

LES NEUTRINOS • LES VACCINS GÉNÉTIQUES • LES PILES À COMBUSTIBLE



Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 1999

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

*Comment concilier
géométrie et chimie*

Canada \$ 5.95

Les quasi-cristaux



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6



JEU-CONCOURS

Promenade à bicyclette

par Pierre Tougne

7



POINT DE VUE

La précaution, jusqu'où?

par Philippe Hartemann

8

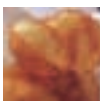


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

**Les épidémies
aux bagnes de Guyane**

par Stéphane Urbajtel

10



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Les pommes de terre soufflées

par Hervé This

14



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Les diamants de Guyane ■ La lutte contre
les maladies respiratoires ■ Réchauffement

et ralentissement ■ Je plie, et ne romps pas

■ Des jumelles antagonistes ■ Vaincre la dépendance

■ Vulcanisation précolombienne ■ Couleurs chaudes

■ Le photon dans la boîte ■ Un gâteau marbré

16

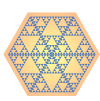


IDÉES DE PHYSIQUE

L'homme-oiseau

par Roland Lehoucq

96



VISIONS MATHÉMATIQUES

Le triangle omniprésent

par Ian Stewart

100

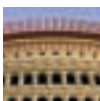


LOGIQUE ET CALCUL

**L'intelligence humaine
à nouveau dominée?**

par Jean-Paul Delahaye

102



L'IMAGE DU MOIS

Le vélum du Colisée

par Philippe Fleury

108



ANALYSES DE LIVRES

■ Un naturaliste à Paris en 1834, d'Alfred Moquin-Tandon

■ Le livre de la mer

110

■ Psychothérapies, de Tobie Nathan

■ La nutripévention, de Michel Massol

■ La nutrithérapie, de Michel Massol



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

www.pourlascience.com

Dossier

Les piles à combustible

36

**Le plein d'hydrogène,
s'il vous plaît**

38

par John Appleby

Des autobus et des voitures électriques propres sont propulsés grâce à des piles à combustible, alimentées par des carburants riches en hydrogène.

**Une centrale électrique
dans votre sous-sol**

44

par Alan Lloyd

Des piles à combustible équipent aujourd'hui des maisons, qui n'ont plus besoin d'être reliées au réseau électrique.

**Des piles à combustible
pour les portables**

48

par Christopher Dyer

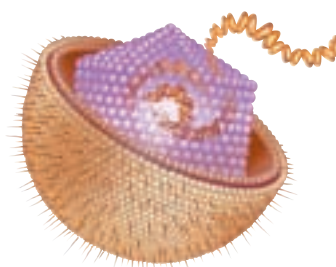
Des piles à combustible miniatures pourraient remplacer les accumulateurs électriques dans les téléphones cellulaires, dans les ordinateurs portables ou dans les caméscopes.

Vaccins génétiques

54

par David Weiner
et Ronald Kennedy

Les biologistes mettent au point des vaccins en assemblant des séquences génétiques. Ils espèrent ainsi lutter efficacement contre le SIDA, le paludisme et d'autres maladies qui résistent aux méthodes d'immunisation actuelles.



La détection des neutrinos massifs

par Edward Kearns,
Takaaki Kajita et Yoichi Totsuka

Sous le mont Ikenoyama, au Japon, un détecteur géant a montré que les neutrinos se métamorphosent lors de leur propagation.

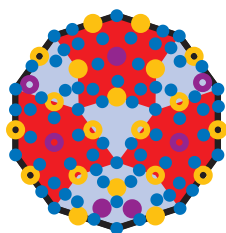


62

Nouvelles visions des quasi-cristaux

par Christoph Pöppe

La structure des quasi-cristaux est réalisable avec une infinité de motifs «supérieurs» soumis à certaines règles de superposition.



70

La guerre biologique contre les cultures

par Paul Rogers, Simon Whitby et Malcolm Dando

Les armées et les terroristes disposent d'une arme redoutable : les micro-organismes qui dévastent les cultures vivrières.



74

La cartographie de l'Univers

par Stephen Landy

Grâce à des techniques issues de l'analyse musicale, les astronomes étudient comment les galaxies s'agrègent.



80

La détection des phéromones

par Didier Trotier et Kjell Døving

Avec leur organe voméronasal, les mammifères analysent les substances biologiques émises par leurs congénères.



88

Mathématiques et philosophie

Les philosophes grecs et latins, et les théologiens du Moyen Âge ont posé les bonnes questions sur l'infiniment petit, sur les périls de l'introspection (l'injonction «Connais-toi toi-même» scintille comme un Graal inaccessible), sur la réalité des choses désignées par des noms, sur la finitude de l'Univers. Les mathématiciens ont apporté certaines réponses, distinguant une infinité de types d'infinis, raffinant sur les processus de limite et de mesure des choses, enrichissant, avec la théorie des ensembles, la longue querelle entre les nominalistes et les réalistes.

Les deux disciplines se complètent, le mathématicien apportant ses structures et ses lois parallèlement à la recherche des causes, chère au philosophe.

Les mathématiques avancent à petits pas sur le terrain de la connaissance humaine, nous apprenant à distinguer, par exemple, le hasard de son imitation humaine imparfaite : si la technique optimale pour un jeu ou une activité humaine est de jouer de façon aléatoire, le programme conçu pour dépister les structures mentales inconscientes battra l'homme après un certain nombre de parties. Les programmes nous aident à nous connaître nous-mêmes, et à mieux jouer à *Pair ou impair*, en Bourse... ou à arrêter plus efficacement des pénalties (voir *L'homme dominé par la machine*, par Jean-Paul Delahaye, page 102).

Alors, ne serait-il pas injuste d'évincer les mathématiques d'un enseignement culturel pour y trop magnifier la philosophie? Les docteurs *in libris* ont été moqués par Galilée : la vérité ne ressort pas toujours de l'exégèse des auteurs anciens, et Aristote se ferait coller au bac pour de piètres présentations en physique et en mathématiques.

Aussi, si nous avons le choix entre l'étude des mathématiques et de la philosophie, n'hésitons pas, prenons les deux...

Philippe BOULANGER

Écolinguistiquement correct

Bien manié, le jeu du «Ne dites pas... mais dites...» révèle l'état d'une société. Dans son livre *Écolinguistiquement correct ou protection contre nature* ? Jean-Claude Génot montre à quel point nous avons bureaucratisé la nature. Citons quelques exemples.

Ne dites pas «nature» : les petites fleurs et les jolis oiseaux évoqués par ce mot ne font pas sérieux à côté d'Internet, du CAC 40 et du téléphone portable. Dites «environnement». Ce mot vague et passe-partout, donc consensuel, est un joker qu'il est bon de garder en réserve pour une fin de discours.

Ne dites pas «protection de la nature», dites «gestion». Protection est ringard. Gestion est un mot de responsable ; il souligne que la nature est incapable de se débrouiller seule, sans l'homme. Pour la même raison, ne dites pas «préserver les milieux naturels», mais les «valoriser».

Ne dites pas «faune et flore». Cette expression, tout juste bonne pour les cours de sciences naturelles du temps jadis, aucun technocrate n'oserait plus l'employer dans un rapport. Utilisez le mot savant, tout droit sorti des universités : «biodiversité».

Sachez pratiquer l'euphémisme. Au lieu de dire «destruction des milieux naturels»,

parlez de «fragmentation de l'habitat». Les «prédateurs» se nommeront désormais «espèces à problème», formulation qui a l'avantage de condamner d'emblée, mais sans que ça se voie, les espèces ainsi désignées. Ne parlez pas de «pesticides», mais de «produits agropharmaceutiques» : les premiers tuent, ce qui n'est pas bien ; les seconds sont des médicaments pour les plantes, ce qui est bien.

En conclusion, cessez donc de dire que «l'homme détruit la nature». Dites plutôt : «la technologie maîtrise les ressources naturelles !»

Eurêka, dit la machine

Peut-on imaginer que, dans l'avenir, les ordinateurs vont devenir mathématiciens créatifs ? La plupart répondent non – je veux dire la plupart des mathématiciens, vu qu'on n'a pas demandé leur avis aux ordinateurs. L'Américain Doron Zeilberger, mathématicien de son état et grand spécialiste des preuves par ordinateur, pense que le jour viendra où les ordinateurs engendreront des théories mathématiques. Encore un Cassandre qui se complait à prophétiser un prochain chômage dramatique pour les mathématiciens ? Point. Doron Zeilberger déborde d'un opti-

misme réaliste et rafraîchissant, dont voici un aperçu. «Quand ils sauront engendrer des théories, les ordinateurs se suffiront à eux-mêmes, et feront toutes les maths "sérieuses". Mais cela ne signifie pas que les mathématiques seront complètement abandonnées par les hommes. Nous continuons de soulever des poids, de courir, de sauter, etc., quoique les machines soulèvent des poids beaucoup plus lourds, que les voitures aillent bien plus vite, et que les avions sautent bien plus haut. Les mathématiques humaines deviendront un sport, nous les pratiquerons en tant que loisir. En fait, ce sera un sport de compétition, dont les vedettes deviendront riches et célèbres. Cela n'est pas nécessairement une mauvaise chose. Voyez combien une vedette de base-ball gagne aujourd'hui, à côté de ce que gagne, disons, [le mathématicien] David Eisenbud.»

Moins optimiste que D. Zeilberger, je crains de voir les mathématiques gérées par des instances sportives. Les auteurs d'exploits inespérés seront-ils aussitôt suspectés de dopage, et leurs théorèmes tenus pour non démontrés si le contrôle se révèle positif ?

La fourmi est bonne orienteuse

C'est là son moindre défaut : elle possède un sens de l'orientation tellement extraordinaire et inexplicable qu'il intéresse les entomologistes et intrigue les experts en intelligence artificielle eux-mêmes. Le cerveau de la fourmi contient à peine quelques milliers de neurones. Or il lui suffit pour se retrouver dans des trajets complexes. La fourmi est donc sans doute siège d'un «mécanisme comportemental particulier, qui minimiserait la charge de mémoire nécessaire à son mode de navigation si enviable, à la fois fiable, robuste et efficace» (*Le Monde*, 3 juillet 1999).

Face à la fourmi, l'homme est humilié. Je suis bien placé, hélas, pour savoir qu'il existe des hommes dépourvus du sens de l'orientation. L'humiliant n'est pas d'être moins débrouillard qu'une fourmi, c'est de voir la fourmi élevée au noble rang de mystère scientifique méritant une étude approfondie. Alors qu'on n'a pas, que je sache, déterminé pourquoi il existe au sein de l'espèce l'humaine des spécimens exceptionnellement peu performants, qui sont perdus au bout de cinq minutes de trajet. C'est parce que je vaudrais moins qu'une fourmi que j'aimerais qu'on étudie mon cas.

À lire sous la douche...

Pour son recueil d'entretiens *La science : dieu ou diable* ? (Éditions Odile Jacob), Guitta Pessis-Pasternak a demandé une préface à Jean-Pierre Changeux. Chance : il a accepté. Le recueil est «passionnant», écrit-il ; G. Pessis-Pasternak a interrogé les «plus éminents chercheurs français et internationaux», ceux dont les travaux sont «essentiels pour la pensée contemporaine». Soupçonnerons-nous J.-P. Changeux de débiter sans y croire le dithyrambe attendu dans une préface dont la fonction est de faire vendre ? Certes pas. Ce qu'il écrit, il le pense sûrement : il fait partie des personnalités interrogées auxquelles il tresse des lauriers ! Il est même le seul à être interrogé deux fois dans la suite du livre. On peut se faire une spécialité de l'éthique sans pour autant éprouver de scrupule à se passer à soi-même la brosse à reluire.

N'ayant pas été interrogé par G. Pessis-Pasternak, je suis aussi peu qualifié pour dire du mal de son recueil, que J.-P. Changeux pour en dire du bien. Donc, ne nous privons pas. Première critique : le sujet, intéressant mais difficile, annoncé par le titre est à peine effleuré. Pareille défaillance était inévitable, vu que – seconde critique – G. Pessis-Pasternak a questionné 27 auteurs, offrant à chacun 6 ou 7 pages seulement pour s'exprimer, donc pour redire trop vite ce qui a déjà été dit ailleurs. La troisième critique se bornera à reproduire un échantillon de la pensée d'un des auteurs : «Ramener des "qualités" de la nature à des "lois" de la physique, n'est-ce pas un tantinet macho ? [...] Le jour où les scientifiques cesseront de véhiculer cette idée que l'Univers est soumis à des "lois" sera un jour triomphal pour la cause féministe ! [...] La nouvelle science est celle qui [...] cessera de nous anéantir dans l'infini, autre concept bien masculin.» Ces propos au féminisme outré sont tenus par Christian Magnan. Un homme, donc. Rien d'étonnant à cela : des 27 grands hommes rencontrés par G. Pessis-Pasternak, pas un seul n'est une femme.

Problème d'instant

Les mathématiciens sont attentifs au sens des mots. La différence des nombres de mathématiciens rapportée par Didier Nordon (*Décomptes mathématiques, Bloc-Notes, Pour la Science*, juillet 1999) est donc parfaitement explicable. Jean-Pierre Kahane, qui écrit «en 1999», fait état de 100 000 mathématiciens en activité dans l'année. Jean-Pierre Bourguignon, quant à lui, écrit «aujourd'hui» : il ne compte que les 50 000 mathématiciens qui, ce jour-là, ne sont pas en congés.

Jean-Louis BERNOU, Fresnes

Pluie nécessaire

Les difficultés de mise au point des techniques de pluie provoquée expliquent les réticences de certains scientifiques à s'y intéresser, mais le choix d'aider ou non, dans les prochaines décennies, *Les faiseurs de pluie* (voir *Pour la Science*, août 1999) a des enjeux considérables. Des régions telles que le Maghreb, le Moyen-Orient ou le Sahel sont les plus menacées par les pénuries d'eau, prévisibles d'ici une ou deux décennies, en raison de l'accroissement démographique, des effets de la désertification et de l'accentuation probable des grandes sécheresses, consécutive au réchauffement planétaire.

En particulier, l'alimentation en eau potable des villes à forte croissance deviendra une préoccupation prioritaire. Ainsi, la ville de Ouagadougou est passée de 60 000 à un million d'habitants entre 1961 et 1999. Au printemps 1998, devant la menace d'une pénurie d'eau exceptionnelle, ses responsables ont appelé à l'aide les services météorologiques du Maroc, un des rares pays africains à poursuivre depuis 1984 un programme de recherches sur la pluie provoquée. La pluie est finalement tombée, mais, avec l'augmentation rapide des populations urbaines, de telles situations se reproduiront, là comme ailleurs (voir *Sécheresse*, septembre 1999).

Les villes côtières pourraient recourir au dessalement (coûteux) de l'eau de mer. Pour les autres, ne pourrait-on envisager de combiner la pluie provoquée, pratiquée pendant la période de formation des nuages convectifs, et la recharge artificielle des aquifères peu profonds, pour mettre cette eau supplémentaire à l'abri d'une intense évaporation ? L'article de *Pour la Science* traduit bien la prudence d'un grand nombre de physiciens de l'atmosphère à propos des essais entrepris depuis une trentaine d'an-

nées en régions tempérées à l'aide de produits cryogéniques. Outre des résultats parfois catastrophiques (grêle, inondations), ces expériences ont été assez décevantes au regard des faibles accroissements de pluviosité obtenus au bout de 10 ou 15 ans. Pourtant, depuis quelques années, l'utilisation de cristaux de sels hygroscopiques en régions tropicales sèches (Afrique du Sud et Mexique) suscite bien des espoirs, même si cette nouvelle méthode nécessite des recherches complémentaires.

Pierre ROGNON, Paris

Collision sur Vénus ?

Dans *Le climat variable de Vénus* (voir *Pour la Science*, mai 1999), Mark Bullock et David Grinspoon discutent de l'événement géologique qui a effacé tous les cratères d'impact météoritiques de plus de 800 millions d'années à la surface de Vénus : on ne connaît pas, sur Terre, de phénomène capable d'un tel remodelage de la surface planétaire. Pourquoi, toutefois, ne pas envisager l'impact d'une comète de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre ? Le résultat ne serait pas nécessairement un cratère géant, mais la croûte superficielle aurait été rompue, déclenchant du volcanisme. L'absence d'un anneau de débris autour de Vénus suffit-elle à récuser cette hypothèse ?

Michael PAINE, Camberra

Réponse de Mark Bullock et David Grinspoon

Cette hypothèse d'une collision avec une comète est intéressante. Les statistiques concernant ces objets célestes nous ont permis de calculer que la plus grosse comète qui aurait pu heurter Vénus, au cours du dernier milliard d'années, aurait eu un diamètre d'environ 40 kilomètres seulement. Elle aurait toutefois profondément brisé la lithosphère. La quantité d'eau contenue dans l'atmosphère de Vénus aurait été multipliée par 10 ou 100. Une comète de 40 kilomètres de diamètre n'aurait pas mis en orbite un anneau de débris, mais aurait effectivement pu déclencher du volcanisme, à l'origine des changements climatiques.

Trous noirs en laboratoire ?

Dans les années 1970, Stephen Hawking proposa que des trous noirs miniatures avaient existé dans les premiers instants après le Big Bang. Bien qu'ils aient disparu de la région de l'Uni-

vers où nous nous trouvons, de tels trous noirs miniatures pourraient être créés par la collision très énergétique d'un proton et d'un anti-proton. Si un trou noir était créé près d'une grande accumulation de masse et qu'il commençait à absorber de la masse avant d'exploser, il pourrait se stabiliser et continuer à grossir. Si cela arrivait sur Terre, le trou noir miniature serait tiré au centre de notre planète par la gravité, absorbant de la matière au passage et dévorant toute la planète en quelques minutes.

Mes calculs indiquent que le collisionneur de Brookhaven (voir *Un Big Bang miniature*, par Madhusree Mukerjee, *Pour la Science*, mai 1999) ne produira pas de collisions à des énergies suffisantes pour créer un tel trou noir. Mais je peux me tromper. La seule façon de connaître précisément le seuil d'énergie auquel un trou noir apparaîtrait est de construire un collisionneur et de faire l'expérience. Le collisionneur de Brookhaven est-il vraiment au-dessous de ce seuil ?

Walter WAGNER

Réponse de Frank Wilczek

Chaque fois qu'ils explorent de nouveaux phénomènes physiques ou chimiques, les chercheurs doivent s'interroger sur les conséquences de leurs expériences, même lorsque les risques semblent faibles : les conséquences d'une erreur pourraient être catastrophiques. Ainsi, au début du Projet Manhattan, qui mit au point la bombe atomique américaine, Enrico Fermi et les autres physiciens vérifièrent qu'une explosion nucléaire n'enflammerait pas l'atmosphère.

Dans le cas de l'accélérateur de Brookhaven, une mauvaise surprise est peu probable. D'abord, des collisions nucléaires à plus hautes énergies se produisent régulièrement près de nous, lorsque des rayons cosmiques atteignent l'atmosphère terrestre. Ensuite, la théorie de ces collisions a été validée par de nombreuses expériences à des énergies proches de celles qui seront explorées à Brookhaven : nous ne savons pas exactement ce qui se produira, mais nous distinguons les scénarios possibles et impossibles. La formation d'un trou noir miniature tombe sans équivoque dans la seconde catégorie.

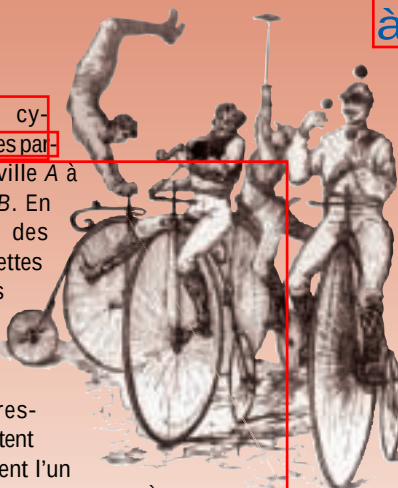
Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourlascience.com.

JEU-CONCOURS N° 63

PIERRE TOUGNE

Promenade à bicyclette

Deux cyclistes partent d'une ville A à une ville B. En route, une des deux bicyclettes se casse. Ils décident alors de partager la bicyclette restante. Ils partent simultanément l'un à bicyclette, l'autre à pied. À une certaine distance, le cycliste s'arrête, pose la bicyclette sur le bas côté et continue à pied. Son ami, momentanément marcheur, quand il atteint la bicyclette, la prend et roule



jusqu'à ce qu'il rattrape son partenaire qui prend la bicyclette et ainsi de suite.

