai dit qu'il lit le passé et l'avenir dans les ELS. La méthode de M. Drosnin n'est en rien justifiée par le calcul de corrélation de l'article scientifique. Le couplage des deux textes n'est donc qu'un artifice publicitaire.

Reste que si vraiment les résultats de l'article scientifique sont confirmés, c'est une remarquable et troublante découverte qui a été faite.

Nous arrivons au troisième étage de l'escroquerie. Ce qu'on découvre d'ailleurs est, je crois, une sorte d'affaire Sokal scientifique. Il est facile, pour un scientifique, de se moquer des sociologues en leur tendant un piège, mais l'histoire des sciences donne aussi à rire, en mathématiques particulièrement. Malgré le système des experts, les articles faux ne manquent pas. Ne citons qu'un exemple : en 1889, le grand mathématicien Henri Poincaré obtint un prix pour un article gravement erroné qu'il dut réécrire en en doublant la longueur, tant il eut du mal à corriger les

insuffisances de la première version, pourtant primée. Dans le cas de l'article de *Statistical Science*, la question de l'exactitude du contenu se pose. Il se trouve que le mathématicien Brendan McKay, de l'Université de Canberra, y a répondu clairement.

Il a repris soigneusement les tests de l'article scientifique (en utilisant les mêmes programmes que les trois auteurs) et en s'accordant très précisément les mêmes libertés que celles que ces auteurs s'étaient données pour choisir les noms des personnages importants de l'histoire du judaïsme et leur orthographe. Cependant, à la place de la Bible, il a utilisé la traduction en hébreu de *Guerre et Paix*, de Léon Tolstoï.

Alors qu'il n'aurait rien dû trouver, il a cependant calculé, lui aussi, un coefficient de corrélation étonnant entre les noms et les dates, prouvant ainsi que les méthodes de constitution des données ou celles du calcul des corrélations de l'article des trois mathématiciens étaient fautives.

L'article scientifique qui sert abusivement de base au livre de M. Drosnin aurait donc dû être refusé si l'expertise avait été menée à fond. Y a-t-il eu tricherie délibérée de la part des auteurs de l'article scientifique ? Pourquoi le système d'expertise du journal a-t-il été défaillant ? Je n'en sais rien, mais ce que je sais, c'est que, si vous tombez par hasard sur le livre de M. Drosnin avec votre générateur aléatoire de textes, il sera sage de le relancer aussitôt.

Jean-Paul DELAHAYE

Histoire des sciences

Jean Perrin, savant et homme politique

Micheline Charpentier-Morize. Éditions Belin, 1977.

Ce livre ne laissera pas indifférents ceux qu'intéresse l'histoire de la science française dans la première moitié du xx^e siècle. Faire la biographie de Jean Perrin, l'homme qui « a compté les atomes », était un excellent projet, qui vient combler un vide regrettable dans la littérature d'expression française.

La biographie que nous avons maintenant est, pour une bonne partie, une excellente présentation du rôle scientifique, social et politique de l'homme engagé dans son siècle (de l'affaire Dreyfus au Front populaire), du physico-chimiste éminent et du grand organisateur de la recherche scientifique en France (CNRS et Palais de la découverte) qu'a été Perrin.

Micheline Charpentier-Morize, chimiste spécialiste des mécanismes de réactions, explique dans son avant-propos qu'elle a décidé d'écrire cette biographie du prix Nobel de physique 1926 quand elle a eu le sentiment que Perrin avait freiné le développement de la chimie française en refusant les théories modernes : chimie électronique et mécanique quantique appliquée à la chimie. Je tiens à contester ce point de vue, et surtout la manière dont il a été établi.

On trouve l'essentiel de l'argumentation sur le rôle délétère qu'aurait eu Perrin sur la chimie française dans les pages 79 à 144 du livre. Nous pourrions les parcourir, afin d'examiner successivement les nombreuses affirmations que je tiens pour discutables et qui ne me convainquent pas de la pertinence de l'analyse proposée. Ce serait une méthode lassante. Je me contenterai donc d'un petit échantillon d'exemples.

Je lis notamment : «Perrin marque son hostilité à la mécanique quantique.» Pourtant, dans une conférence à l'École normale supérieure, en 1930, sur l'état de la chimie physique, Perrin salue «une école de jeunes qui s'efforce de créer d'autres concepts pour un ordre nouveau ; ce sont les de Broglie, les Schrödinger, les Heisenberg, les Dirac». Ce texte, d'ailleurs cité par l'auteur, manifeste-t-il beaucoup d'hostilité ?

Puis l'auteur expose la théorie radiative (parfois nommée théorie radiochimique) de Perrin, qui avait considéré en 1919 que toute réaction chimique était provoquée par une radiation lumineuse. Cette théorie fut vite discutée et abandonnée, sauf par Perrin, qui s'obstina à la soutenir. C'est incontestable, mais peut-on, à cette occasion, affirmer que Perrin refusa «les premiers concepts de la chimie électronique, puis les applications de la mécanique quantique aux problèmes chimiques, et son obstination dans ce domaine est



Jean Perrin (1870-1942).

sans aucun doute l'un des facteurs responsables du retard de la chimie pendant des décennies» ? On attend une démonstration d'une opposition si néfaste ; on ne la trouve ni ici ni dans la suite du texte, où reviennent à ce sujet les mêmes incantations, qui n'emportent pas l'adhésion.

De même, on lit que «Jean Perrin ne sera jamais contredit dans son pays». Or, à partir de ma seule documentation personnelle, j'ai trouvé quatre scientifiques qui, du vivant de Perrin, ont très librement critiqué la théorie radiochimique dans des publications parues en France. Par exemple, M. Haissinski écrit, dans *L'atomistique moderne et la chimie* : «On comprend aisément le coup décisif que ces faits apportent à l'hypothèse radiochimique : si de vraies réactions monomoléculaires n'existent pas, il est tout à fait inutile de créer des théories pour elles.» Et A. Berthoud, dans *Photochimie* : «Il est donc bien difficile de concilier les faits expérimentaux avec l'hypothèse radiochimique».

Ces deux ouvrages ont été publiés en 1926 et 1932, à Paris, chez Doin... dans la collection Langevin-Perrin-Urbain : est-ce la preuve d'une opposition agressive de Perrin ? De même, quand paraît en

1925 la traduction française des *Principes de chimie physique*, de E. Whasburn, c'est Perrin qui écrit la préface, alors que le texte du livre signale les attaques contre la théorie radiative. Enfin, M. Letort, que M. Charpentier-Morize présente comme «un jeune physico-chimiste proche de Perrin», écrit en 1937 dans *Les conceptions actuelles du mécanisme des réactions chimiques* : «En cherchant à répondre à ces critiques, l'hypothèse de la radiation a perdu sa généralité, et il semble qu'à l'heure actuelle on s'en soit généralement détourné au profit de la théorie de l'activation par collisions.»

Les passages consacrés à la «grande polémique entre énergétistes et électro-nistes» sont également caractéristiques de l'esprit de dramatisation gratuite qui anime l'auteur dans une bonne partie du livre. Dans l'analyse qui est faite des quatre premiers Conseils Solvay de chimie, les sous-titres font état de «premières escarmouches» en 1922, de «sérieuses divergences» en 1925, de «rupture décisive»

en 1928, et, enfin, de «l'abandon de l'étude de la réactivité en France» en 1931. Le lecteur en retire l'idée de polémiques crispées entre clans rivaux, alors que la lecture des actes de ces Conseils et l'étude faite en 1989 pour les trois premiers d'entre eux, par l'historienne de la chimie M.-J. Nye, montre bien que l'on est en présence de deux écoles qui discutent normalement des aspects nouveaux de la dynamique et de la réactivité chimiques. L'absence de cette référence à M. -J. Nye dans le livre est regrettable.

On pourrait, de même, discuter la façon dont nous sont présentés : l'émergence des mécanismes réactionnels électroniques ; les relations initiales entre spécialistes de ces mécanismes et physiciens quantiques ; le rôle des mécanismes réactionnels dans le développement de la chimie ; ou encore les conceptions de quelques chimistes importants, tels Dupont, Moureu ou Tiffeneau... mais il faut conclure.

Perrin a-t-il eu le rôle pernicieux qui nous est présenté sur le développement de la chimie en France ? Je ne le sais, mais je suis convaincu que la démonstration reste à faire.

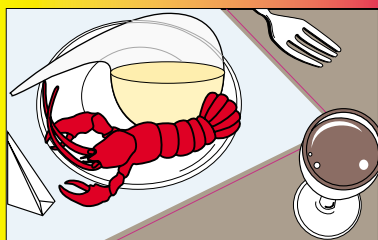
Georges BRAM

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 février 1998.

FRANCE

info

Agronomie

Le jardin du futur

Philippe Ledieu et Michel Vilain.
Éditions d'art Somogy, 1997.

Les biotechnologies sont désormais dans une phase de rapide développement. Leurs avancées fascinent et effraient. Le transfert de gènes étrangers dans les organismes vivants est la technique qui inquiète le plus. Les auteurs de ce livre ont tenté de décrire, en termes simples et à l'aide d'illustrations, les principales étapes de cette formidable aventure qui commence. Ils traitent essentiellement des applications dans le domaine végétal.