À quelle distance de la ville B doit être laissée pour la dernière fois la bicyclette de telle façon que les deux amis arrivent en B en même temps? La distance de la panne de la bicyclette à la ville B est de 60 kilomètres et ils marchent à 5 kilomètres par heure et roulent à

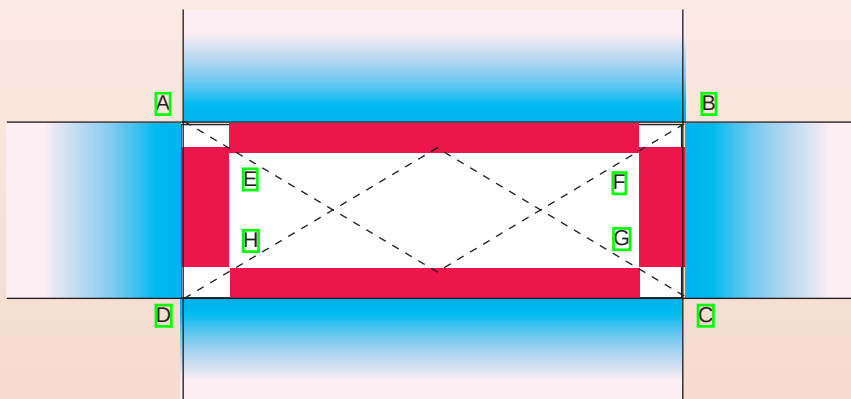
15 kilomètres par heure.

Envoyez vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de septembre 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 61

La figure ci-dessous montre une disposition de huit points non alignés trois par trois de telle sorte qu'aucune combinaison de cinq points ne forme un pentagone convexe. Si l'on ajoute un neuvième point dans les régions bleu, rouge ou blanche, on formera un pentagone convexe avec respectivement le rectangle ABCD, le rectangle EFGH et l'un des quatre trapèzes AEHD, AEFB, FBGC et GCDH. Ce contre-exemple montre qu'au moins neuf points sont nécessaires pour que l'on soit certain de former un pentagone convexe. L'origine de ce problème remonte à 1932 où quatre jeunes Hongrois Esther Klein, Györy Szekeres, Endre Makai et Paul Erdős (prononcez *erdesh*) se lançaient des défis mathématiques. Klein démontra qu'avec cinq points (trois points n'étant jamais alignés), il y a toujours un quadrilatère convexe. Peu après,

Makai démontra qu'avec neuf points, il existe toujours un pentagone convexe. Enfin Erdős et Szekeres à partir de ces deux résultats firent la conjecture que pour obtenir un polygone convexe de n côtés, il fallait $2^{n-2} + 1$ points. Szekeres a démontré qu'il existait nécessairement un polygone convexe à n côtés, mais pour un nombre de points gigantesque bien au-delà des $2^{n-2} + 1$ conjecturés. Quatre ans plus tard, Klein et Szekeres se marièrent, ce qui donna l'idée à Erdős de baptiser ce problème *The Happy End Problem*, nom qui est resté dans la littérature mathématique. Pour un hexagone convexe, Erdős avait montré que 71 points étaient nécessaires, 60 ans après Graham abaissa d'un point ce résultat et en 1997 Daniel Kleitman et Lior Pachter le réduisirent à 37 points. On est encore loin de la conjecture en 17 points de Erdős et Szekeres!



La précaution, jusqu'où?

PHILIPPE HARTEMANN

«Il est un degré, dans le vierge et le pur, qui par son excès peut faire peur».

Ce qu'écrivait André Pieyre de Mandiargues en 1909 s'applique en santé publique. Depuis diverses crises successives (sang contaminé, vache folle, pollution urbaine, amiante, dioxine), la gestion des risques sanitaires est devenue une des préoccupations majeures des gouvernements ; les dangers réels ou supposés de l'environnement et de l'alimentation suscitent des craintes amplifiées par des médias et souvent engendrent un activisme de la part d'associations de défense des consommateurs. Le citoyen doute et, selon son caractère fataliste ou inquiet, se demande s'il peut encore respirer, boire ou manger, faire confiance au monde

ment modifiés). La loi impose que les derniers arrivés fassent l'objet d'une évaluation minutieuse (et dont les résultats, s'ils sont favorables, ne seront pas admis par les plus craintifs), tandis que les produits de consommations habituels (voiture, tabac, alcools...) ne sont guère remis en cause, malgré les risques socialement inacceptables qu'ils font courir.

Il faut raison garder, car des protections excessives conduisent à des coûts exorbitants : pour certains usages, on limite parfois la présence de certaines molécules à des concentrations infimes, tandis que, dans d'autres domaines, le public est exposé à la même molécule à des concentrations bien supérieures,



par la consommation excessive de sulfates sont une accélération du transit digestif, pouvant éventuellement conduire à la diarrhée en cas de doses très fortes. La CMA des sulfates a été fixée avec une marge de sécurité considérable, qui garantit l'absence totale de survenue de cet inconvéient, même chez les plus sensibles, consommant le plus d'eau.

En revanche, certaines eaux conditionnées (eaux minérales naturelles), appréciées pour leurs «vertus thérapeutiques», ne ressortent pas de cette réglementation et peuvent contenir des concentrations considérables en divers ions, tels les sulfates : de quelques milligrammes à deux grammes par litre ! La consommation de ces eaux ne semble pas avoir provoqué de troubles importants, bien que certaines diarrhées de nourrissons puissent probablement s'expliquer par l'utilisation d'eau chargées en sulfates pour la préparation des biberons, par des mères mal informées.

L'incohérence culmine quand, en Lorraine, du fait de l'ennoyage des mines riches en soufre, la ressource en eau se charge de sulfates. Au-delà de la valeur fatidique de 250 milligrammes par litre, les préfets et les maires doivent déclarer l'eau non potable. Que fait alors la population, inquiétée par cette information ? Elle achète de l'eau en bouteille, sans faire généralement de différences entre les marques ni entre les types. Paradoxalement les habitants des zones touchées (ils sont plusieurs centaines de milliers) se gardent bien de boire l'eau de leur robinet, contenant 250 à 350 milligrammes par litre de sulfates, et consomment une eau qui en contient 300 à 1500 milligrammes par litre. De surcroît, cette eau embouteillée coûte plus cher au litre, sans compter le temps d'approvisionnement et les conséquences liées à l'élimination ou au recyclage des bouteilles.



industriel ou agricole, ainsi qu'aux autorités sanitaires.

Les condamnations de responsables ont imposé le principe de précaution, toute incertitude devant bénéficier aux personnes exposées ; il appartient désormais aux producteurs et aux vendeurs de prouver l'innocuité de leurs produits. Toutefois de nombreux produits ont été commercialisés bien avant que ne s'imposent les tests destinés à évaluer les effets néfastes sur la santé, et un fossé se creuse entre les produits existants et les produits nouveaux (par exemple, les organismes génétique-

sans que l'on observe d'ailleurs d'anomalies au sein de la population. En raison de la disparité des législations, cette situation ubuesque n'est pas aussi rare qu'on pourrait le penser.

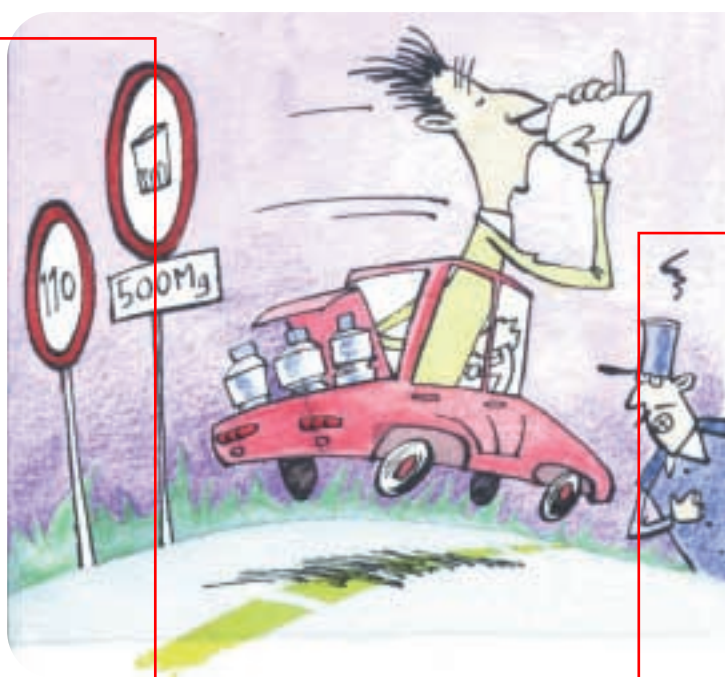
Considérons les sulfates présents dans les eaux, par exemple. En raison des modalités présidant à la fixation des normes de potabilité, la concentration maximale admissible (CMA), pour l'eau de distribution publique (l'«eau du robinet») est de 250 milligrammes par litre. Les seuls symptômes connus engendrés

Pourquoi cette situation ? Il existe tout

d'abord une confusion entre le danger et le risque. Le danger évoque le caractère potentiellement pathogène d'une substance ; le risque est lié à la probabilité de survenue d'un dommage créé par le potentiel dangereux de la substance. Il existe, entre les deux, une différence qui est liée à la nature de l'exposition : le risque de nuisance d'une substance dangereuse est nul si l'organisme n'est pas exposé à la substance. Certaines dioxines (le terme «dioxine» décrit, non pas une molécule, mais une famille de molécules aux effets bio-

logiques variés, selon les concentrations) sont certainement dangereuses pour la santé – à des doses qu'il convient de préciser –, mais la possibilité de pathologie due à ces molécules dépend des doses et des habitudes de vie de chacun : tout le monde ne mange pas deux œufs par jour ni 500 grammes de poulet par semaine, hypothèse retenue dans le scénario utilisé pour prendre des positions sanitaires, lors de la dernière crise belge.

Pour certains médias catastrophistes, le danger devient pathologie induite, et le citoyen a une perception complètement erronée du risque réel. Pourtant, dans nos pays, l'espérance de vie ne cesse de croître (environ un trimestre par an!), et la santé des populations est moins menacée qu'on l'entend dire. Des menaces existent, certes, mais la proportion de population exposée et, surtout, de la population atteinte par les pathologies induites sont faibles : la radioactivité est indubi-



tablement dangereuse, mais les précautions prises laissent un risque de pathologie induite de un sur un million de personnes exposées durant leur vie entière, tandis que la probabilité de décès par accident de la route est de l'ordre de un pour cent, et celui de cancer de un quart. Relativisons, ne cédon pas à des peurs irraisonnées, n'imposons pas des normes si sévères qu'elles paralyseraient le pays.

Dans le domaine de l'eau, comme dans d'autres, deux types de raisonnement conduisent à la fixation des concentrations maximales admissibles. Soit la molécule en cause a un effet déterministe (effet systémique, avec une relation dose-effet et un seuil) ; des études avec des animaux fournissent une dose sans effet nocif observé ou une dose minimale induisant un effet nocif observé. À partir de ces valeurs, on fixe une CMA en utilisant des facteurs de sécurité successifs de un à dix pour extrapoler de l'animal à l'homme, pour tenir compte des susceptibilités particulières de l'espèce humaine et, souvent, pour tenir compte de la gravité de certains effets ou de l'insuffisance des données. On aboutit ainsi à des doses très faibles, garantissant l'absence d'effets dans les populations les plus sensibles et, *a fortiori*, chez l'adulte. Soit les substances ont un effet probabiliste (effet de type cancérogène, sans seuil ni relation dose-effet), et l'on détermine, à partir de données expérimentales ou épidémiologiques, un excès de risque : il correspond à l'excès de décès attendus dans une population pendant la vie entière pour une pathologie donnée, après une exposition. L'Organisation

mondiale de la santé préconise un excès de risque de un pour 100 000 ; l'Union européenne, et la France, retiennent généralement une valeur de un pour un million.

Le risque nul n'existe pas. La notion de risque acceptable utilisée dans le raisonnement précédent suppose celle d'acceptabilité sociale. Autant l'exposition librement consentie à un danger connu (tabac, voiture...) est facilement acceptée, même si le risque est élevé, autant l'exposition insidieuse à un danger mal connu (pesticide, radioactivité...) est considérée comme conduisant à un risque inacceptable si celui-ci est de l'ordre de un pour un million.

Cet effet peut conduire à des dépenses qui semblent injustifiées quand les ressources publiques sont limitées (elles le sont). Ainsi le récent changement de la CMA, pour le plomb dans l'eau, de 50 microgramme par litre (sécurité insuffisante) à 25, puis à 10 microgrammes par litre induirait des dépenses de l'ordre de 100 à 150 milliards de francs, alors que le coût de la fixation d'une CMA à 20 microgrammes par litre ne serait que d'une vingtaine de milliards. Pour assurer une marge de sécurité très grande, est-il raisonnable de dépenser 100 milliards, ce qui représente environ un siècle de fourniture gratuite d'eau embouteillée à toutes les jeunes mères de famille françaises ? Notons, de surcroît, que les CMA en plomb, dans les aliments, n'ont pas été modifiées (elles sont supérieures) et que le lait maternel en contient souvent une concentration supérieure.

Dans une civilisation où le recours à la justice se banalise, le risque non nul devenant de plus en plus difficilement acceptable pour les victimes, les personnes chargées de la gestion du risque ouvrent de plus en plus grand le parapluie du principe de précaution. Toutefois les nouvelles agences chargées de la sécurité sanitaire et de l'évaluation du risque devront conserver une démarche scientifique rigoureuse, malgré les pressions.

Philippe HARTEMANN est directeur du Département environnement et santé publique de la Faculté de médecine de Nancy et travaille à l'Unité INSERM U420.





Haut rouge 2/2

Les épidémies aux bagnes de Guyane

STÉPHANE URBAJTEL

Les bagnes de Guyane semblaient apporter une réponse à la question récurrente : que faire des délinquants? Réponse sans lendemain, car ils ajoutaient à la peine d'emprisonnement un cortège de maladies qui tuèrent les prisonniers par milliers.

Claustrophobie, conditions de travail, sévices divers, climat malsain, insalubrité, moustiques, parasites... Pendant près d'un siècle, les quelque 90 000 forçats condamnés à «l'enfer vert» de la Guyane ont côtoyé, chaque jour, la maladie (sur ces 90 000 personnes, 75 000 environ étaient d'origine française). Des milliers ont été gravement malades, la plupart sont morts.

Dans l'imaginaire colonial, la Guyane est une terre lointaine réputée pour ses fièvres qui, depuis le XVII^e siècle, déciment les esclaves, les colons, les indiens... et les bagnards. Le Directoire innove en choisissant la colonie comme terre d'exil pour les opposants politiques : 331 hommes y sont envoyés, 152 y trouveront la mort, victimes des conditions de vie déplorables. Après l'abolition de l'esclavage, Louis Napoléon Bonaparte, prince-président de la Deuxième République, donne son aval à la déportation de condamnés de droit commun vers la Guyane : il y voit une façon de remplacer la main-d'œuvre coloniale, composée jusqu'alors d'esclaves, par des prisonniers ; il espère surtout que les bagnards, hommes et femmes relégués, c'est-à-dire libérés des pénitenciers, mais contraints de rester en Guyane pendant plusieurs années, voire jusqu'à la fin de leur vie, s'installeront définitivement sur ce territoire et le coloniseront. Ce faisant, il veut imiter l'implantation des *convicts* britanniques à Botany Bay, en Australie.

En 1850, survient la première grande épidémie de fièvre jaune. Quatre autres suivront : 1855-

1857, 1873-1874, 1885-1886, et 1902-1903. Aucune classe sociale n'est épargnée : en 1850-1851, la maladie emporte même le gouverneur de la province et une bonne part de son administration. Les bagnards sont évidemment le plus durement touchés.

La transportation commence dans les années 1820. Les transportés sont des personnes condamnées par la cour d'assises, alors que les déportés sont des prisonniers politiques ou des prêtres réfractaires. Le nombre des condamnés augmentant (961 en 1854, 1 331 en 1855,

1 269 en 1856), on doit trouver de nouveaux sites pour les accueillir et pour vider les bagnes portuaires.

Jusque vers 1860, les camps sont installés dans des zones insalubres de la Guyane : la mortalité annuelle atteignant 40 pour cent, ils sont fermés au bout de quelques années. Les camps de Saint-Georges, de la Montagne d'argent, de La Comté, de Sainte-Marie ou de Saint-Philippe sont fermés au bout d'un an, la mortalité atteignant jusqu'à 60 pour cent.

Au début des années 1860, pour faciliter la «reconversion» des bagnards en colons, des terrains sont concédés à des transportés dans le village de Saint-Laurent-du-Maroni, dans le Nord-Ouest de la Guyane. Le village se transforme peu à peu en ville. L'administration pénitentiaire crée un hôpital, des logements pour les gardiens, des magasins, une chapelle et un pénitencier féminin susceptible d'accueillir 40 femmes et 4 sœurs pour les surveiller. Entre 1859 et 1885, 400 ménages s'installent, mais les rares enfants qui naissent souffrent de dégénérescences. Le médecin du camp note la stérilité des femmes du bagne. En 1903, la transportation des femmes est interdite. L'idée de créer une colonie de ménages de relégués est abandonnée.

LA FIÈVRE JAUNE

Revenons sur le haut mal des colonies, la fièvre jaune. Dès les premières années de la transportation, les convois de forçats sont frappés par la maladie, qui



1903

Départ des forçats dans un bateau prison.

exterminer quelque 4 000 prisonniers entre 1850 et 1865. Aucune zone de la colonie n'est épargnée. Les pénitenciers de l'Est, ouverts dès 1853, notamment au bord du fleuve Oyapock, à la frontière avec le Brésil, ou sur les îles du Salut, au large de Kourou, se transforment en mouroirs. En 1867, des centaines de forçats périssent : leur population passe de 1 995, en 1868, à 1 140, en 1877. La mise au point d'un vaccin en 1926 fait reculer la maladie en Guyane, mais pas dans les camps.

Dans la plupart des sites, les bagnards ne sont pas vaccinés, car les services de santé manquent de crédits et sont dépassés par les épidémies ; toutefois, les soins sont un peu mieux organisés à Cayenne et à Saint-Laurent. L'administration pénitentiaire tente en vain de soumettre les bagnards aux «règles indispensables de l'hygiène coloniale». Sur chaque site, un médecin doit surveiller l'état des bagnards, mais il ne dispose pas des moyens qui seraient nécessaires. À leur arrivée, les bagnards doivent se soumettre à une visite médicale et se présenter nus depuis que le bagnard Hébreumont, en 1898, a tué le médecin du camp. Après cette visite, ils ne doivent solliciter le médecin que dans les cas extrêmes. De surcroît, l'administration apprécie que le médecin déclare «non malades» les bagnards examinés. Le vaccin contre la fièvre jaune n'améliore que très peu l'état sanitaire des prisonniers et, de plus, les médecins qui se succèdent au bagne répertorient les progrès d'un grand nombre d'autres maladies.

PALUDISME ET ANKYLOSTOMIASE

Au début du xx^e siècle, le paludisme supplante la fièvre jaune en tant que grand exterminateur. Hormis quelques condamnés, internés dès leur arrivée aux îles du Salut et qui y seront maintenus durant toute leur détention, tous sont tôt ou tard infestés. Le travail sous le soleil torride ou sous les pluies diluviennes, dans les marais et dans les zones infestées par les moustiques les prédispose à la maladie, qui revêt souvent la forme pernicieuse, la plus grave, car récidivante. De 1909 à 1919, cette seule maladie entraîne 53 600 hospitalisations et cause 1 435 décès.

L'infestation de l'intestin par les ankylostomes est aussi importante que la fièvre paludéenne. Les ankylostomes sont des parasites qui se fixent sur la paroi intestinale, l'incisent et absorbent le sang des personnes contaminées, qui maigrissent, souffrent de léthargie profonde et meurent d'épuisement.

Au début du xx^e siècle, dans les pays équatoriaux, les larves de ces parasites pullulent et, si tous les prisonniers ne meurent pas, tous sont infectés. La contamination se fait par contact avec le sol où les larves éclosent, de sorte que les bagnards, entassés sur des terrains contaminés, mal nourris, mal vêtus et pieds nus, sont infectés et

réinfectés par ces vers. Beaucoup en meurent. Louis Rousseau, médecin au bagne des îles du Salut, au début des années 1920, rapporte dans un de ses ouvrages : «Allez à Cayenne, près du Maroni, le fleuve frontière avec le Surinam, aux îles du Salut, visitez les pénitenciers, les hôpitaux, allez surtout dans les villages et sur le territoire des



131 1920-1921



132 1920-1921

Lors des épidémies, les malades se rassemblaient en attendant la visite du médecin (en haut, au camp de Charvein). Selon leur état, ils étaient renvoyés dans leur cellule ou acceptés à l'hôpital ou à l'infirmerie (en bas, l'infirmerie du pénitencier de Saint-Laurent-du-Maroni).



du travail du bois



des camps

Le travail du bois, tant dans la forêt (en haut, à Cayenne) que dans les camps était l'une des principales activités des bagnards (en bas, à Saint-Laurent-du-Maroni).

communes, partout vous trouverez ces figures de cire, des sujets amaigris ou bouffis selon que la cachexie les momifie ou les rend hydropiques.» Plusieurs médecins ont étudié les cadavres, et leurs conclusions se recoupent : les autopsies montrent toujours une énorme rate, un foie gros et pâle, un pancréas dégénéré, soudé à un duodénum épaissi par les morsures de centaines de milliers d'ankylostomes. Les dysenteries produites par les amibes et par les anguillules sont aussi très fréquentes, et il est bien peu de condamnés dont l'intestin soit indemne de tout parasite.

«Le plus souvent, la tuberculose pulmonaire donne le coup de grâce à ces cadavres ambulants que se seront

disputés jusqu'à la mort l'hématozoaire du paludisme et le plus terrible des vers intestinaux», rapporte Rousseau.

TUBERCULOSE ET LÈPRE

Les tuberculeux qui parviennent à se maintenir en vie sont parqués avec les impotents dans un camp qui leur est réservé aux environs de Saint-Laurent. Un médecin décrit ce cloaque : «La nuit, ils étaient torturés par les puces, les poux et les moustiques. Les puces chiques s'attaquaient à leurs pieds ulcérés [...] ; ils déchiraient chemise et vareuse pour envelopper leurs pieds sanglants de chiffons bientôt souillés par la boue.» Un

des médecins réussira à obtenir la séparation des tuberculeux et des impotents, la suppression des travaux forcés pour les tuberculeux fiévreux et la construction de lits de camp pour les impotents.

La population pénale n'est épargnée par aucune maladie : la lèpre, introduite, selon les témoignages des médecins, par des esclaves venus de la côte d'Afrique, s'implante vite dans le pays, mais le milieu pénal, assez fermé, n'est touché qu'en 1883.

Un médecin du bagne prétend que «la France a réalisé par la transportation de ses condamnés la plus vaste et la plus irréprochable des expériences sur la contagiosité de la lèpre». Les condamnés lépreux sont isolés sur un îlot du Maroni. Sans surveillance et sans soins, certains en profitent pour s'évader. Seuls restent ceux qui ont des mutilations trop apparentes ou des faciès trop léonins. Dès qu'elle réussit à s'installer dans les rangs des transportés, elle fait des ravages. En 1915, on compte 73 lépreux. Malgré les morts et les évasions (fréquentes, mais rarement réussies), ce nombre reste quasi constant de 1910 à 1927.

En octobre 1922, à Rio de Janeiro, au Brésil, le professeur Alberastur, délégué de la république Argentine, profite de la conférence américaine sur la lèpre pour dénoncer la situation des forçats de Guyane. Il s'étonne que «les vieux pays d'Europe et en particulier la France [...] eussent en Guyane une organisation sanitaire si arriérée». Le corps médical pense alors, sans en être tout à fait sûr, que la lèpre est favorisée par l'insalubrité. L'administration pénitentiaire tente d'enrayer le fléau, mais rien n'y fait. Pire, confirment les témoignages des médecins, le mal se propage hors des pénitenciers : «Le petit Guyanais sera lui aussi touché par la maladie». Le manque d'hygiène des condamnés aggrave la mortalité dans la population carcérale : en 1913, le creusement du canal Roy, à Kourou, est abandonné au quatrième kilomètre, à cause de l'état sanitaire déplorable des travailleurs : ils manquent d'eau et doivent drainer l'eau de la savane pour se laver.

D'autres grands travaux ont eu leur lot de victimes. Ainsi la «route coloniale numéro 1», entre Cayenne et Saint-Laurent, est restée célèbre pour son chantier-cimetièr du kilomètre 29. Commencés en 1906, les travaux sont arrêtés en 1914, en raison des pluies torrentielles, du soleil torride, des moustiques, du manque d'hygiène et d'une alimentation médiocre. Au kilomètre 29, le chantier cesse, et les dizaines de morts sont regroupés et enterrés. Les travaux reprennent en 1923, avec des moyens plus adaptés, mais toujours avec

des forçats. En 1924, le service de la santé demande que les Européens ne soient plus employés à cette tâche. Les travaux de la route sont alors réservés à des Asiatiques, à des Africains et à quelques Européens des îles supposés plus résistants.

Les condamnés des chantiers forestiers paient également un lourd tribut à une maladie de peau que les créoles appellent le «pian bois» en raison de son origine sylvestre et de sa ressemblance avec le pian, une maladie infectieuse des pays tropicaux provoquée par un tréponème, l'agent de la syphilis. En fait, la population pénale est frappée par presque toutes les maladies endémiques. Seule exception, notent les médecins, l'éléphantiasis, une hypertrophie des membres inférieurs et des organes génitaux, due à une infection par des parasites (les filaires), est très fréquente chez les populations indigènes, alors qu'elle épargne les condamnés sans que l'on sache pourquoi.

CARENES ALIMENTAIRES ET SCORBUT

A côté de ces maladies liées au climat, à l'environnement, aux parasites et à l'insalubrité, d'autres et notamment le scorbut, résultent des carences alimentaires et du confinement. Là aussi, tous les médecins du bagne arrivent aux mêmes conclusions : c'est toujours en cellule, au cours de longues détentions préventives, et de la réclusion en cellule à l'île de Saint-Joseph, que les forçats deviennent scorbutiques. Seuls y échappent ceux qui font deux à trois séjours de quinze jours par an à l'hôpital. Pour traiter la maladie, les médecins prescrivent des citrons et du pourpier (une plante dont les feuilles charnues sont comestibles) et recommandent l'augmentation de la durée des promenades. Selon Rousseau, le scorbut «est la condamnation la plus démonstrative de l'abominable régime des réclusionnaires».

Dès lors, comment peut-on expliquer que les services de santé ne mentionnent, dans les années 1920, que quelques dizaines d'hospitalisations dues au scorbut et moins d'une dizaine de décès par an ? En fait, les condamnés ne sont pas épargnés, mais tous les malades ne sont pas recensés. «Le gardien, après avoir remis au praticien de la salade, des légumes, des mangues, des ananas, des noix de cocos, des poissons et les meilleurs morceaux de bœuf, lui glisse cette prière : Dites donc, docteur, vous seriez bien aimable, si cela ne vous dérange pas, de remplacer dans vos rapports les diagnostics de scorbut par d'autres diagnostics. Vous comprenez



Cellules de bagnards, aujourd'hui envahies par la végétation (camp sur l'île du Salut)

que c'est très ennuyeux pour nous qui faisons tout ce que nous pouvons et ne pouvons faire davantage, de dire au gouverneur et au ministre que le scorbut règne dans nos établissements.»

Les médecins et les prisonniers mentionnent l'existence, au bagne de Cayenne, d'une autre maladie, moins connue et surtout moins grave que le scorbut, également en rapport avec les conditions de vie pénale. Il s'agit d'une maladie de la rétine due à une carence alimentaire qui inhibe la vision nocturne : la nuit, les prisonniers deviennent aveugles. Pour guérir le mal, les médecins prescrivent du foie cru, foie de bœuf ou foie de poisson, ou une à deux cuillères d'huile de foie de morue. La vue nocturne revient cinq à dix heures après l'absorption de foie cru, deux à trois jours après celle d'huile de foie de morue. Ne pas voir la nuit, c'est être sans défense, de sorte que les détenus veulent guérir à tout prix.

Pour se soustraire aux conditions de vie intolérables du bagne, les prisonniers inventent des stratagèmes. Certains arrivent à simuler un accès de fièvre. Le docteur Rousseau raconte l'histoire d'un prisonnier qui «jouait bien la période de frisson, claquait des dents, tremblait de tous ses membres et faisait monter le thermomètre sous l'aisselle. Mais il le faisait monter à une hauteur qui n'avait encore jamais été enregistrée». Les médecins ont dénombré plusieurs dizaines de prisonniers qui déclenchaient eux-mêmes leur maladie. Cette pratique du «maquillage» était surtout employée par les condamnés à de longues peines de cachot. Les médecins évoquent des cas de phlegmons provoqués par des inclusions intradermiques de petits morceaux de graines de ricin et quelques conjonctivites produites par la simple introduction de petits morceaux de la même graine dans l'œil.

Tous les prétextes sont bons pour un séjour à l'hôpital. Selon certains témoignages, un médecin sollicitait même les forçats – qui acceptaient – pour qu'ils servent de cobayes dans diverses interventions chirurgicales. Aux îles du Salut, ce médecin a pratiqué de trois à cinq trépanations par mois pendant près de deux ans. Une centaine de prisonniers ont ainsi été du matériel humain. À ces diverses maladies s'ajoute enfin la syphilis. Une maladie sans doute jugée trop honteuse pour en faire état dans les chiffres officiels. Elle est évoquée en filigrane dans les commentaires de certains médecins, mais clairement exprimée sur les gravures réalisées par les forçats eux-mêmes.

Toutes ces maladies expliquent l'effroyable mortalité parmi les prisonniers. En 1902, un médecin estimait que la moyenne de la vie pénale, en Guyane, n'atteignait pas cinq ans, la durée de la peine la plus courte infligée aux transportés, et la situation ne s'est jamais améliorée. Le bagne a été fermé en 1938, et d'anciens condamnés vivaient encore en Guyane dans les années 1980. Ils témoignaient de leur chance et ajoutaient, par leur récit des sévices prodigués par les gardiens et les codétenus, à l'atrocité de la vie du bagne.

Stéphane URBAJTEL est journaliste à Radio Caraïbe International.

Albert LONDRES, *Au bagne*, éditions Albin Michel, 1924.

Louis ROUSSEAU, *Un médecin au bagne*, éditions Fleury, 1930.

Alexander MILES, *Le bagne vu des États-Unis*, Encyclopédie de la Caraïbe, tome Guyane, 1990-1992.

A. MILES, *Devil's Island, Colony of the Damned*, éditions Ten Speed Press, 1988.



Les pommes de terre soufflées

HERVÉ THIS

L'analyse d'un plat classique montre comment éviter la matière grasse des fritures.

Les pommes de terre soufflée se présentent sous la forme de petits ballons croustillants et dorés : on a raconté qu'elles furent découvertes le 25 août 1837, lors de l'inauguration de la ligne de chemin de fer Paris-Saint Germain-en-Laye : au déjeuner officiel, on devait servir des rondelles de pomme de terre rîtes, mais le train avait difficilement monté la dernière côte, de sorte que le cuisinier décida d'interrompre la friture ; puis, quand les convives furent attablés, il retrempa les rondelles dans un bain d'huile très chaud afin de les rendre croustillantes. Elles gonflèrent.

Depuis, les cuisiniers ont donné des indications variées pour confectionner ce difficile chef-d'œuvre de la cuisine française classique ; l'analyse physico-chimique éclaire les mécanismes du soufflage et révèle comment limiter la consommation de matière grasse dans les fritures.

Les livres de cuisine n'expliquent pas les conseils qu'ils donnent, à propos des pommes de terre soufflées. On a longtemps prétendu que ce plat, et la détermination de l'épaisseur idéale des rondelles, avaient été étudiés par le chimiste français Eugène Chevreul (1786-1889), qui fut un pionnier de la chimie des corps gras. L'histoire était plausible, vu l'importance de la matière grasse dans la confection du plat, mais je n'ai pas trouvé trace d'un tel travail dans les œuvres de Chevreul. En revanche, le cuisinier français Auguste Colombié a écrit en 1893 : « Grâce à l'obligeance de M. Decaux, l'aimable et savant préparateur chimiste du regretté Chevreul, qui a bien voulu me fournir les thermomètres indispensables, j'ai pu faire trois expériences scientifiques sur le soufflage des pommes de terre, le mercredi 14 avril 1894, au magasin d'exposition de la Compagnie parisienne du gaz ».

Suivent plusieurs pages où Colombié présente les résultats de ses expériences, sans aucune référence à Chevreul : il est donc probable que les historiens de la cuisine auront assimilé Colombié à Decaux, et Decaux à Chevreul. Comment préparer des pommes de terre soufflées ?

La plupart des recettes classiques préconisent de couper, dans le sens le plus long des pommes de terre, des rondelles dont l'épaisseur est comprise entre 3 et 6 millimètres. Après lavage et séchage, on plonge les rondelles dans un premier bain de friture, porté à une température de 180 °C. Puis, après six à sept minutes, quand les rondelles suragent, on les sort, on les laisse reposer, puis on les plonge dans un second bain plus chaud. Les divers chefs attribuent le succès à l'épaisseur des rondelles, au temps d'attente entre les deux bains, ou à la température de ceux-ci.

Quel est le paramètre important ? Pourquoi le phénomène de soufflage ? Comment l'optimiser ? L'expérimentateur qui suit les recettes observe tout d'abord que la pomme de terre est un matériau thermiquement isolant : la cuisson de son centre (les cellules de pomme de terre contiennent des grains d'amidon, qui gonflent quand l'eau des cellules est chauffée, formant une purée) est lente. Quand le premier bain est trop chaud, une croûte excessivement épaisse et rigide se forme avant que le centre soit cuit, et la pomme de terre ne souffle plus, ensuite.

D'autre part, l'expérience qui consiste à peser des rondelles frites montre que l'huile ne remplace pas l'eau éliminée par la chaleur, comme cela fut longtemps admis : par une surface de 100 centimètres carrés, environ 80 centimètres cubes de vapeur s'échappent par seconde ; la pression de la vapeur repousse l'huile ! En outre, si les rondelles viennent bientôt flotter, c'est que l'eau est remplacée par de la vapeur et non par de l'huile (la pomme de terre est composée de 78 pour cent d'eau et de 17 pour cent d'amidon, plus dense que l'eau et, *a fortiori*, que l'huile).

D'ailleurs, l'observation de bulles de vapeur donne la clé du soufflage : pour que les rondelles soufflent, il faut que la vapeur soit formée brusquement, déformant les faces asséchées qui forment des cloisons imperméables à la vapeur. Sans cette vaporisation rapide (d'où la température élevée du second bain), de petits

filets de bulles s'échappent par des orifices dans la croûte, et la pression de la vapeur est insuffisante pour faire souffler.

Ce soufflage n'a également lieu que si des cloisons imperméables ont été formées lors du premier bain. Puis, pendant le repos entre les deux bains, la cuisson se poursuit dans la partie centrale, l'eau se répartit dans les zones asséchées, au voisinage des cloisons complètement sèches, et, probablement, le refroidissement décolle les cloisons du cœur. Le second bain, en évaporant l'eau, provoque le soufflage : la vapeur sort difficilement par les quelques orifices des cloisons.

Cette analyse explique que l'épaisseur doit être bien contrôlée. Avec des rondelles trop minces, on n'obtient pas deux cloisons séparées par une purée centrale, et la quantité de vapeur formée est ensuite insuffisante ; avec des rondelles trop épaisses, la longue cuisson du centre s'accompagne de la formation d'une croûte trop épaisse, gênant le gonflement.

On comprend également qu'il faille prendre le plus grand soin en manipulant les rondelles de pommes de terre : si on perce les minces cloisons, on voit de grosses bulles sortir par les ouvertures, de sorte que la pression n'est plus suffisante pour provoquer le gonflement.

Enfin, comment minimiser la quantité de matière grasse absorbée avec les pommes soufflées ? S. Saguy, à l'Université de Jérusalem, a montré que l'huile est surtout présente en surface, et que sa quantité augmente avec la rugosité et avec l'usure de l'huile : plus la rugosité est grande, plus l'huile adhère à la surface, d'autant que les huiles âgées contiennent des molécules tensioactives (la preuve : les vieilles huiles moussent). De surcroît, Felix Escher et ses collègues de l'École polytechnique de Zurich ont montré que l'huile est absorbée quand on retire les pommes de terre soufflées de la friture. Le mécanisme de cette absorption reste à élucider.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 30 septembre 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Les diamants de Guyane

La découverte de diamants dans des roches volcaniques jeunes, en Guyane, pose une énigme : comment se sont formées ces pierres précieuses ?

Le mécanisme de formation du diamant reste objet de débat parmi les géologues, mais les conclusions des études pétrographiques et géochimiques effectuées aux Laboratoires Géosciences Rennes par Ramon Capdevila, à partir des carottes de roche extraites du sous-sol guyanais, apportent un nouvel élément qui bouleverse l'état des connaissances : les diamants d'origine guyanaise ont été transportés, non pas par le magma du type supposé jusque récemment, mais par une roche volcanique de type talc-schiste.

Le diamant est un cristal de carbone formé à plus de 150 kilomètres de profondeur dans le manteau terrestre, là où la température et la pression sont telles que la forme stable du carbone est le diamant, et non le graphite comme en surface. Le diamant est transporté à la surface de la Terre dans des cheminées volcaniques profondes, emplies d'un type de magma dont le plus connu est la kimberlite ; de telles cheminées forment ce que les spécialistes nomment des « pipes ». Les kimberlites sont des roches effusives ultrabasiques (dénommées ainsi, car pauvres en silicium, mais riches en fer et en magnésium, ce qui montre qu'elles viennent du manteau), très riches en mica phlogopite (contenant du magnésium et du potassium).

Les diamants remontent avec la lave en surface, suivant des processus explosifs, pour donner des motifs dénommés diatrèmes. Un gisement primaire de diamant classique se présente comme un domaine circulaire, d'environ un kilomètre de diamètre. Ce gisement est lentement détruit par les processus d'érosion. Les pierres précieuses et les minéraux qui les accompagnent sont alors libérés de leur

gangue et transportés par les eaux de surface, qui peuvent les concentrer, engendrant des gisements secondaires, les placers. On trouve les sources primaires de diamants en cherchant, comme le Petit Poucet, les gemmes accompagnateurs dans des alluvions transportées par les cours d'eau.

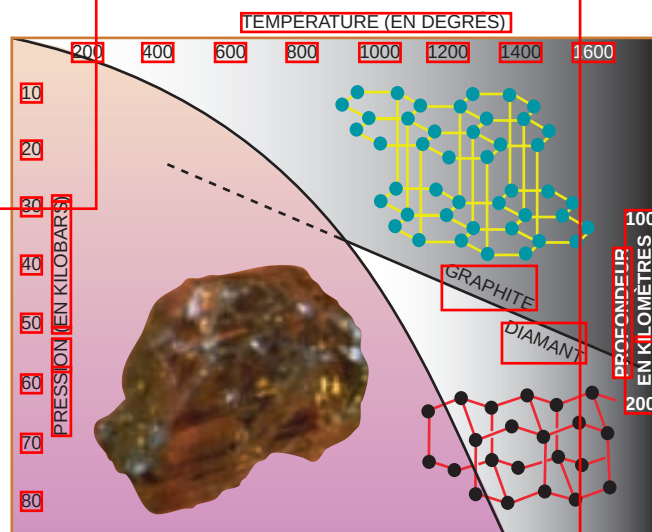
Les pipes kimberlitiques et lamproïtiques sont rares. Avant les découvertes de Guyane, les géologues avaient déterminé qu'elles se mettaient en place uniquement dans les boucliers précambriens, où les terrains sont plus anciens que deux milliards et demi d'années. Aussi la présence de diamants alluvionnaires en quantité notable dans le bouclier guyanais semble paradoxale : l'essentiel de la zone est constitué de terrains plus jeunes que deux milliards et demi d'années. Par ailleurs, ces diamants détritiques ne sont généralement pas accompagnés par les autres minéraux résistants, caractéristiques des milieux kimberlitiques et lamproïtiques. Pendant plus de 50 ans, les géologues ont multiplié les hypothèses pour expliquer cette présence surprenante de diamants détritiques. Ils proviendraient des quelques petits filons de kimberlites découverts plus à l'Ouest, au Venezuela, dans une région où le



Le site de Guyane où l'on a découvert les diamants formés à partir de komatiite.

contexte géologique est semblable, avançant certains scientifiques. D'autres supposaient qu'ils s'étaient formés avant l'ouverture de l'Atlantique et provenaient en fait de l'érosion de gisements primaires d'Afrique de l'Ouest. Aucune de ces hypothèses ne semblant satisfaisante, le Bureau minier guyanais, puis le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) avaient finalement admis l'existence probable d'une « deuxième source », non identifiée. Avec cette découverte en Guyane, c'est toute une phase d'étude des talc-schistes de type komatiite qui est lancée pour comprendre le mécanisme de transport des diamants à la surface. D'après les analyses effectuées, les carottes de roche saine extraites révèlent des concentrations atteignant 2 658 diamants dans un fragment de 34,5 kilogrammes. D'autres terrains comparables du point de vue géologique sont connus en Afrique de l'Ouest et en Amérique du Sud et sont autant de lieux d'études. Ce nouveau type de gisement primaire de diamant pourrait renfermer des richesses insoupçonnées.