Les auteurs ont choisi de décrire d'abord les plantes, de leurs fonctions biologiques à la molécule d'ADN, support de l'information génétique. Ils relatent ensuite comment les plantes ont été domestiquées et sont améliorées par la sélection, par la reproduction *in vitro* et, plus récemment, par le transfert de gènes. Un chapitre concerne les transformations que subissent les produits issus des plantes, avant de devenir une nourriture ou une source de molécules pour les industries chimique et pharmaceutique. Le dernier chapitre envisage le futur.

Cette organisation du livre a sa logique, mais n'aurait-il pas été plus simple de suivre la progression historique et de montrer que les communautés humaines ont maîtrisé en premier lieu l'agriculture, empiriquement, puis, beaucoup plus méthodiquement, la sélection, la reproduction *in vitro* et, finalement, la sélection par le transfert de gènes ? La continuité et les ruptures seraient peut-être apparues plus facilement, dans leur perspective naturelle.

La première partie est un exercice difficile, et elle souffre de quelques défauts. Tenter d'expliquer en peu de mots ce que sont les gènes et les protéines, ainsi que le génie génétique, n'est jamais simple. Une continuité entre cette description et les principes du génie génétique décrits au chapitre 3 aurait sans doute permis de gagner en clarté. Les auteurs auraient peut-être dû agrémenter leur texte d'un nombre supérieur de schémas. À cet égard, les photographies des pages 67 et 71 sont bien inutiles : la première décrit une technique de préparation de plasmides de moins en moins utilisée, et la manière dont elle est présentée évoque quelque opération magique, alors qu'il s'agit

d'une technique banale ; la seconde n'apporte rien.

La description des mécanismes de l'expression génétique doit apparaître parfois ardue pour le profane. Il n'est pas certain qu'après cette lecture, celui-ci ait une idée complètement claire des mécanismes essentiels de la vie. Les auteurs sont manifestement plus à l'aise pour décrire les plantes, leur sélection, leur reproduction et leur utilisation que pour expliquer les mécanismes génétiques et le génie génétique. En ce qui concerne les gènes, ils en disent trop ou trop peu. Quelques formules malheureuses nuisent à la clarté du propos, et le point de vue est parfois trop anthropocentrique. Par exemple, il est admis que la vie est apparue sur la Terre il y a quatre milliards d'années. Nul ne sait si elle vient d'ailleurs. La description de son émergence à partir des éléments minéraux et organiques terrestres devrait être présentée tout au plus comme une hypothèse. L'environnement était peu « amène », nous dit-on, avant l'arrivée de l'oxygène. Pour nous, certes, mais pas pour les organismes qui vivaient à cette étape de l'histoire de la Terre. Dans cette partie, les auteurs ont trop centré leur argumentation sur les plantes. L'ensemble des mécanismes qui gouvernent tous les êtres vivants sont les mêmes pour l'essentiel. Il est donc dommage que les auteurs n'aient pas davantage cherché à replacer toute cette partie dans la perspective, toujours utile en biologie, de l'évolution. Les lecteurs auraient alors eu une idée plus juste de ce que sont les êtres vivants et les plantes.

Puis je relève quelques erreurs, parce qu'on les retrouve souvent dans les ouvrages de vulgarisation. Les sites de restriction ne sont pas toujours des palindromes, et, de toute façon, ce détail n'intéresse que très peu de lecteurs. La totipotence des végétaux n'est pas une merveille : c'est un fait. La reproduction non sexuée des plantes est un phénomène naturel avant d'être une pratique de jardinier. Les erreurs de transcription ne sont pas clairement expliquées : existent-elles ? Comment les grains de pollen et les ovules produisent-ils des gamètes ? Le lactosérum n'est pas une protéine, mais une solution de protéines. La dissémination des organismes génétiquement modifiés (OGM) ne pose aucun problème éthique particulier ; elle concerne la biosécurité, pas la bioéthique. Pourquoi s'offusque-t-on que les entreprises ne soient pas philanthropiques ? Ce n'est pas leur rôle. Pourquoi s'offusque-t-on qu'une entreprise cherche à produire des plantes transgéniques résistant à

un herbicide que cette même entreprise produit ? L'entreprise en question a tout simplement une stratégie industrielle intelligente. Si l'on craint un monopole, il faut faire jouer la concurrence. Si la plante pose des problèmes de biosécurité, il faut les traiter comme tels.