Stéphane URBAJTEL



Zones d'existence du diamant et du graphite à l'intérieur de la Terre. En bas, un des diamants guyanais.

La lutte contre les maladies respiratoires

Un vaccin contre les rhumes de l'enfance et leurs complications?

Chez l'adulte, les rhumes, bronchiolites et autres pneumonies sont généralement vaincus par le système immunitaire. Chez les enfants et, surtout, chez les nouveau-nés, ces maladies, parfois graves, risquent d'endommager définitivement le système respiratoire ; elles sont responsables de la mort de près de deux millions de personnes dans le monde chaque année. Le génie génétique produit aujourd'hui un vaccin de synthèse, testé sur des enfants.

Des quatre virus qui causent la plupart des maladies respiratoires, le plus redoutable est le virus respiratoire syncytial, qui provoque, chez le nourrisson des pays industrialisés, 40 à 50 pour cent des bronchiolites et 25 pour cent des pneumonies nécessitant une hospitalisation. La situation est encore plus grave dans les pays en développement. Contrairement aux autres maladies infantiles, le virus respiratoire syncytial peut réinfecter la même personne plusieurs fois. L'infection est bénigne chez l'adulte sain ; en revanche, les infections chez les nourrissons de moins de six mois, chez les adultes immunodéprimés et chez les personnes âgées peuvent être graves. Pourrait-on disposer d'un vaccin qui, comme le vaccin contre la grippe, protégerait les personnes à risques?

Plusieurs équipes ont essayé de produire des vaccins inactivés ou atténués qui déclencheraient une réaction immunitaire protectrice sans provoquer

la maladie. Ainsi des groupes français cherchent à créer un vaccin à partir de fragments du virus respiratoire syncytial, antigènes vaccinaux incapables de créer une infection. Les vaccins atténués, c'est-à-dire composés de virus entiers, mais ayant subi des traitements qui les empêchent de proliférer, se sont révélés plus prometteurs, mais ils sont difficiles à produire. Les biologistes se heurtent à un obstacle inhérent à la production des vaccins atténués : réduire le potentiel infectieux du virus sans pour autant le rendre complètement inoffensif. Le virus doit déclencher une infection pour stimuler le système immunitaire et protéger efficacement l'organisme, mais l'infection doit être limitée.

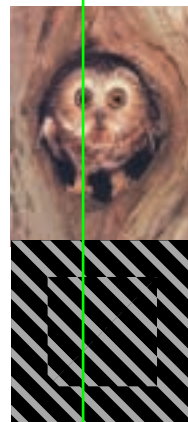
En 1968, Robert Chanock, de l'Institut américain de la santé (NIH), a atténué le virus respiratoire syncytial en le cultivant à basse température. Après avoir été testé chez le chimpanzé, ce vaccin potentiel a subi une série d'essais cliniques chez des enfants de plus en plus jeunes. On ne l'a pas retenu, car il entraînait des congestions nasales jugées inacceptables pour des nourrissons.

Récemment, R. Chanock, Brian Murphy, Peter Collins et leurs collègues du NIH ont appliqué la génétique inverse au virus pour obtenir un génome «sur mesure». Le génome viral, une molécule d'ARN, est recopié par les méthodes de génétique moléculaire, sous la forme d'une molécule d'ADN. Ensuite, on introduit des mutations, à volonté, dans les régions que l'on veut affaiblir. L'ADN ainsi modifié est injecté dans des cellules contenant les protéines virales nécessaires à la production du virus : les particules virales produites par ces cellules ressemblent aux virus naturels, elles activent le système immunitaire, mais elles se multiplient très peu, de sorte qu'elles

BRÈVES

Une chouette illusion

Les hommes et les singes ne sont plus les seuls à voir des images de formes immatérielles : Andreas Nieder et Hermann Wagner, de l'Institut de biologie d'Aachen, ont montré que les chouettes en sont également capables. Après avoir appris à distinguer un triangle et un carré dessinés sur un fond hachuré, les oiseaux différencient encore les deux formes lorsqu'elles ne sont plus dessinées, mais matérialisées par des hachures décalées par rapport aux hachures du fond. Les biologistes ont confirmé l'étude comportementale par l'enregistrement des activités neuronales : les mêmes neurones sont activés par l'image objective et par l'image subjective correspondante. Les chouettes sont aussi victimes d'illusions d'optique.

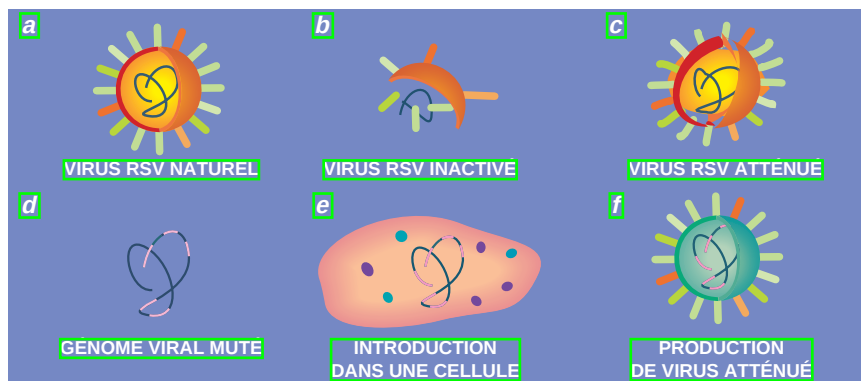


Tiges dressées

Le citrate de sildenafil, commercialisé sous le nom de Viagra®, est-il un élixir de jouvence universel? Déjà réputé comme remède à certaines impuissances sexuelles, il pourrait conquérir bientôt un nouveau marché : celui des fleurs coupées. Yaacov Leshem, de l'Université Bar-Ilan, en Israël, et Ron Wills, de l'Université de Newcastle, en Australie, ont découvert que de très petites quantités de Viagra dissoutes dans l'eau d'un vase doublent la durée de vie des fleurs coupées que l'on y place. La substance prévient la dégradation de la guanosine monophosphate cyclique, dont la présence favorise les rigidités humaine et végétale.

Du fer en piles

Trois chimistes israéliens partagent l'opinion de Popeye le marin : le fer est une source d'énergie puissante. Constatant que le dioxyde de manganèse utilisé aujourd'hui dans les piles électriques alcalines de consommation courante en limite la capacité énergétique, ils proposent de le remplacer par un sel contenant du fer très oxydé. Les autres composants des piles, une électrode de zinc et un électrolyte alcalin, resteraient inchangés. À masse égale, une telle pile fournit entre 40 et 200 pour cent d'énergie en plus, selon la puissance demandée.



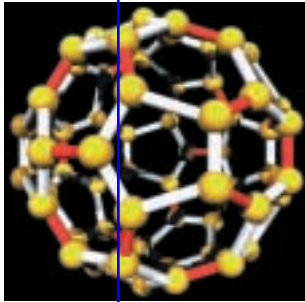
Afin de protéger les nourrissons contre le virus RSV (a) responsable de bronchiolites, on a préparé des vaccins inactivés (b, le vaccin ne contient que des fragments du virus) ou des vaccins atténués (c) : le virus subit divers traitements qui le modifient suffisamment pour le rendre incapable de déclencher une infection généralisée. Toutefois, les réactions protectrices sont insuffisantes. On a alors introduit dans le génome viral plusieurs mutations (d). Le génome modifié est injecté dans une cellule (e) qui produit des particules virales proches des particules naturelles (f) : elles déclenchent des réactions immunitaires protectrices efficaces, mais ne se multiplient quasiment pas, de sorte qu'elles ne provoquent pas d'infection grave.

Pâte d'arachide

Les enfants gravement dénutris lors de famines dues à des sécheresses ou à des guerres étaient jusqu'à présent réalimentés avec du lait en poudre enrichi en graisses, en sucre, en vitamines et en sels minéraux. Ce complément alimentaire doit être dissous dans de l'eau et consommé immédiatement après sa préparation, en raison des risques de contamination bactérienne : en pratique les enfants doivent être traités dans les dispensaires ou les hôpitaux. Pour remédier à cet inconvénient, André Briend, de l'Institut de recherche sur le développement, a mis au point, avec la Société *Nutriset*, un complément alimentaire solide : une partie du lait en poudre est remplacée par de la pâte d'arachide, et l'aliment peut-être absorbé sans eau. Il se conserve plus longtemps, et les enfants semblent l'apprécier plus que le lait en poudre.

De gros ballons

Les fullerènes sont des molécules de carbone découvertes alors que l'on cherchait à comprendre comment le carbone s'associe dans le milieu interstellaire. Les plus simples, C_{60} et C_{70} (contenant respectivement 60 et 70 atomes de carbone), ont la structure de ballons de football. En étudiant des résidus carbonés de la météorite d'Allende, découverte en 1969 au Mexique, des astronomes américains ont décelé des



agrégats comprenant jusqu'à 400 atomes de carbone. Il s'agit soit de la première indication de l'existence de fullerènes très lourds, soit d'une toute nouvelle classe de molécules polyaromatiques riches en carbone.

L'impact des top models

La minceur des mannequins présentées dans les revues de mode influe-t-elle sur le comportement alimentaire des adolescentes? Contrairement aux résultats antérieurs, une étude américaine portant sur plus de 200 filles âgées de 13 à 17 ans a montré que la lecture de ces revues ne les poussent pas à faire de régimes drastiques et ne déclenchent pas de troubles du comportement alimentaire. Les psychologues ont seulement constaté que les jeunes filles qui ne sont pas satisfaites de leur corps voient cette sensation empirer.

ne déclenchent pas de maladie. Les chercheurs américains ont introduit dans le génome du virus respiratoire syncytial les cinq mutations qui avaient été identifiées dans le virus atténué. Ils ont ensuite renforcé l'atténuation en ajoutant une nouvelle mutation : six mutations différencient ce vaccin potentiel du virus sauvage. Néanmoins, l'équipe de P. Collins a jugé nécessaire d'introduire davantage de modifications, afin d'éviter tout retour à la forme virulente.

Les premiers essais de ce vaccin ont donné des résultats prometteurs chez le chimpanzé. Ce vaccin contre le virus respiratoire syncytial est en cours d'essai

clinique sur des enfants de plus de deux ans ayant déjà été infectés par ce virus ; il sera ensuite testé sur des nourrissons de trois à cinq mois et, enfin, sur des nouveau-nés. La société pharmaceutique *Wyeth Lederle Vaccines and Pediatrics*, qui mène les essais cliniques, espère commercialiser le vaccin dans moins de cinq ans, tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement, où son prix devrait être réduit. S'il obtient finalement l'autorisation de mise sur le marché, le vaccin contre le virus respiratoire syncytial sera le premier vaccin issu de la génétique inverse.

Denise NANICHE

Réchauffement et ralentissement

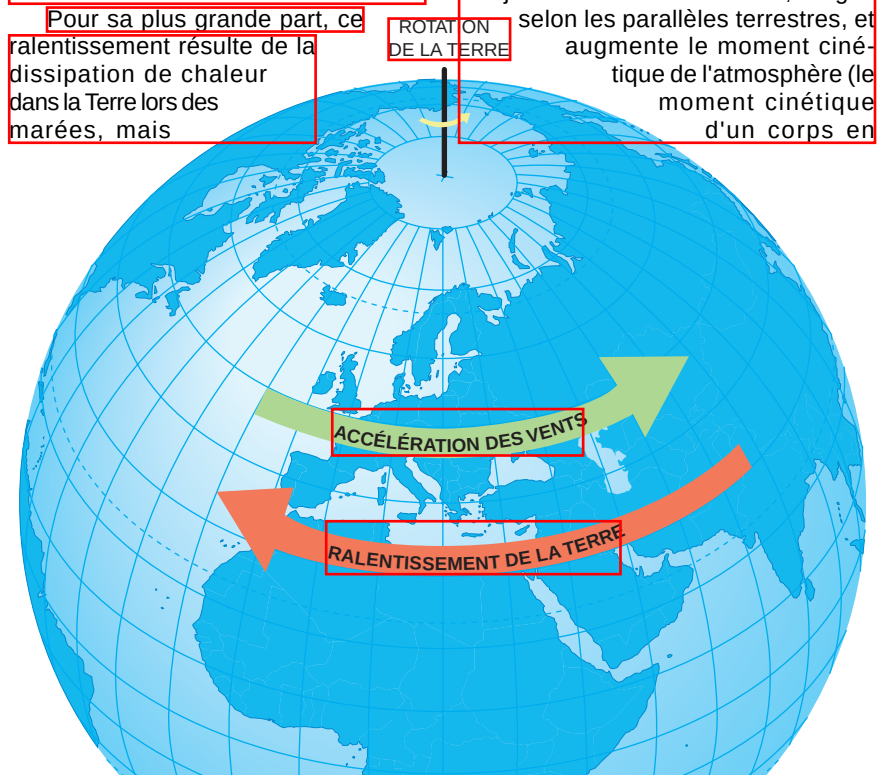
La Terre ralentit d'une demi-milliseconde par siècle en raison du réchauffement global.

Gâce aux horloges atomiques, inventées dans les années 1950, les astronomes savent que la Terre ralentit. Contrairement à la conception platonicienne qui a prévalu durant 20 siècles, la Terre ne peut plus être considérée comme une horloge idéale.

Pour sa plus grande part, ce ralentissement résulte de la dissipation de chaleur dans la Terre lors des marées, mais

d'autres causes plus subtiles interviennent. En étudiant les variations de la direction des vents dus au réchauffement global, Rodrigo Abarca del Rio, du Laboratoire LEGOS du CNES, à Toulouse, a montré que le réchauffement global ralentit la Terre d'une demi-milliseconde par siècle, soit près d'un tiers du ralentissement total.

Depuis longtemps, les climatologues supposent que le réchauffement global perturbe les mouvements de la Terre et de son atmosphère. Par exemple, un réchauffement près de l'équateur crée un vent dans la tropopause (vers 18 kilomètres d'altitude) équatoriale, qui s'ajoute aux vents habituels, dirigés selon les parallèles terrestres, et augmente le moment cinétique de l'atmosphère (le moment cinétique d'un corps en



Le réchauffement global accélère l'atmosphère (flèche verte) par rapport à la rotation de la Terre (flèche jaune), d'où il résulte que la Terre ralentit (flèche rouge).

rotation est le produit de la vitesse de chaque élément de masse du corps par la distance de cet élément à l'axe de rotation). Or, comme la Terre et l'atmosphère forment un système à peu près isolé, leur moment cinétique totale reste constant. Ainsi, une augmentation du moment cinétique de l'atmosphère est compensée par une diminution du moment cinétique de la Terre : celle-ci ralentit.

Pour évaluer l'importance de cet effet, R. Abarca del Rio a réinterprété les enregistrements atmosphériques qui existaient depuis 1948. Il a alors obtenu l'évolution du vent global dirigé le long des parallèles depuis 50 ans : au cours de cette période, l'accélération de

l'atmosphère équivalait à une augmentation de la longueur du jour de 0,56 milliseconde par siècle. Durant la même période, le réchauffement global (Terre et océan), mesuré à l'Université d'East Anglia (Angleterre), a été de 0,79 °C par siècle. Dans l'hypothèse où le ralentissement observé serait dû au réchauffement mesuré et où les deux effets seraient proportionnels, la mesure continue du ralentissement de la Terre serait un moyen inédit de surveiller le réchauffement global dans les prochaines décennies. Techniquement, on pourrait détecter des réchauffements de seulement 0,1 °C à l'aide des techniques astronomiques d'interférométrie. Toutefois, trop d'effets supplémentaires,

difficilement quantifiables, modifient la rotation de la Terre, tels les changements de répartition des masses terrestres dus au rebond postglaciaire ou à la modification des mouvements dans le noyau terrestre.

En revanche, le réchauffement global pourrait être surveillé grâce aux vents : depuis le milieu des années 1970, la vitesse des vents, enregistrée en de nombreux points du Globe, est modélisée.

L'analyse de la variation du moment cinétique de l'atmosphère serait un moyen facile et précis de surveillance, car le moment cinétique est une donnée atmosphérique globale, alors que les mesures de températures sont locales.

Je plie, et ne romps pas

On traite le bois comme les matières plastiques.

Les menuisiers découpaient les pièces de bois à la scie... Demain ils les mouleront : des chercheurs de l'Institut autrichien d'agrobiotechnologie, à Tulln, utilisent des machines à extruder de l'industrie des polymères pour transformer des granulés composés essentiellement de bois.

L'idée est... naturelle : comme les matières plastiques, le bois est composé en grande partie de polymères, c'est-à-dire de longues molécules formées par enchaînement d'unités. Dans le bois, le principal polymère est la cellulose, composée par enchaînement de molécules de glucose. D'où les essais pour traiter

le bois comme les polymères. Des essais analogues avaient déjà donné de bons résultats : ces dernières années, Stéphane Guilbert et ses collègues de la Station INRA de Montpellier ont montré comment obtenir des emballages pour les aliments à partir des protéines présentes dans les céréales et comment fabriquer des barquettes pour le conditionnement alimentaire à partir d'amidon. Les chercheurs autrichiens, eux, ont voulu valoriser les résidus de scieries : sciure ou copeaux.

Les essais ont montré que ces résidus ne peuvent être utilisés en l'état. On obtient de meilleurs résultats quand on ajoute du maïs, sous forme de semoule ou de farine, des résines naturelles et divers additifs : pigments, agents de moulage, plastifiants. L'ensemble est fondu dans une première extrudeuse, d'où sort un boudin continu qui est ensuite divisé. On obtient des granulés de taille similaire à celle des granulés de matière plastique utilisés dans l'industrie ; leur thermoplasticité est assu-

rée par l'eau qui doit être présente, en concentration voisine de dix pour cent.

Ces granulés à base de bois peuvent être ultérieurement transformés par n'importe quelle machine de moulage classique par injection. Chauffés et poussés par une vis sans fin contre une forme ajourée, les granulés forment un matériau mou qui sort par le jour de la forme de sortie et prend le profil de cette dernière, puis solidifie.

Aujourd'hui le procédé a déjà été largement utilisé pour la production de moulures et d'éléments de décoration intérieure. Plus généralement, pour toutes les applications où du plastique a remplacé du bois, les granulés à base de bois peuvent remplacer le plastique. Les chercheurs autrichiens cherchent maintenant à produire un cadre de fenêtre et, simultanément, ils examinent comment on pourrait produire des plaques transparentes à partir de diverses céréales. Une fenêtre tout en bois pour demain ?



Extrusion d'un élément profilé pour le bâtiment (à gauche), à partir de granulés composés de résidus de scierie. Ces granulés permet-



tent la réalisation de pièces classiquement fabriquées à partir de matières plastiques (à droite).

Tout azote

Vient-on de découvrir une nouvelle famille de composés de l'azote? Les seules molécules «tout azote» étaient la molécule de diazote N_2 et un ion composé de trois atomes d'azote, découvert il y a 109 ans. Un nouveau membre de la famille est né : les chimistes californiens Karl Christe et William Wilson ont synthétisé une molécule composée de cinq atomes d'azote. Sa synthèse est un tour de force, car toutes les molécules contenant plus de deux atomes d'azote voisins se décomposent en libérant du diazote et beaucoup d'énergie. Pourra-t-on combiner cet ion N_5^+ avec l'ion N^{3-} déjà connu? La molécule de formule N_8 qui se formerait serait alors la première forme cristalline composée seulement d'azote.