La dernière partie du livre est le résumé d'un programme d'une exposition sur les plantes à la Cité des sciences de la Villette. Il est surprenant de découvrir cette partie, qui paraît bien anecdotique, en comparaison du reste du livre, même si cette exposition est plus ou moins permanente.

Malgré ces imperfections, ce livre est riche d'informations et joliment illustré. Le dernier chapitre donne une excellente idée des défis et enjeux des biotechnologies végétales. Le propos en est clair et mesuré : cet ouvrage peut donc être proposé à tous ceux qui souhaitent partager le rêve et l'aventure des chercheurs et des industriels, ou qui veulent participer démocratiquement aux débats et aux choix que la société doit maintenant faire dans ce domaine.

Louis-Marie HOUDEBINE

Archéologie

Qoumrân et les manuscrits de la mer Morte. Un cinquantenaire

Ouvrage collectif sous la direction d'Ernest-Marie Laperrousaz.
Éditions du Cerf, 1997.

En mars 1952, la falaise dominant le site archéologique de Qoumrân, sur la rive occidentale de la mer Morte, à une douzaine de kilomètres au Sud de Jéricho, fut explorée par une équipe conduite par le père Roland de Vaux. Celui-ci, directeur de l'École biblique des pères dominicains et de l'École archéologique française de Jérusalem, dirigeait alors, pour le compte du département des Antiquités de Jordanie, la fouille de Qoumrân, site identifié avec les vestiges de l'établissement essénien décrit par les auteurs anciens, tel le Romain Pline l'Ancien. Les Esséniens occupèrent Qoumrân des environs de l'an 100 avant notre ère à l'an 68 de notre ère.

Cette falaise fut alors explorée sur une longueur de huit kilomètres, du Nord au Sud, de part et d'autre de Qoum-

rân ; 275 anfractuosités furent fouillées. L'une d'entre elles contenait de la céramique, ainsi que des centaines de débris comprenant 274 fragments (dont 103 portant des traces d'écriture, mais seulement 90 étaient utilisables) d'une trentaine de rouleaux de peau presque entièrement détruits par les rats, les vers et l'humidité due aux pluies hivernales. Mais ce qu'elle contenait de plus curieux était en cuivre : dans la partie antérieure de la grotte – dont le plafond d'entrée était effondré –, hors du recoin où se trouvaient les restes de rouleaux de peau, gisaient deux rouleaux de cuivre (qui, initialement, n'en constituaient qu'un seul) portant un texte gravé en caractères hébreux carrés, apparaissant partiellement en relief.

Découpé, d'abord, en 23 bandes à l'Université de Manchester, en 1955-1956, le rouleau de Qoumrân a été traité, selon les techniques les plus modernes, au Laboratoire de l'EDF de Saint-Denis, puis remis le 11 mars 1997, dans le cadre du musée du Louvre, à la reine de Jordanie. L'origine de ce rouleau est controversée : est-il essénien, comme les fragments de manuscrits ramassés dans la même grotte, ou son origine est-elle autre ? Et alors, quelle est-elle ?

Les éditeurs de ce document, J.-T. Milik et de Vaux, entre autres, ont relevé que, tant par son emplacement

dans la grotte que par le style, plus récent, de sa langue, il se différencie des manuscrits esséniens.

Or, la fouille des ruines de Qoumrân a conduit de Vaux à reconnaître une occupation du site par les maquisards de Bar-Kochba, le chef de la Seconde Révolte (ou Guerre) juive, entre 132 et 135 de notre ère. Ce sont ces mêmes insurgés juifs qui, selon Ernest-Marie Laperrousaz, auraient déposé ce rouleau dans cette grotte. Et ce document porterait gravée, toujours selon la même hypothèse, la liste des endroits où le « trésor » de l'État et du Temple aurait été caché, quand Bar-Kochba dut quitter l'Hérodiûm, près de Bethléem, dont il avait fait son quartier général et où il avait transporté son « trésor », si l'on en croit, notamment, des documents provenant de grottes situées dans le désert de Judée. Notons qu'une partie de ce trésor, dont le montant global est bien éloigné des sommes fantastiques évoquées dans certaines légendes ou certains contes orientaux, a pu être ainsi cachée dès le moment où Bar-Kochba, devant l'avance des troupes romaines, prépara son repli de Jérusalem sur l'Hérodiûm.

Cette histoire, ainsi que celle du site de Qoumrân et des manuscrits de la mer Morte, est présentée dans l'ouvrage collectif publié aux éditions du Cerf.