Troubles du sommeil

Le sommeil, occupation à laquelle nous consacrons le tiers de notre vie, est de deux types : le sommeil lent et le sommeil paradoxal, le temps des rêves. Certaines personnes atteintes de narcolepsie s'endorment dans un sommeil paradoxal impossible à combattre, qu'elles soient en réunion de travail ou au volant de leur voiture. Pendant dix ans, Emmanuel Mignot et ses collègues de l'Université de Stanford ont traqué les gènes de la narcolepsie chez des chiens atteints de la maladie : ils ont découvert des anomalies dans le système de l'orexine, une molécule qui participe au contrôle de l'appétit. On peut rêver – bien éveillé – qu'une molécule qui agirait comme l'orexine traiterait la narcolepsie et qu'une molécule qui bloquerait le récepteur de l'orexine, empêchant l'orexine d'agir, serait un nouveau type de somnifère à action rapide.

Lire sur les lèvres

Pour améliorer la reconnaissance de la parole dans un environnement bruyant, un ordinateur, nommé *NLips*, est associé à une caméra qui suit le mouvement des lèvres de la personne qui parle. Un réseau de neurones interprète le mouvement des lèvres, qu'il décompose en «visèmes», tout comme un discours est décomposé en phonèmes. La confrontation de l'interprétation donnée par le programme de reconnaissance de la parole et de celle qui fournit le décodage des visèmes améliore la probabilité d'interprétation correcte des discours.

Des jumelles antagonistes

Une protéine végétale offre de nouvelles pistes pour des antibiotiques inédits.

Mauvaise nouvelle pour les anthropocentristes : les biologistes ont découvert de nouvelles molécules que nous partageons avec les mouches et avec les bactéries. Bonne nouvelle pour la médecine : la découverte de molécules communes aux végétaux et aux bactéries pourrait conduire à la production d'antibiotiques.

Les formes vivantes, bactériennes, animales et végétales, dérivent d'un ancêtre commun dont les descendants se sont différenciés par des mutations retenues ou éliminées par la sélection naturelle. Malgré une évolution considérable de la morphologie, certains constituants ont très peu évolué.

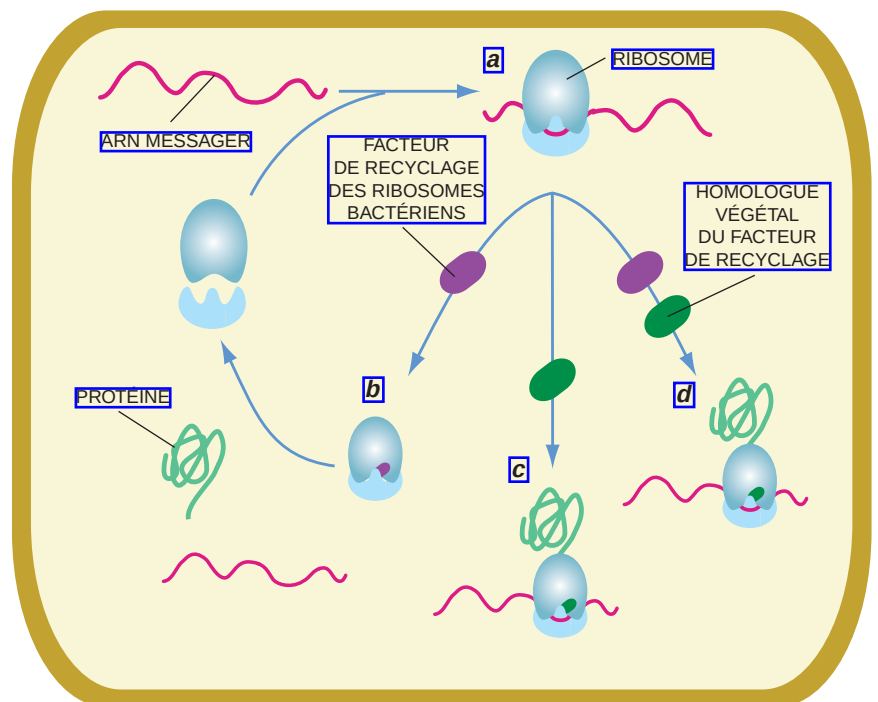
Les biologistes moléculaires sont friands de ces molécules dites homologues qui leur permettent notamment de dresser des arbres phylogéniques des espèces. Par exemple, les protéines qui gouvernent la mise en place du plan d'organisation de l'embryon sont très proches chez la drosophile et chez l'être humain. Néanmoins, deux molécules de même

structure n'ont pas nécessairement la même fonction.

Norbert Rolland et ses collègues du Laboratoire de physiologie cellulaire végétale de l'Université de Grenoble, en collaboration avec une équipe de l'Université de Philadelphie, ont montré qu'une protéine indispensable à la synthèse des protéines des bactéries, donc à leur survie, a une fonction antagoniste de celle de la protéine homologue chez les végétaux.

Chez la plupart des organismes vivants, la synthèse des protéines est assurée par de petits organites cellulaires, nommés ribosomes, qui décodent une molécule d'ARN messager transcrite à partir d'un gène, et qui assemblent les acides aminés dont l'enchaînement constitue les protéines (traduction). Dans une bactérie, lorsque le ribosome rencontre un signal *Stop* sur l'ARN messager, une protéine, nommée «facteur de recyclage des ribosomes», sépare les différents éléments : la protéine synthétisée part assurer sa fonction, tandis que le ribosome est prêt à recommencer une nouvelle traduction. Le facteur garantit également la fidélité de la traduction.

Les biologistes recherchaient l'homologue végétal du facteur de recyclage des ribosomes. Pourquoi rechercher une protéine à l'origine bactérienne dans une cellule végétale? Parce que les animaux et les végétaux sont constitués de cellules contenant un noyau, où se trouve



Dans une bactérie, le ribosome se fixe sur l'ARN messager qu'il traduit en une protéine (a). L'opération se termine lorsque le Facteur de recyclage des ribosomes se lie au ribosome (b) : les éléments se séparent et le ribosome peut traduire un nouvel ARN messager. L'homologue végétal du Facteur de recyclage des ribosomes, seul (c) ou en présence de la protéine bactérienne (d), empêche la séparation des éléments. La bactérie ne peut plus synthétiser de protéines : elle meurt.



Le chloroplaste des végétaux contient des protéines homologues aux facteurs bactériens de recyclage. Ici, ces protéines ont été marquées par des anticorps (petits grains sombres).

La majorité de l'information génétique, ainsi que des petits organites : les cellules végétales abritent des chloroplastes, sièges de la photosynthèse, tandis que des mitochondries, productrices d'énergie, sont présentes aussi bien dans les cellules animales que végétales. Ces organites sont en réalité des bactéries primitives qu'une cellule ancestrale a assimilées et «mises à son service». Les gènes ancestraux et la machinerie cellulaire qu'ils ont conservés leur confèrent une autonomie vis-à-vis de la cellule, pour laquelle ils synthétisent des protéines vitales.

Néanmoins, tous les gènes ne sont pas restés dans les organites. Les deux équipes ont trouvé le gène de l'homologue du facteur de recyclage des ribosomes dans le noyau des cellules végétales : le gène de la bactérie primitive transformée, génération après génération, en chloroplaste, a migré vers le noyau.

Pour savoir si le facteur de recyclage végétal est homologue au facteur bactérien, les biologistes ont inséré le gène végétal dans le génome d'une bactérie *Escherichia coli* dont le gène du facteur de recyclage des ribosomes avait été inhibé : les bactéries n'ont pas survécu, c'est-à-dire que le produit du gène introduit n'a pas remplacé la protéine dont le gène avait été supprimé. Les protéines codées par ces deux gènes ne sont pas équivalentes. Les biologistes ont ensuite introduit le gène végétal isolé dans une bactérie où le gène homologue n'était pas inhibé : là encore, les bactéries ont succombé.

Qui plus est, une seconde série d'expériences a montré que la protéine végétale inhibe la protéine bactérienne. Les deux facteurs de recyclage des ribosomes sont similaires, ils se fixent tous les deux sur le ribosome, mais les petites différences résultant de l'évolution séparée des espèces, procurent à la protéine végétale un pouvoir bactéricide : il empêche la bactérie de synthétiser des protéines.

Selon les deux équipes, on dispose peut-être d'une nouvelle substance végétale antibactérienne qui jouerait le rôle d'antibiotique.

Rencontres scientifiques de la région Centre 1999

"Les Energies"

Programme de la journée du 9 décembre 1999
À la Halle aux grains de Blois

☞ 9H00-9H30 :

Accueil et ouverture
par le président de la
Région Centre

☞ 9h30-10H10 :

Energie et société

☞ 10H10-10H30 :

Discussion

☞ 10H30-11H10 :

Energie nucléaire

☞ 11H10-11H30 :

Discussion

☞ 11H30-12H10 :

Energie fossile et effet
de serre

☞ 12H10-12H30 :

Discussion

Repas

☞ 14H00-14H40 :

Transports et énergie :

☛ Automobile

☛ Spatial

☞ 14H40-15H00 :

Discussion

☞ 15H00-15H40 :

Energies renouvelables

☞ 15H40-16H00 :

Discussion

☞ 16H00-16H40 :

Les énergies du futur

☞ 16H40-17H00 :

Discussion

☞ 17H00-17H15 :

Conclusion

Renseignements et inscriptions auprès de la **Région Centre** :
Direction de la communication,
02.38.70.30.36 ou 02.38.70.30.53



Vaincre la dépendance

Une nouvelle molécule aidera peut-être les toxicomanes à arrêter de se droguer.

Les drogués à la cocaïne ou à l'héroïne entrent dans une spirale dont ils sortent difficilement, la consommation de drogue entraînant accoutumance et dépendance. Ceux qui veulent arrêter de se droguer utilisent parfois des substances qui masquent l'effet de manque, en se substituant à la drogue. Ces molécules ne sont pas, elles non plus, dépourvues d'effets secondaires et ne résolvent pas le problème de la dépendance. Des équipes françaises et britannique ont conçu une molécule qui n'agit pas comme une drogue et qui, parce qu'elle se fixe sur un seul type de récepteurs de la dopamine mis en jeu dans les phénomènes de dépendance, aiderait les toxicomanes à vaincre l'effet de manque.

Toutes les drogues, de la cocaïne ou de l'héroïne à la nicotine, agissent en activant les neurones à dopamine, un neuromédiateur cérébral du «système de la récompense». La cocaïne, par exemple, inhibe la recapture de la dopamine (voir la figure), et l'héroïne active la libération du neuromédiateur. Plus les neurones dopaminergiques (ceux qui libèrent la dopamine) sont activés, plus ils libèrent le neuromédiateur et plus le nombre de récepteurs activés par la dopamine augmente dans la zone où se projettent ces neurones, c'est-à-dire dans le noyau accumbens, dont le rôle est essentiel dans

le circuit du plaisir. Lorsque la drogue cesse d'agir, le système se remet au repos, laissant le toxicomane dans un état de malaise profond : il ressent des douleurs, une sensation de mal-être et une envie irrésistible de consommer à nouveau de la drogue, surtout quand il est exposé aux stimulus environnementaux associés à la prise de drogue (la vue d'une seringue, un lieu particulier).

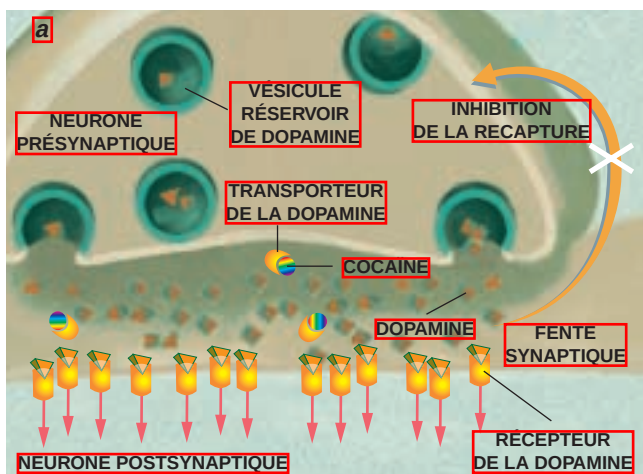
En 1989, Pierre Sokoloff et ses collègues de l'unité INSERM 109, dirigée par Jean-Charles Schwartz, avaient découvert un nouveau type de récepteurs de la dopamine, les récepteurs D_3 . Ils sont spécifiques de la dopamine et localisés dans le noyau accumbens. P. Sokoloff et ses collègues ont alors cherché une molécule qui se fixerait spécifiquement sur ce récepteur, pensant qu'elle aurait une action sur le système de la récompense. Avec Camille Wermuth et ses collègues de l'unité CNRS ERS 655, ils ont conçu de telles molécules et ont sélectionné la molécule BP 897.

En collaboration avec Barry Everitt, de l'Université de Cambridge, ils ont alors étudié l'effet de la molécule sur des rats drogués à la cocaïne. Ces rats ont été préalablement conditionnés : à chaque prise de drogue, une lumière s'allume et, après plusieurs expériences, la lumière déclenche le comportement d'auto-administration (les rats peuvent s'auto-administrer la drogue en appuyant sur un levier qui la délivre). Les tests sur l'animal ont montré que, chez des rats sous l'emprise de la cocaïne, le BP 897 ne modifie pas l'action de la drogue : les rats continuent à s'auto-administrer de la cocaïne. En l'absence de cocaïne, le BP 897 n'a pas les effets d'une drogue, puisque les rats n'ont pas tendance à se l'auto-administrer.

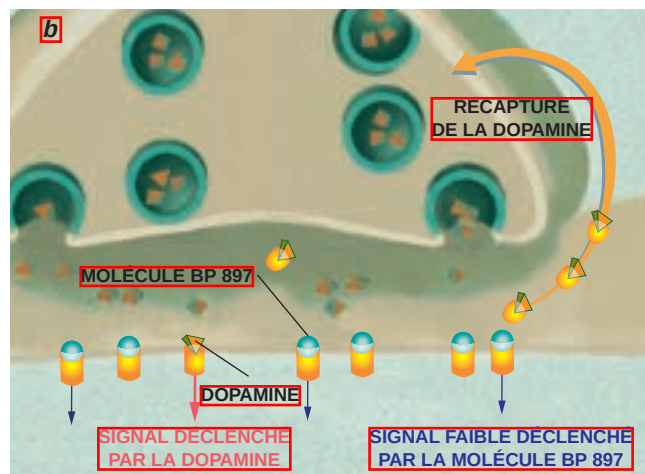
En outre, le BP 897 a la propriété, jusqu'alors sans précédent, d'inhiber le stimulus conditionnant, car, en présence de la lumière qui déclenche normalement l'auto-administration de drogue, les rats ne réagissent pas. On en déduit que le BP 897 n'agit pas comme une drogue, qu'il est sans action quand les rats sont sous l'emprise de la cocaïne, mais, qu'en l'absence de drogue, il masque le manque.

Comme la dopamine, la molécule BP 897 se fixe sur les récepteurs D_3 , mais elle ne les active pas tous, de sorte que le signal transmis par les récepteurs stimulés est moins intense que le signal transmis par la dopamine. Ainsi, bien que les récepteurs soient saturés, l'activation du système dopaminergique est notablement inférieure à celle que produit une drogue. La molécule BP 897 est en fait un agoniste partiel, ou encore un agoniste-antagoniste : sur certains récepteurs, elle agit comme la dopamine (bien que le signal transmis soit inférieur) et sur d'autres récepteurs, elle bloque l'activation (c'est alors un antagoniste).

Cette molécule n'agit pas comme une drogue, donc ne créerait pas de nouvelle dépendance ; très spécifique, elle n'aurait pas d'effets secondaires néfastes (tels des troubles moteurs ou mnésiques) ; elle semble inhiber les stimulus conditionnants, donc bloquerait les circuits qui, à la vue de l'objet conditionnant, déclenchent le besoin irrésistible de drogue. Toutefois, plusieurs questions subsistent : pourquoi la fixation de la molécule BP 897 inhibe-t-elle les stimulus conditionnants ? Cette molécule serait-elle efficace à long terme ? Les premiers essais cliniques visant à évaluer l'effet de la substance sur des fumeurs voulant arrêter de fumer sont prévus au début de l'an 2000.



La dopamine, un neuromédiateur, n'agit normalement que de façon temporaire : elle est recyclée dans le neurone qui la libère par un mécanisme de recapture. La cocaïne se fixe sur les transporteurs de la dopamine, empêchant la recapture du neuromédiateur, qui s'accumule alors dans la fente synaptique (a). Les neurones sont alors activés par plusieurs mécanismes : la concentration en dopamine et



le nombre de ses récepteurs activés augmentent. La molécule BP 897 se fixe sur les récepteurs postsynaptiques de la dopamine, empêchant le neuromédiateur de s'y fixer, mais elle n'en active que certains : le signal émis est inférieur au signal déclenché par la dopamine (b). En n'activant que partiellement le système dopaminergique, cette molécule supprimerait l'effet de manque.

Vulcanisation précolombienne

Comment les Olmèques fabriquaient le caoutchouc.

A leur arrivée en Amérique centrale, au XVI^e siècle, les Espagnols découvrent le caoutchouc, matériau étonnant aux nombreux usages : fabrication de balles, de figurines et de bandes pour emmancher des outils de pierre, imperméabilisation de toiles, de vêtements et de chaussures. Des chroniqueurs du XVI^e siècle rapportent que les Aztèques le fabriquaient en mélangeant le jus d'une liane au latex. Quelles transformations chimiques faisaient-ils ainsi subir à ce dernier ?

Si on se contente de faire sécher le latex brut, matière première du caoutchouc, il est cassant lorsqu'il est froid, collant et nauséabond lorsqu'il est chaud. Depuis les travaux des chimistes Friedrich Ludersdorf et Nathaniel Hayward, rapidement développés par Charles Goodyear à partir de 1839, on remédie à ces défauts en vulcanisant le caoutchouc : du soufre qu'on lui incorpore à chaud établit des liaisons entre les longues molécules du polymère.



Des morceaux de caoutchouc comme celui-ci, découverts sur des sites précolombiens d'Amérique centrale, témoignent de la transformation du latex depuis au moins 3 600 ans.



Venez participer à cet échange de savoir-faire avec des experts de haut niveau !

Comment optimiser la fabrication de vos produits émulsionnés ?

Séminaire à Paris, les mercredi 24 et jeudi 25 novembre 1999

Du laboratoire à la production, la méthodologie pour améliorer la qualité de vos produits

- ▼ Quelles sont les notions essentielles pour comprendre les émulsions ?
- ▼ La formulation, la stabilité du mélange, ...
- ▼ Quelles sont les différentes technologies utilisées à connaître ?
- ▼ Quels sont les éléments à maîtriser pour optimiser le transfert d'échelle du laboratoire au centre de production ?
- ▼ Comment rédiger son cahier des charges pour retenir le meilleur équipement ?
- ▼ Quels sont les enseignements à retenir de différents secteurs industriels : le médical, l'alimentaire, la pharmacie, la cosmétique, ... ?

Pour plus de renseignements :

M/Mme, Prénom, Nom
 Fonction Service
 Société
 Tél. direct Fax direct
 E-mail
 Adresse
 Code postal, ville

☐ Je souhaite recevoir le programme de ce séminaire de formation.
 La demande est à adresser à Euroforum, 35 rue Greneta,
 75002 PARIS, ou par fax au 01 44 88 14 99,
 ou par E-mail : fma@euroforum.fr

La méthode décrite par les chroniqueurs espagnols s'est toutefois perpétuée jusqu'à aujourd'hui, notamment au Chiapas, province du Sud-Ouest du Mexique, au moins dans ses grands principes. Après incision d'un arbre, le *Castilla elastica*, les autochtones récoltent du latex, émulsion blanche, laiteuse et collante. Ils ajoutent à ce liquide visqueux le jus extrait d'une liane, *Ipomea alba*, et obtiennent, après une quinzaine de minutes, un solide qui prend en masse et qui peut être modelé.

Le latex de *Castilla elastica* est une émulsion, composée de gouttelettes d'un polymère, le cis-1,4-polyisoprène, dispersées dans une phase aqueuse. Des molécules organiques, parmi lesquelles des protéines, sont dissoutes dans ces deux phases. Le jus d'*Ipomea alba* contient des hydrocarbures et des composés soufrés.

Selon D. Hosler, S. Burkett et M. Tarkania, de l'Institut de technologie du Massachusetts, qui ont analysé des latex anciens par spectrométrie infrarouge et par spectrométrie de masse, l'ajout au latex de jus d'*Ipomea alba* déstabilise l'émulsion : le polymère et la phase aqueuse se séparent. Les molécules soufrées du jus de la liane réagissent avec les chaînes de polymère du latex et créent de nouvelles liaisons entre ces chaînes, ce qui accroît leur cohésion. La viscosité du polymère semble également augmentée par l'élimination, dans la phase aqueuse, de toutes les autres molécules organiques, que l'on ne retrouve pas dans le caoutchouc à la fin du traitement et dont certaines seraient responsables de la faible viscosité du latex brut.

Les plus anciennes boules de caoutchouc que nous connaissons en Amérique centrale ont été fabriquées 1 600 ans avant notre ère, par les Olmèques. Les analyses, par résonance magnétique nucléaire, d'échantillons de ces boules confirment l'utilisation du latex de *Castilla elastica* comme matière première : elles contiennent du cis-1,4-polyisoprène. Même si les Olmèques ne connaissaient pas les mécanismes chimiques sous-jacents, ils auraient donc découvert la vulcanisation, au moins partielle, du latex, il y a 3 600 ans. Cette invention a permis la fabrication de balles, dont les rebonds à plus de deux mètres de haut impressionnèrent Hernán Cortés lui-même. Les jeux organisés avec ces balles, sur des courts construits exprès, avaient une place très importante dans les cultures d'Amérique centrale : ils donnaient lieu à des manifestations sportives, mais aussi religieuses et politiques.

Martine REGERT, UMR 171, CNRS-LRMF

Couleurs chaudes

Des peintres préhistoriques ont synthétisé des pigments par chauffage.

Il y a environ 35 000 ans, en Europe, des hommes commencent à peindre des parois de grottes. Sans doute d'autres avaient-ils peint bien avant des objets, ou leur propre corps. Bien que leurs motivations et le sens de leur art nous échappent, nous pouvons retrouver quelles techniques et quelles matières premières ils utilisaient. Ainsi, ces peintres paléolithiques ont parfois préparé des pigments rouges en chauffant des minéraux d'autres couleurs.

Au début du ^{xx}^e siècle, les préhistoriens s'accordent sur l'ancienneté des grottes ornées du Paléolithique. Des chimistes analysent alors les pigments préhistoriques avec lesquels les peintures et les dessins ont été réalisés. Les deux couleurs dominantes sont le rouge, souvent improprement appelé ocre, et le noir. Le rouge provient d'un oxyde de fer, l'hématite. Pour le noir, il s'agit de charbon de bois ou d'oxydes de manganèse.

Quelle était l'origine de ces pigments ? L'hématite est abondante dans les sols naturels, mais elle est aussi obtenue par chauffage, à plus de 250 °C, d'un hydroxyde de fer, la goethite, de couleur jaune. Or, on a trouvé, dans plusieurs sites, tels la Grotte du Renne d'Arcy-sur-Cure, dans l'Yonne, ou le gisement de La Ferrassie, en Dordogne, des oxydes de fer de diverses couleurs, du jaune au rouge violacé, à l'intérieur de foyers, dans leur proximité immédiate ou dans des cendres.

Comment déterminer l'origine de l'hématite utilisée par les hommes préhistoriques ? Nous avons synthétisé de la goethite en laboratoire, et nous l'avons chauffée, entre 200 °C et 1 000 °C. Le matériau obtenu par chauffage à plus de 270 °C se différencie de l'hématite naturelle par deux caractéristiques principales : d'abord, l'élargissement anormal de plusieurs raies de diffraction des rayons X révèle une moindre régularité des cristaux d'hématite synthétique ; ensuite, ces cristaux synthétiques sont poreux, en raison de poches de quelques nanomètres de diamètre qui contiennent des molécules d'eau ; à mesure du chauffage, ces molécules d'eau migrent vers la surface des cristaux et, finalement, s'échappent.

Le même type d'analyses, effectuées sur des blocs d'hématite découverts



Le pigment rouge des peintures rupestres, ici à la grotte de Cougnac, dans le Lot, était de l'hématite.

dans le site de Troubat, dans les Hautes-Pyrénées, occupé d'environ 11 000 à 6 500 avant notre ère, a révélé qu'environ 25 pour cent de ceux-ci proviennent de goethite chauffée. En outre, d'autres phases minérales associées à l'hématite synthétique confirment son identification : en particulier, le chauffage de goethite en présence de matière organique produit un autre oxyde de fer, la maghémite.

Cette hématite synthétique a-t-elle été utilisée pour peindre ? Nous avons prélevé des cristaux d'hématite sur des peintures pariétales de la grotte de Lascaux, en Dordogne, réalisées il y a environ 20 000 ans, et sur des blocs retrouvés au pied des parois. La similitude morphologique des cristaux confirme que les blocs ont servi à la réalisation des peintures, mais nous n'avons détecté aucune trace de chauffage dans cette hématite : elle est très pure et présente des cristaux en feuillets minces de grande taille, caractéristiques d'une croissance naturelle.

Les peintres de Lascaux ignoraient-ils la synthèse de l'hématite ? Bien approvisionnés en pigment de bonne qualité, n'éprouvaient-ils simplement pas le besoin d'en fabriquer ? À moins que leur tâche n'ait été trop sacrée pour qu'il recourait à des colorants artificiels.

Marie-Pierre POMIÈS, Colette VIGNAUD et Michel MENU, LRMF

Le photon dans la boîte

Comment voir et revoir un photon.

Les physiciens savent détecter les photons individuellement, mais ils détruisent généralement ces fragiles particules élémentaires. La mécanique quantique — qui est de règle à cette échelle — indique toutefois que cette destruction est évitable ; elle n'impose que la perturbation des particules détectées. C'est ce qu'a démontré expérimentalement l'équipe de Serge Haroche, de l'École normale supérieure de Paris : en piégeant un photon dans une boîte (une cavité supraconductrice), les physiciens ont pu le «voir» sans l'absorber, de sorte qu'ils ont pu ensuite le «revoir».

La physique classique admet que la mesure est une opération neutre. Par exemple, on mesure la vitesse moyenne d'un train, à l'aide de repères et d'un chronomètre, sans perturber le mouvement du train. C'est que le train est «macroscopique» par rapport aux photons que l'on observe pour mesurer sa vitesse. Il en va tout autrement quand on s'intéresse à des objets microscopiques, tels des atomes. Si l'on veut repérer un atome, on peut observer les photons qu'il diffuse, mais le rebond des photons sur l'atome crée une force de recul qui modifie la vitesse de l'atome. La mécanique quantique stipule qu'à toute mesure de la

position d'un atome est associée une perturbation de sa vitesse. La perturbation est d'autant plus forte que la mesure est précise.

Quelle que soit la grandeur mesurée, la mécanique quantique prédit qu'il existe une autre grandeur «incompatible», nommée la variable conjuguée, qui subit le contrecoup de la mesure. Quand on veut mesurer le nombre de photons d'une onde lumineuse, la variable conjuguée est alors la phase de l'onde. Ainsi, le «coût» quantique minimal inhérent à la mesure du nombre de photons est une perturbation de la phase du champ électromagnétique de l'onde. Toutefois, un tel déphasage du champ ne modifie pas son énergie, de sorte qu'en principe on peut compter des photons sans les détruire.

L'idée de l'expérience consiste à faire passer un atome dans une cavité où l'on a stocké des photons : la fonction d'onde de l'atome est déphasée par les photons, et ce déphasage révèle le nombre des photons. En pratique, la stratégie utilisée doit éviter tout échange d'énergie entre les photons et l'atome. Les échanges d'énergie entre photons et atomes ne se produisent que si l'énergie d'un photon coïncide avec l'énergie d'une transition atomique (on nomme cette coïncidence condition de résonance). Pour éviter tout échange d'énergie entre un photon et un atome, on utilise donc des atomes dans un état non résonant. En mesurant le déphasage de la trajectoire d'un des électrons de ces atomes produit par la présence des photons, on obtient une information sur le nombre de photons n'ayant subi aucun échange

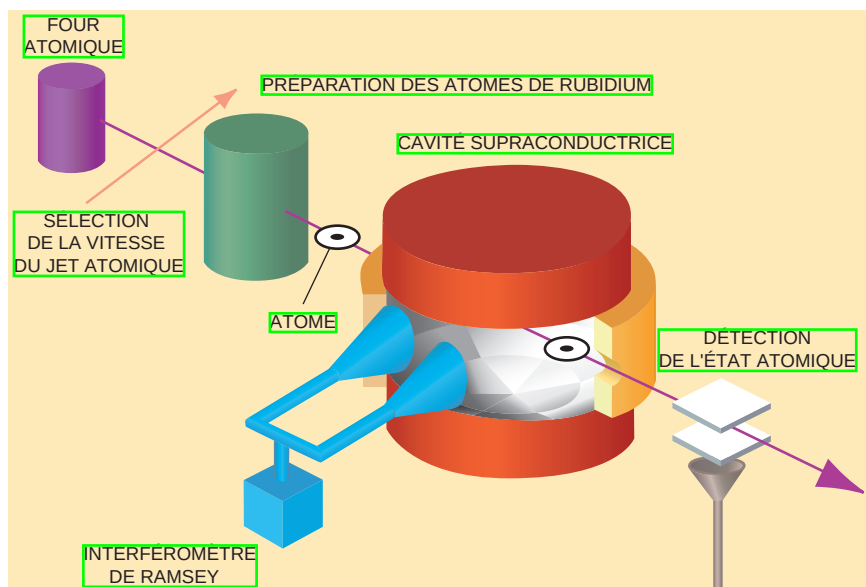
d'énergie. On montre que ce déphasage est proportionnel au nombre de photons. Ce scénario de mesure non destructive, déjà proposé il y a quelques années par la même équipe de l'École normale, est difficile à réaliser, car si l'interaction de l'atome et des photons est non résonante, le déphasage — que l'on cherche à mesurer — est très petit.

Aussi, les physiciens ont mis des atomes dans un état résonant avec le champ électromagnétique. L'interaction est alors notablement supérieure à celle que l'on déclenche dans un cas non résonant. À condition que la cavité ne contienne que zéro ou un photon, on peut encore utiliser une stratégie de détection non destructive, qui repose sur la réversibilité de l'échange d'énergie entre un atome et un photon : on s'arrange pour que, si le photon à détecter est absorbé par l'atome, il soit toujours réémis avant qu'il ne quitte la cavité. Le photon est ainsi préservé. De surcroît, il laisse sa trace dans le mouvement d'oscillation d'un des électrons de l'atome qui, après un cycle d'absorption-émission, est en opposition de phase par rapport au cas où la cavité aurait été vide.

Pour leur expérience, les physiciens ont utilisé une cavité de niobium, une petite boîte dont les parois sont réfléchissantes. On rend la cavité supraconductrice en la refroidissant avec de l'hélium liquide. La réflectivité des parois est telle qu'un photon dont la longueur d'onde appartient au domaine des micro-ondes est réfléchi 100 millions de fois avant d'être absorbé : il subsiste plus d'une milliseconde (avec des miroirs ordinaires, un tel temps de stockage ne pourrait être atteint et le photon disparaîtrait avant même qu'un atome sonde n'ait le temps de le détecter).

C'est un jet d'atomes de rubidium, qui traverse la cavité pour déterminer le nombre de photons qui s'y trouvent. Un des électrons de l'atome qui traverse la cavité est porté à un niveau d'énergie très élevé, nommé niveau de Rydberg : il est en résonance avec les photons stockés dans la cavité.

L'information sur le champ est codée dans la phase de l'électron dont le mouvement a été modifié. Lorsque l'atome quitte la cavité, on mesure cette phase, par une méthode d'interférométrie. Dans une première expérience, les physiciens ont montré que la phase de la trajectoire électronique est effectivement sensible à la présence d'un seul photon déposé dans la cavité par un premier atome utilisé comme émetteur. Puis, les physiciens ont envoyé un second atome sonde qui leur a permis de voir le même atome une seconde fois : ils ont ainsi montré que la première détection n'avait pas été destructive.



Les photons à détecter sont stockés dans une cavité supraconductrice, une sorte de boîte à photons. Des atomes de rubidium sont préparés afin d'interagir avec le champ du photon de la cavité. La sélection des vitesses des atomes permet de connaître leur positions individuelles. Un interféromètre, couplé à l'intérieur de la boîte, mesure la phase de la fonction d'onde de l'atome. La valeur de cette phase indique si la boîte contient ou non un photon.

Un gâteau marbré

L'analyse chimique de minéraux éclaire les mécanismes de formation de la croûte terrestre et la recette du gâteau marbré.

Les géologues sont friands d'images pâtisseries : ils expliquent la formation et la composition de la croûte terrestre par le modèle du gâteau marbré. En analysant des échantillons rocheux marocains, Francis Albarède et Janne Blichert-Toft, de l'École normale supérieure de Lyon, et Jacques Kornprobst, de l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, ont précisé la recette, donnée en 1986 par Claude Allègre et Don Turcotte.

La croûte terrestre est composée de plaques solides (océaniques et continentales) qui se déplacent à la surface d'un manteau de roches dont l'état varie selon la température et la pression : solides à la surface du manteau, car la température est trop faible pour compenser la pression, elles sont plus visqueuses en profondeur. Aux dorsales océaniques, qui marquent la limite entre les plaques océaniques adjacentes, des roches en fusion s'échappent, tandis que les deux plaques s'éloignent. À quelques centaines ou milliers de kilomètres de là, une de ces plaques océaniques est bloquée par une plaque continentale : dans certains cas, la plus dense des deux (la plaque océanique) glisse sous l'autre et s'enfonce dans les entrailles de la Terre par un mécanisme nommé subduction (voir la figure ci-dessous). Les

roches rejoignent alors le manteau, et émergeront à nouveau aux dorsales océaniques après quelques millions d'années. Que se passe-t-il dans le manteau ?

La croûte océanique est composée de basalte et de pyroxénites, des roches volcaniques homogènes, mêlés à des péridotites, des silicates de magnésium et de fer, qui constituent le manteau solide.

Le modèle du gâteau marbré, élaboré à partir de l'analyse d'échantillons de laves de volcans marins et de croûte océanique, stipule que les roches de la croûte terrestre, après subduction, sont véhiculées à travers le manteau visqueux par des courants de convection. La pression et la température élevées les transforment en pyroxénites et en basalte qui remontent ensuite vers la surface. Elles se liquéfient lorsque la pression a suffisamment diminué, et se mélangent aux péridotites du manteau lors de l'ascension (voir la figure ci-dessus).

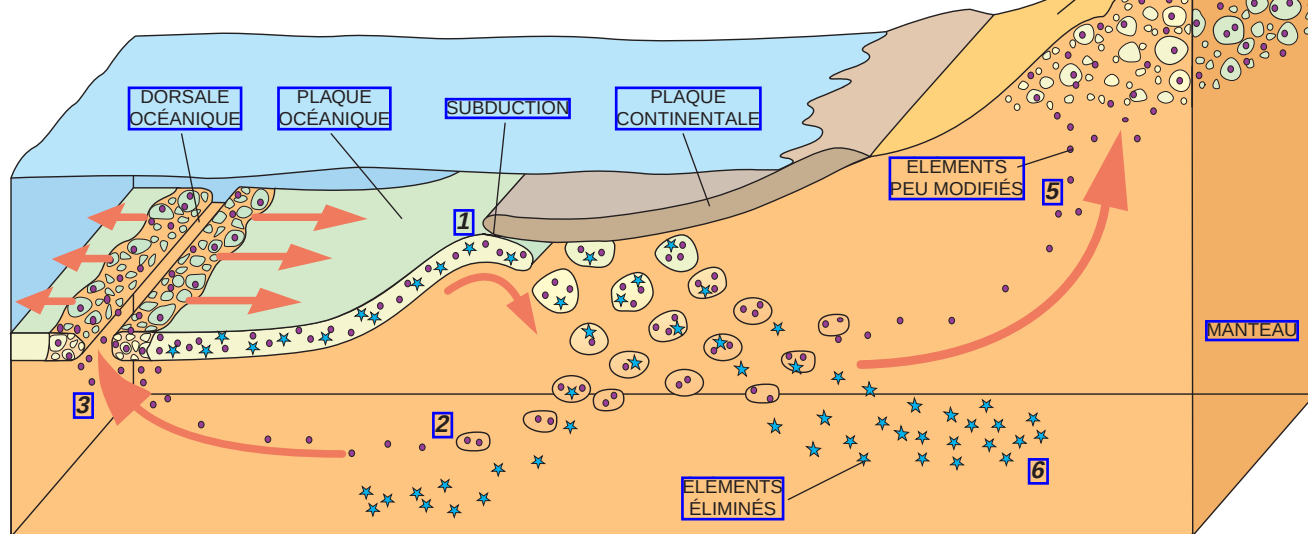
F. Albarède, J. Blichert-Toft et J. Kornprobst ont prélevé et analysé des échantillons du massif de Beni Bousera, au Maroc. Cette région intéresse les géologues à plus d'un titre : la présence de diamants indique que les roches proviennent de plus de 150 kilomètres de profondeur ; de plus, la composition en isotopes de l'oxygène montre qu'elle est un affleurement du manteau à la surface de la Terre. Une aubaine pour les géophysiciens qui disposent ainsi d'une portion du manteau figé et accessible !

Le mélange hétérogène de pyroxénite et de péridotite que l'on trouve dans le massif marocain confirme le modèle du gâteau

marbré. A l'aide d'un spectromètre de masse précis, les trois géophysiciens ont analysé les quantités de deux éléments chimiques présents dans les grenats (des silicates rouges sombres) contenus dans les pyroxénites : le hafnium et le lutétium. Ce dernier se désintègre à une vitesse connue et se transforme en hafnium. Ainsi, les proportions de ces deux éléments ont permis de dater à 25 millions d'années l'émergence du massif marocain.

Toutefois, l'intervalle de variation des quantités de hafnium radioactif dans les différents échantillons prélevés est bien supérieur à celui de tous les autres basaltes étudiés. De plus, l'analyse chimique fine des échantillons a révélé la présence d'éléments chimiques issus de la croûte océanique, qui « survivent » donc aux conditions extrêmes de pression et de température du manteau. Selon les trois géophysiciens, les deux observations montrent que des réarrangements se produisent au sein du manteau : certains éléments sont oubliés lors de l'ascension de la lave, d'autres subissent des transformations incomplètes sans fondre suffisamment pour être intégrés au basalte. Cette sélection s'effectue à 100 kilomètres de profondeur.

Le gâteau marbré n'apparaît plus comme un simple mélange de deux composants. Au contraire, le pâtissier géologue semble exigeant : il trie ses ingrédients et n'en sélectionne que certains.



Les plaques de la croûte terrestre s'enfoncent sous une plaque continentale (subduction) et intègrent le manteau (1) où ils sont comprimés et chauffés. Ils sont transportés par des courants de convection (2) et remontent à la surface en se mélangeant à des

péridotites (3). L'analyse des roches de Beni Bousera (4), au Maroc, a montré que certains constituants de la croûte restent presque intacts après leur passage à travers le manteau (5), tandis que d'autres sont abandonnés pendant l'ascension (6).

LA RÉTINOPATHIE DIABÉTIQUE ET LE DOBÉSILATE DE CALCIUM



OM

P H A R M A

■ POUR LA
SCIENCE

Pour prévenir les complications de la rétinopathie diabétique

Des spécialistes réunis lors d'un symposium international à Genève ont montré que le dobésilate de calcium stabilise la progression des complications de la rétinopathie diabétique au niveau de la rétine.

L'un des livres de l'humoriste américaine Phyllis Diller était intitulé *Les agréments de la vieillesse, ou comment les éviter*. Les sociétés pharmaceutiques s'attachent à lutter contre les incapacités liées à l'âge, dont l'importance croît avec l'augmentation de la durée de vie. Ainsi les atteintes à la qualité de vie liées au diabète : en 1995, 100 millions de personnes dans le monde étaient diabétiques et, selon l'Organisation mondiale de la santé, en l'an 2000, la proportion atteindra 10 pour cent de la population dans les pays industrialisés.

La rétinopathie diabétique, la complication la plus fréquente du diabète, est chez ces patients, la principale cause de cécité. Le corps médical ne dispose pas de traitement curatif de la maladie, mais une substance, le dobésilate de calcium commercialisé par la Société OM PHARMA, est aujourd'hui indiquée pour retarder le cours de la maladie et réduire les troubles visuels d'origine vasculaire.

Le diabète de type I touche environ 10 pour cent de la population, souvent des personnes jeunes : ce diabète insulino-dépendant contraint ces personnes à subir des injections régulières d'insuline, l'hormone qu'ils ne produisent plus et qui est indispensable à la normalisation de la concentration en glucose dans l'organisme. Le diabète de type II touche surtout les adultes sujets à l'embonpoint. Il représente 90 pour cent des cas de diabète. Un régime pauvre en glucides et des médicaments suffisent généralement à

normaliser la concentration sanguine en glucose. Toutefois, le traitement par l'insuline finit souvent par être nécessaire.