Léon LAMBERT

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-46-34-21-42
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Charles Baloché, Michel Brune, Philippe Cahuzac, Bettina Debù, Patrice Eydoux, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Claudine Lehman, Jean Le Lœuff, J. Montens, Claude Olivier, Guy Paulus, Jean-Michel Raimond, M. Schumacher, Claude de Torrès.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosenthal. Chairman and Chief Executive Officer : John Rosenthal. Corporate Officers : Robert Biewen, Frankfurt, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.
Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon.

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, ainsi qu'un encart publicitaire, jeté, de 4 pages, Forum Labo.

Astrophysique

Le Soleil en face

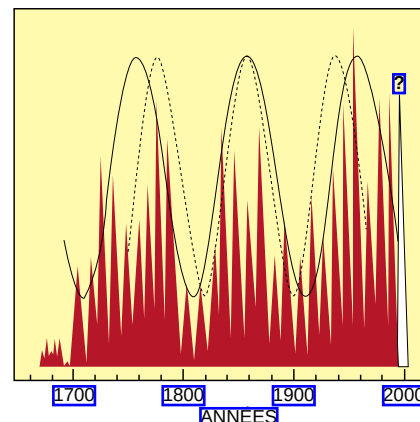
Pierre Lantos. Éditions Masson, 1997.

Après Aristote, l'Univers fut partagé en deux mondes. D'une part, le monde sublunaire s'étendait de la Terre, immobile et centrale, jusqu'à l'orbite de la Lune ; c'était un monde vivant, périssable, changeant. D'autre part, au-delà de l'orbite lunaire, le monde supralunaire comprenait le Soleil, les planètes et les étoiles ; c'était un monde pur, immuable, incorruptible, baignant dans le cinquième élément nommé éther.

Après la mise au point de la lunette astronomique, peu après 1600, Galilée, Christoph Scheiner et David Fabricius observent des taches sombres sur le Soleil ; elles sont d'abord attribuées à de petits corps qui passeraient entre le Soleil et la Terre, mais Galilée est un des premiers à comprendre que ces taches sont réellement à la surface du Soleil. Il en déduit que l'astre tourne sur lui-même en près d'un mois, la période dépendant de la position des taches en latitude, car le Soleil se déforme au cours de sa rotation. Ces taches ont une durée de vie variable, de l'ordre de quelques jours.

Le Soleil ne serait donc ni pur ni immuable ! La surveillance effectuée par les astronomes ultérieurs confirmera cette idée. Au XIX^e siècle se développent les études physiques des astres et du Soleil, en particulier, étoile proche. Dès 1826, Heinrich Schwabe entreprend un recensement systématique du nombre de taches solaires visibles, ce qui le conduit en 1843 à y découvrir une périodicité, que Rudolf Wolf détermine égale à onze ans, en 1852.

D'où vient l'énergie du Soleil ? C'est seulement en 1938 que Hans Bethe propose un cycle de réactions thermonucléaires capables d'engendrer le rayonnement solaire par la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium. Vers la même époque, on renforce la surveillance du Soleil en raison des perturbations que provoque l'activité solaire sur la Terre ; l'étude, initialement limitée aux ondes visibles, est étendue à l'ensemble des ondes électromagnétiques. L'existence d'oscillations de la photosphère à courte période (cinq minutes), décelée dès 1960, est confirmée, et la découverte d'autres périodes d'oscillations, de quelques minutes à



Le cycle des taches solaires du XVII^e au XX^e siècles. On cherche à savoir s'il varie périodiquement avec une période de 80 ans (pointillés) ou de 100 ans (sinusoïde en trait plein).

plus de deux heures, donne naissance à l'héliosismologie.

Le Soleil est donc une étoile variable comme beaucoup d'autres. Cependant la physique qui y règne reste bien mystérieuse : pourquoi détecte-t-on deux fois moins de neutrinos que ne le prévoient les théories actuelles ? Comment des courants magnétiques chauffent-ils la couronne ? Une meilleure connaissance des mécanismes qui engendrent ces phénomènes permettra de mieux prévoir les effets du Soleil sur le climat terrestre, sur l'orbite des satellites terrestres ou sur les orages géomagnétiques qui perturbent tant les télécommunications.

Une analyse statistique montre toutefois qu'il n'existe pas de corrélation notable entre les variations de l'activité solaire et le climat terrestre. Aujourd'hui le Soleil est surveillé en permanence par des satellites d'observation comme SOHO, lancé en 1995, en orbite autour du Soleil et placé sur la ligne Soleil-Terre.

Le livre de Pierre Lantos, spécialiste de la physique solaire à l'Observatoire de Meudon, présente l'état des connaissances actuelles. Un texte clair et abondant, illustré de nombreux schémas commentés, réussit à conduire le lecteur vers une compréhension qualitative de ces phénomènes complexes.

Michel TOULMONDE

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>