Les complications du diabète sont nombreuses : troubles de la vue et du système cardio-vasculaire, notamment, altérations du système nerveux et des reins. Les maladies coronariennes sont quatre fois plus nombreuses chez les femmes diabétiques que dans la population générale (deux fois chez les hommes).

Une personne diabétique sur deux environ finit par souffrir de rétinopathie diabétique et le risque augmente avec l'âge. Cette maladie résulte d'une détérioration de la rétine, laquelle est constituée d'une zone centrale, la macula, où la perception visuelle est maximale, et d'une zone périphérique (qui représente 95 pour cent de la surface de la rétine). Cette dernière zone est responsable de la vision périphérique. En revanche, la vision des couleurs et des détails, la reconnaissance des visages, ou celle des lettres est assurée par la macula.

NEOVAISSEAUX ET EXSUDATS

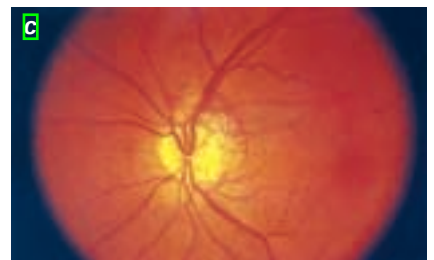
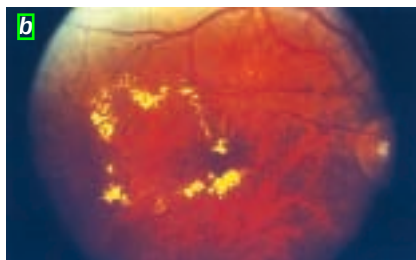
L'intégrité du système circulatoire des diabétiques est menacée par l'excès de sucre. Les petits vaisseaux qui sillonnent la rétine sont normalement étanches, mais, chez les diabétiques, la paroi de ces vaisseaux perd son imperméabilité et du liquide, plasma ou sang, s'en échappe. Les liquides s'infiltrent dans la rétine, dont le fonctionnement est perturbé ; l'acuité visuelle

diminue. C'est la rétinopathie diabétique non proliférative, la forme la plus fréquente de cette affection.

Outre ces accumulations de fluide, certains capillaires qui sillonnent la rétine se ferment, de sorte que la rétine, dont le bon fonctionnement dépend d'un approvisionnement adéquat en éléments nutritifs, est asphyxiée. De nouveaux vaisseaux se forment, qui tentent de compenser l'anomalie. Malheureusement, ils sont anormaux, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas étanches : les « fuites » s'intensifient. Au cours de cette phase de la maladie, la rétinopathie diabétique pré-proliférative, le fluide qui s'échappe des microvaisseaux s'accumule dans la macula et dans le vitré, la masse visqueuse transparente située entre le cristallin et la rétine.

Enfin, au stade ultime, les œdèmes se multiplient : c'est la rétinopathie proliférative. On constate alors l'obstruction de nombreux vaisseaux, des hémorragies dans le vitré et des décollements de rétine : le sang coagule et des tissus cicatriciels se forment ; ancrés sur la surface postérieure du vitré et sur la rétine, ils exercent une traction qui finit par déformer la rétine. De tels décollements de la rétine sont responsables de cécité : aussi, les néovaisseaux et les tissus cicatriciels doivent être éliminés.

Les exsudats localisés en périphérie dégradent peu la vision. Quand le sang s'accumule au centre de la rétine, les images sont brouillées, déformées et assombries. Généralement, les deux yeux sont touchés, parfois à des degrés divers. Lorsque la macula est lésée des deux



Au cours d'une rétinopathie diabétique, l'aspect de la rétine évolue. Par rapport à une rétine normale (a), on constate une multiplication des vaisseaux, lesquels sont anormaux : du sang s'en

échappe (b, les exsudats apparaissent en jaune) et la rétine s'épaissit. Au stade de la rétinopathie proliférative, les néovaisseaux se multiplient (c).

côtés, la vision centrale de précision est fortement diminuée. Quand la vision périphérique persiste une rééducation adaptée permet aux malades de mieux utiliser la vision périphérique : même s'ils ne voient plus les détails, ils peuvent encore s'orienter dans l'espace, et poursuivre certaines activités.

Environ 90 pour cent des personnes ayant un diabète depuis une vingtaine d'années ont une rétinopathie à un stade plus ou moins avancé ; parmi elles, 20 pour cent présenteront la forme proliférative.

La rétinopathie survient d'abord chez les diabétiques insulino-dépendants, où la maladie est souvent plus grave. De nombreuses personnes diabétiques découvrent leur maladie au cours d'une visite de routine chez l'ophtalmologiste, car les premiers stades de la maladie – voire des stades plus avancés, où des lésions sont déjà présentes – sont généralement asymptomatiques.

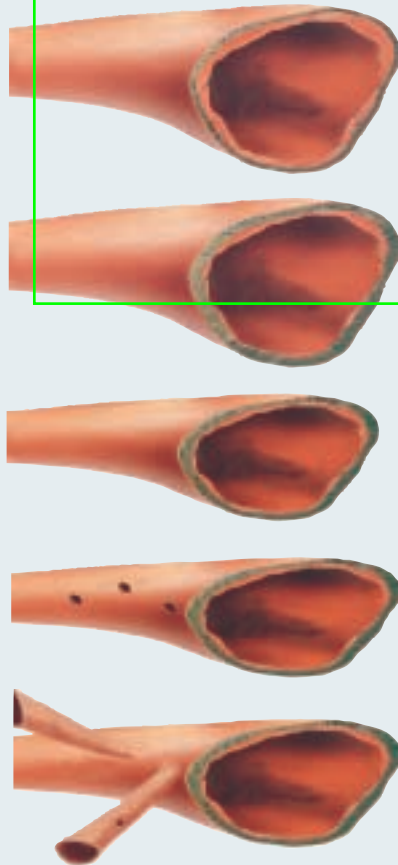
Comme l'on ne dispose pas de traitement curatif de la rétinopathie, le dépistage précoce reste crucial pour surveiller l'évolution de la maladie et préserver le plus longtemps possible la vue des diabétiques. Pour évaluer la progression de la maladie, les ophtalmologistes disposent de deux techniques de visualisation de la rétine : l'examen du fond d'œil et l'angiographie. L'examen du fond d'œil, une observation directe de la rétine, est encore très utilisé. Pourtant il n'est pas un moyen très efficace de détection précoce des anomalies de la rétine chez le diabétique.

L'angiographie permet d'observer les fuites à un stade précoce : on injecte au patient un produit fluorescent, qui est conduit par voie sanguine jusqu'à la rétine ; le médecin prend une série de photographies de la rétine, lorsque le composé fluorescent l'a atteinte. Cette méthode met bien en évidence la fermeture des vaisseaux et l'altération de la paroi des vaisseaux : lorsque la paroi est devenue hyperperméable, on observe des «fuites» qui sont un bon indicateur du degré d'atteinte de l'endothélium vasculaire.

Toutefois, certains signes, par exemple l'occlusion des capillaires, ne sont pas spécifiques de la rétinopathie diabétique et sont fréquents dans d'autres types de rétinopathie. D'autres méthodes sont en cours d'évaluation ; c'est le cas de la mesure de l'épaisseur de la rétine, qui devrait permettre aux ophtalmologistes de dépister les rétinopathies diabétiques précoces.

Plus on dépiste une rétinopathie à un stade précoce, plus les chances d'en bloquer l'évolution augmentent. D'abord parce que l'on normalise mieux la

Evolution de la rétinopathie diabétique



- Des modifications biologiques surviennent ;
- La viscosité du sang et l'agrégation plaquettaire augmentent ;
- L'endothélium est endommagé ;

- Les parois vasculaires perdent leur élasticité ;
- L'épaisseur de la membrane basale augmente ;

- Le diamètre des capillaires diminue, créant une hypertension locale ;
- Pour pallier l'hypertension, les capillaires se distendent et deviennent perméables ;

- Du fluide quitte les capillaires et s'accumule dans le milieu environnant ;
- L'oxygénation est insuffisante, provoquant une hypoxie ;

- Des facteurs de croissance de l'endothélium sont synthétisés ;
- Le système subit un stress oxydatif ;
- De nouveaux vaisseaux se forment pour compenser l'approvisionnement insuffisant en oxygène et en éléments nutritifs..

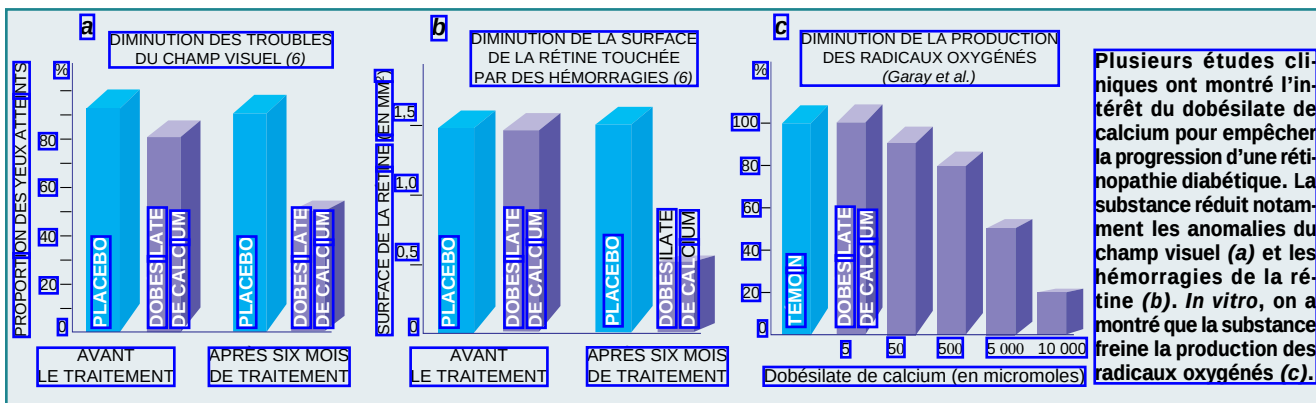
concentration sanguine en sucre. En outre, divers médicaments, qui devraient corriger les anomalies du métabolisme rétinien lié à un excès de sucre, sont en cours d'évaluation ; enfin des substances neuro- et vasoprotectrices pourraient également protéger le système nerveux et le système vasculaire (on peut notamment administrer des anti-oxydants, le stress oxydatif étant une des causes des lésions rétinienues).

LA NECESSITE D'UN DÉPISTAGE PRÉCOCE

Aujourd'hui l'arsenal thérapeutique est très limité et l'on a parfois recours à la thérapie par rayons laser : ces rayons assurent la coagulation des vaisseaux qui fuient et des néovaisseaux anormaux. La vision n'est pas améliorée pour autant, mais cette intervention empêche que la vue ne continue à se dégrader par prolifération des vaisseaux et par multiplication des exsudats. Après le traitement, le patient perçoit souvent de petites taches noires qui, normalement, s'estompent avec le temps. Malheureusement, même lorsque le traitement laser fait régresser, voire cesser les fuites, de

nouvelles zones perméables réapparaissent souvent.

Avant les manifestations cliniques, surviennent des modifications biologiques, histologiques et physiopathologiques. Un médicament qui combattrait ces modifications précoces retarderait l'apparition des troubles liés au diabète. Ainsi, l'hyperglycémie s'accompagne d'une augmentation de la viscosité du sang. Les forces de cisaillement du sang dans les capillaires augmentent, de sorte que l'endothélium vasculaire est endommagé. Certaines protéines, notamment les protéines présentes dans les parois vasculaires, subissent des modifications chimiques et diverses membranes, dont la membrane basale, s'épaississent. En outre, la paroi des capillaires perd son élasticité, et certains vaisseaux finissent par se fermer. Il en résulte une hypertension locale. Pour lutter contre ces anomalies, les parois des vaisseaux se dilatent sous l'effet de divers facteurs de croissance de l'endothélium : les capillaires se distendent, perdent leur étanchéité et des fuites se produisent. De nouveaux vaisseaux se développent sous l'effet de facteurs de croissance.



L'APPORT DU DOBÉSILATE DE CALCIUM

Dans ce contexte, le sulfonate de calcium de 2,5 dihydroxybenzène, encore nommé dobésilate de calcium, offre un apport intéressant : en agissant sur les paramètres physiologiques responsables des anomalies cliniques, il ralentit l'évolution de la maladie. Il freine l'épaississement de la membrane basale (1) et, par conséquent, la perméabilité des capillaires, ce qui réduit les fuites de sang et de plasma. Parce qu'il réduit la fragilité capillaire (2), il diminue les hémorragies rétinienues. Il limite l'effet des substances vasoactives et la desquamation des cellules endothéliales (3) et, ce faisant, restaure la structure et la fonction normales de l'endothélium vasculaire. Ainsi, il augmente la résistance des capillaires, réduit les hémorragies, et aide l'endothélium à assurer sa fonction normale.

Il agit également sur le sang : en augmentant la flexibilité des érythrocytes, il diminue la viscosité du sang (4), normalisant le flux sanguin et l'irrigation de la rétine. En réduisant la concentration en fibrinogène, il améliore la perfusion des tissus. Enfin, le dobésilate inhibe l'agrégation plaquettaire (5), ce qui réduit le risque d'occlusion des capillaires.

Le dobésilate a été testé au cours de plusieurs essais cliniques en double aveugle contre placebo sur des personnes ayant une rétinopathie diabétique proliférative. Chez ces personnes ayant des hémorragies, des exsudats, des œdèmes rétinienus, une prolifération des vaisseaux et une acuité visuelle diminuée, l'administration de dobésilate stabilise les hémorragies, les micro-anévrysmes, les exsudats, les œdèmes et l'acuité visuelle.

Des personnes non insulino-dépendantes qui présentaient un début de rétinopathie, une pression intra-oculaire élevée, une acuité visuelle inférieure à la normale, des hémorragies rétinienues et une hyperviscosité du sang et du plasma ont également été traitées. Sur 79 personnes traitées, on a constaté une

diminution (d'environ 30 pour cent) du nombre des personnes ayant des anomalies du champ visuel, et des hémorragies. Chez les personnes traitées par le dobésilate, la surface de la rétine touchée par des hémorragies a diminué de plus de 50 pour cent, tandis qu'elle augmentait de près de 3 pour cent chez les personnes traitées par le placebo (6).

Les études *in vitro* ont montré que le dobésilate réduit l'hyperperméabilité en inhibant les effets des substances vasoactives (4), en réduisant la synthèse de collagène (7), en limitant la desquamation des cellules endothéliales et en renforçant la paroi vasculaire. Le dobésilate s'est également révélé être un piège efficace des radicaux libres, délétères pour l'endothélium. Il réduit l'oxydation des lipides de la membrane des érythrocytes. On a même constaté qu'il empêche la formation des radicaux libres (8).

Ainsi le dobésilate combat les modifications pathologiques précoces de la structure et de la fonction des capillaires de la

rétine, avant l'apparition des micro-anévrysmes, des œdèmes et des hémorragies. Il améliore la nutrition de la rétine et favorise la transmission de la lumière vers les cônes et les bâtonnets. Lorsque l'atteinte diabétique n'est pas trop avancée, les différents essais menés ont confirmé la diminution de la viscosité du plasma et du sang, une stabilisation de la perméabilité des capillaires de la rétine, une diminution des micro-anévrysmes, des exsudats et des hémorragies. L'acuité visuelle s'améliore, le champ visuel s'élargit et le stade d'évolution de la maladie régresse.

Parce qu'il diminue la perméabilité des vaisseaux de l'œil et réduit la viscosité du sang ainsi que les risques d'hémorragie et d'occlusion des capillaires, le dobésilate de calcium convient bien au traitement précoce des rétinopathies diabétiques. L'administration précoce de dobésilate de calcium ralentit la progression de la maladie et, par conséquent, il peut retarder la nécessité de pratiquer une photocoagulation par laser.

1 - Ch. HASSLACHER et al., *Inhibition of the Increased Synthesis of Capillary Basement Membrane in Diabetic Rats in vivo*, in VASA, vol. 10, pp. 148-150, 1981.

2 - R. SÉVIN et al., *Étude longitudinale des rétinopathies diabétiques traitées depuis au moins cinq ans par le dobésilate de calcium*, XXII^e Congress of Ophtalmology, Paris 26-31 mai 1974.

3 - H. SINZINGER et al., *Platelet Function and Prostaglandins in Patients with Peripheral Vascular Disease Treated with Calcium Dobesilate*, in Prostagl. Leukotr. Med., vol. 29, pp. 1-9, 1987.

4 - E. ERNST, *Improvement of Reduced Erythrocyte Flexibility by Calcium Dobesilate*, in Münch. Med. Wschr., vol. 126, pp. 125-126, 1984.

5 - P. GLOVICZKI et al., *Prevention of Platelet Deposition by Ibuprofen and Calcium Dobesilate in Expanded Polytetrafluoroethylene Vascular Grafts*, in Am. J. Surg., vol. 150, pp. 589-591, 1985.

6 - B. VOJNIOVIC, *Doxium® Reduces Blood Hyperviscosity and Lowers Elevated Intraocular Pressure in Patients with Diabetic Retinopathy and Glaucoma*, in Ophtalmic Res., vol. 23, pp. 12-20, 1991.

7 - O. SCHMUT, *Effet of Calcium Dobesilate on the Inhibition of Collagen Fibrillogenesis by Glucose in vitro*, in Arzneimittelforschung, vol. 39, pp. 1555-1557, 1989.

8 - J. BRUNET et al., *In vitro Antioxidant Properties of Calcium Dobesilate*, in Fund. Clin. Pharmacol., vol. 12, pp. 205-212, 1998.

Le compte rendu du symposium qui a eu lieu le 12 juin 1999 à Genève est à paraître dans Focus on Diabetic Retinopathy :

- A.-A. DOSSO, *Physiopathology of Diabetic Retinopathy* : New Concepts (Suisse).
- C.D.A. STEHOUWER, *Endothelial Dysfunction in the Diabetic Patient* (Hollande).
- R.P. GARAY, *Doxium® Mechanism of Action, Recent Pharmacological Findings* (France).

• J.G. CUNHA-VAZ, *Diabetic Retinopathy : Diagnosis, Investigation including Fluorometry and Medication* (Portugal).

• M. ULBIG, *Doxium® : The Caldiret Clinical Study, its Aims and Methodology* (Allemagne).

• A. SERES, *Diabetic Retinopathy : Current Treatment Considerations, a Practising Ophthalmologist's View* (Hongrie).



Au service de la
médecine.



P H A R M A

OM PHARMA • Rue du Bois-du-Lan 22 • Case postale 84 • 1217 Meyrin 2/Genève
Tél. 022 783 11 11 • Fax 022 783 11 22 • mailbox@ompharma.com

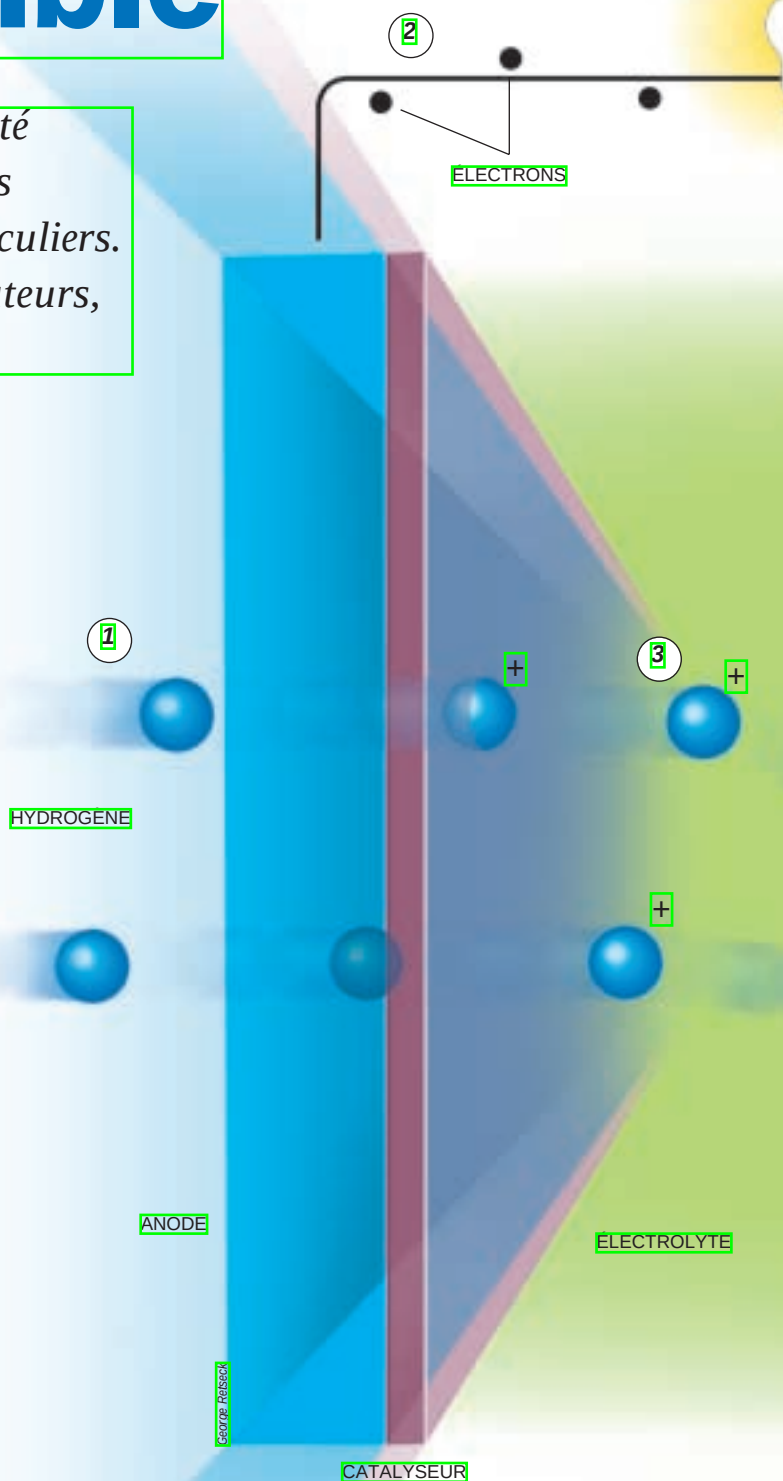
Les piles à combustible

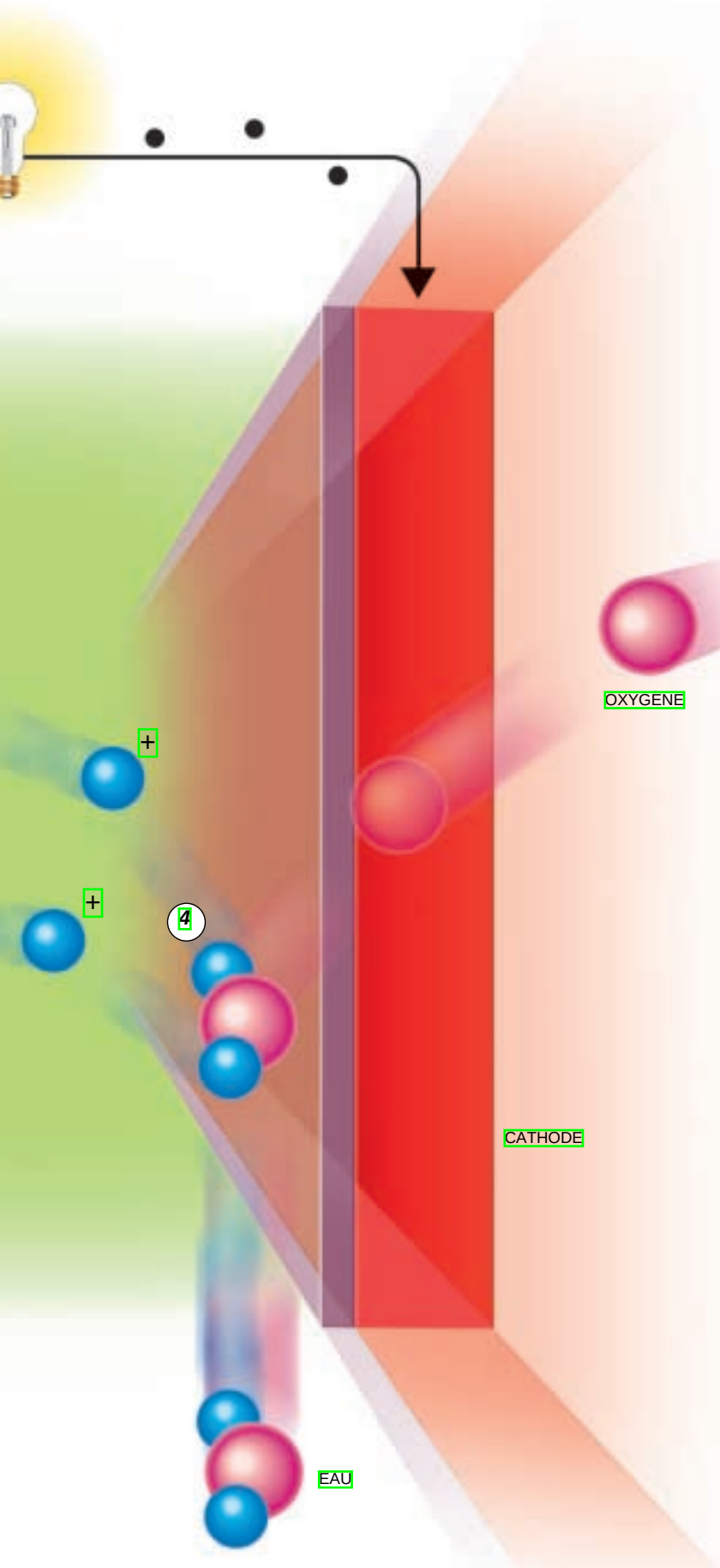
Ces générateurs chimiques d'électricité ont été longtemps réservés aux engins spatiaux ou à d'autres systèmes particuliers. Ils alimentent aujourd'hui des ordinateurs, des automobiles ou des bâtiments.

En 1839, l'électrochimiste britannique William Grove démontre que la réaction chimique par laquelle l'hydrogène et l'oxygène se combinent et forment de l'eau peut produire de l'électricité. La pile à combustible qu'il invente alors restera toutefois une curiosité de laboratoire jusque dans les années 1960, quand la NASA utilise le phénomène pour alimenter ses véhicules spatiaux en électricité. Les piles à combustible d'alors sont légères, mais très coûteuses. Aujourd'hui, on adapte ces dispositifs propres et silencieux, et de rendement élevé, à l'alimentation électrique de téléphones cellulaires, d'ordinateurs portables, d'automobiles et de bâtiments.

Les piles à combustible s'imposent-elles? Les difficultés techniques sont nombreuses. L'alimentation en combustible nécessite souvent l'ajout de systèmes annexes complexes : l'hydrogène liquide, riche en énergie, doit être stocké à -253°C , température proche du zéro absolu (-273°C) ; le méthanol, liquide à température ambiante, contient beaucoup d'hydrogène, mais il ne le libère qu'après une réaction chimique qui consomme de l'énergie et qui produit du monoxyde et du dioxyde de carbone. De plus, la plupart des piles à combustible requièrent des catalyseurs coûteux qui contiennent du platine ou d'autres métaux précieux.

Les chercheurs et les ingénieurs tentent de remédier à ces défauts. Ils ont ainsi divisé par plus de 30 la quantité de platine nécessaire au fonctionnement de certaines piles à combustible. Les trois articles de ce dossier décrivent les piles à combustible utilisées dans trois domaines : la propulsion des véhicules, où le moteur à combustion interne reste difficile à battre ; la production domestique d'électricité, où les centrales produisant des mégawatts sont remplacées par des dispositifs individuels plus petits ; l'alimentation des appareils électroniques portables, où des piles à combustible miniatures pourraient remplacer les accumulateurs.





PAGE 38



PAGE 44



PAGE 48



LA PILE A COMBUSTIBLE est une pile électrique continuellement approvisionnée en réactifs. Elle est constituée de deux électrodes, séparées par un électrolyte (un matériau qui bloque le passage des électrons, mais qui laisse circuler les ions). Un combustible contenant de l'hydrogène arrive sur une électrode (l'anode) (1), qui capte les électrons de l'hydrogène, laissant dans l'électrolyte des ions chargés positivement. Les électrons circulent dans un circuit externe (2), tandis que les ions diffusent dans l'électrolyte (3). Sur l'autre électrode (la cathode) (4), les électrons se combinent aux ions hydrogène et à l'oxygène de l'air, formant de l'eau. Pour déclencher la réaction, on disperse un catalyseur dans les deux électrodes poreuses, le plus souvent du platine.

Le plein d'hydrogène, s'il vous plaît!

JOHN APPLEBY

Des autobus et des voitures électriques propres sont propulsés grâce à des piles à combustible, alimentées par des carburants riches en hydrogène.

Entre 1986 et 1996, le nombre de véhicules circulant sur l'ensemble des routes du monde a augmenté de 30 pour cent, atteignant 634 millions. Leurs moteurs, souvent à combustion interne, consomment et polluent individuellement de moins en moins, mais la pollution globale augmente en raison de l'accroissement du nombre des véhicules. Les oxydes d'azote et les autres gaz rejetés par les véhicules menacent la santé humaine, surtout dans les grandes agglomérations où la circulation est dense. L'accroissement des émissions de gaz à effet de serre, tel le dioxyde de carbone, inquiète les climatologues : tous les véhicules réunis auraient émis, en 1996, 3,7 milliards de tonnes de dioxyde de carbone. En outre, les plus grandes réserves mondiales de pétrole sont dans des pays du Moyen-Orient politiquement instables, et ces réserves ne sont pas inépuisables.

Comment réduire la consommation des véhicules, ainsi que leur pollution? La plupart des constructeurs automobiles étudient aujourd'hui des moteurs électriques qui sont alimentés par des piles à combustible. Contrairement aux accumulateurs, qui stockent une quantité limitée d'énergie et qu'il faut recharger longuement, les piles à combustible fonctionnent tant qu'on les alimente en combustible.

Une pile à combustible produit de l'électricité en orchestrant l'oxydation d'hydrogène sur une électrode, nommée l'anode, et la réduction d'oxygène de l'air en eau à l'autre électrode, la cathode (voir la figure de la page 36). Le rendement pratique d'un tel système, compris entre 45 et 60 pour cent, est inférieur au rendement théorique, mais bien supérieur au rende-

ment réel d'un moteur à combustion interne, qui n'est que de 15 pour cent en moyenne (dans des conditions de fonctionnement optimales, le rendement d'un moteur diesel atteint 40 pour cent). La supériorité de la pile à combustible provient en particulier de la différence d'allure des courbes de variation du rendement en fonction de la puissance fournie : pour un moteur thermique, le rendement est bon dans une gamme étroite de puissance, mauvais ailleurs, en particulier à bas régime ; pour la pile à combustible, le rendement est maximal à bas régime et décroît lentement quand la puissance fournie augmente. Pour un véhicule qui circule en agglomération, à faible vitesse et avec beaucoup d'arrêts, la pile à combustible est donc plus avantageuse que le moteur à combustion.

Plusieurs types de piles à combustible, distinguées par la nature de l'électrolyte qui sépare les électrodes, sont utilisables pour la propulsion de véhicules. Aucune n'a de rendement élevé sans un catalyseur, généralement à base de platine, qui accélère la réduction de l'oxygène. Or, le platine est un métal rare et cher : les constructeurs tentent d'en réduire les quantités nécessaires. L'autre grande difficulté posée par l'emploi des piles à combustible concerne l'alimentation en hydrogène. On cherche comment le stocker dans des réservoirs compacts et légers, ou comment le produire à partir d'hydrocarbures, de méthanol ou d'essence.

Le bon électrolyte

La résistance électrique de l'électrolyte et des réactions irréversibles sur les électrodes réduisent le rendement des

piles à combustible. On réduit la résistance de l'électrolyte en utilisant des électrolytes fortement acides ou basiques. Les premières piles à combustible utilisées pour la propulsion d'un véhicule (un tracteur agricole de la Société Allis-Chalmers, en 1959) étaient des piles alcalines à hydrogène et à oxygène comprimés. Toutefois, quand l'hydrogène ou l'oxygène contenaient du dioxyde de carbone, un carbonate solide, qui précipitait dans l'électrolyte, bloquait le fonctionnement de la pile. À cause de ce défaut, les constructeurs, qui envisageaient la production d'hydrogène par reformage d'hydrocarbures (ce qui produit du dioxyde de carbone) à bord des véhicules, ont peu étudié les piles alcalines, pourtant très performantes lorsque l'on dispose d'hydrogène et d'oxygène de pureté industrielle (dans les navettes spatiales, par exemple). Rentreront-elles en grâce? Elles ont des atouts : leur fabrication est peu coûteuse et elles fonctionnent avec beaucoup moins de platine que les autres piles à combustible.

Les piles à électrolytes acides ne sont pas perturbées par le dioxyde de carbone, mais elles ont d'autres défauts. Ainsi, on ne peut pas accélérer les réactions (donc augmenter les rendements) par chauffage, car les acides sont généralement utilisés en solution aqueuse, ce qui impose que la température reste inférieure à 100 °C. Seul l'acide phosphorique concentré peut être porté à une température qui atteint 200 °C. De telles piles ont été installées avec succès dans des autobus urbains, mais elles doivent être préchauffées pendant plusieurs heures.

Des électrolytes solides, qui ne s'évaporent pas, ne se décomposent

pas et ne coulent pas, sont d'utilisation plus simple que les électrolytes liquides. Depuis les années 1960, les chimistes ont ainsi fabriqué et testé de nombreux électrolytes polymères. Par exemple, le Nafion®, de la Société Du Pont, contient des groupes acide sulfonique $-SO_3H$ qui assurent la circulation des ions hydrogène (ou protons) : on fabrique une pile à membrane échangeuse de protons, qui fonctionne à environ 80 °C, en séparant les électrodes par une membrane de Nafion®. L'épaisseur d'une cellule, formée de deux électrodes et d'une membrane, atteint à peine 2,5 millimètres. En pratique, on en empile plusieurs afin d'obtenir la puissance nécessaire à la propulsion d'un véhicule. La cathode d'une cellule et l'anode de la cellule adjacente sont séparées par une plaque étanche qui assure aussi leur connexion électrique en série. Chaque face de cette plaque est munie de distributeurs qui amènent l'hydrogène et l'oxygène vers

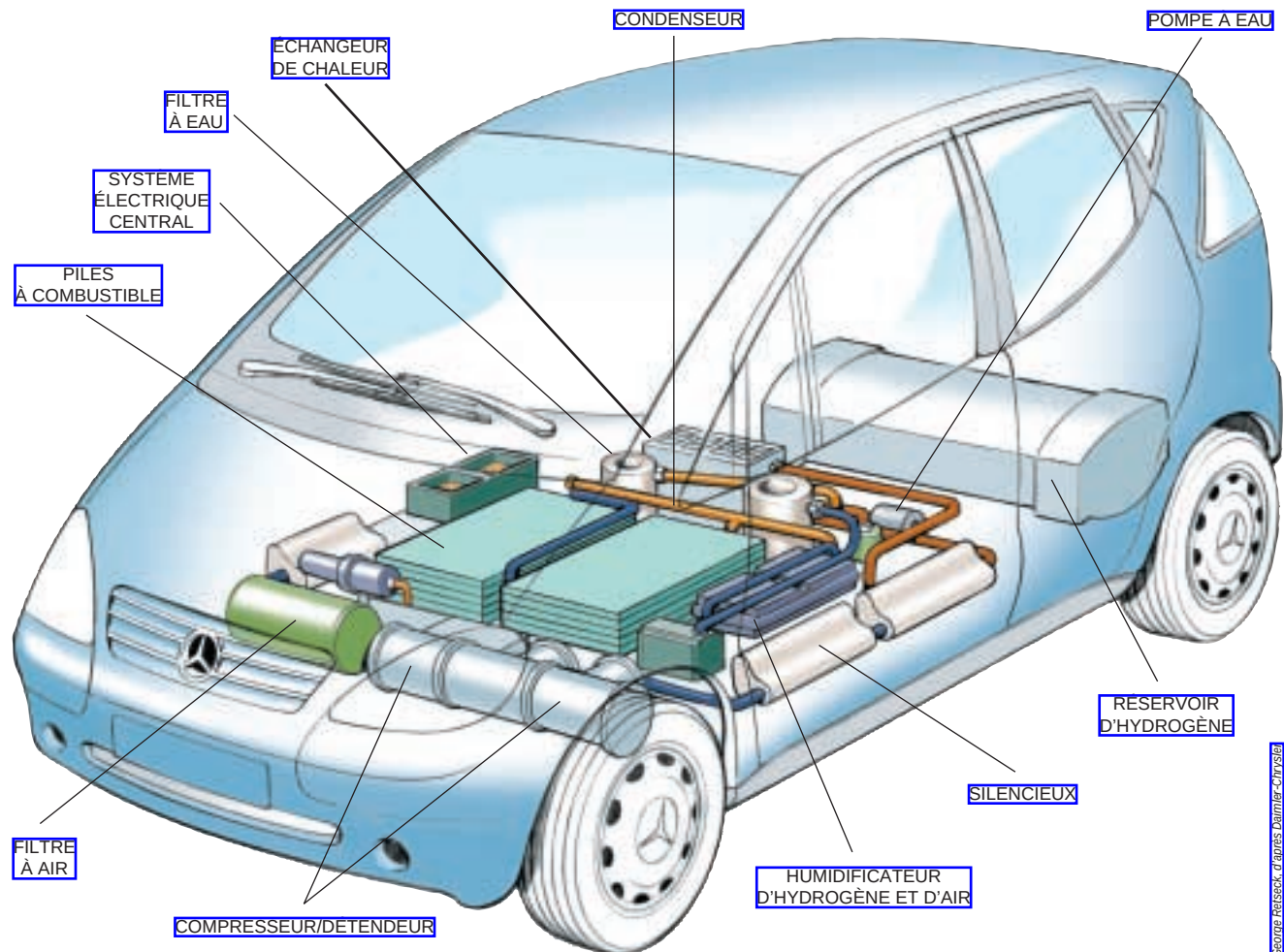
les électrodes : des canaux ou des matériaux poreux. Les plaques peuvent aussi contenir des canaux de circulation d'eau de refroidissement. Ces piles à membrane échangeuse de protons sont aujourd'hui utilisées dans tous les véhicules à piles à combustible.

Indispensable platine

Les piles à membrane échangeuse de protons ont toutefois un grave inconvénient : elles ne fonctionnent qu'avec un coûteux catalyseur à base de platine. Aujourd'hui, on dépose ce métal sous la forme de particules de cinq à dix nanomètres de diamètre (les plus petites que l'on sache fabriquer) à la surface de fines particules de carbone. En 1986, les piles à combustible utilisaient 16 grammes de platine par kilowatt de puissance produite. Le coût du platine, supérieur à 1 000 francs par kilowatt, était rédhibitoire, car les automobiles ont besoin de 50 kilowatts au

maximum de leur puissance. Depuis, des chercheurs du Laboratoire de Los Alamos, de l'Université A&M et de plusieurs entreprises ont divisé par 30 cette quantité, et d'autres améliorations de la structure des électrodes et de la façon dont le platine est utilisé la diviseront peut-être encore par deux. On ne gagnera guère davantage, sauf découverte imprévue, par exemple si l'on remplaçait le platine par un autre matériau, ce qui a été tenté, sans succès jusqu'à présent.

L'utilisation du platine pose un problème d'approvisionnement : si l'on équipait chaque année deux millions de voitures, soit environ cinq pour cent de la production automobile mondiale, avec des piles à combustible de 50 kilowatts, on consommerait 50 tonnes de platine, soit un tiers de la production mondiale actuelle. On récupérera bien sûr le platine à la fin de la vie des piles à combustible, mais il est malgré tout peu probable que l'on produise



1. DES PILES À COMBUSTIBLE installées sous le plancher produisent l'électricité nécessaire à la propulsion de ce véhicule, la Necar 4 de la Société DaimlerChrysler. Un compresseur maintient les piles sous pression. L'air et l'hydrogène servant de carburant traversent

un humidificateur et un échangeur thermique avant d'arriver à la pile. Un condenseur récupère l'eau produite par la pile. L'hydrogène liquide est stocké dans un réservoir cryogénique. Un radiateur à air (qui n'est pas dessiné) évacue la chaleur excessive.

un jour en grand nombre des véhicules propulsés uniquement par des piles à combustible à membrane échangeuse de protons.

Les quantités de platine nécessaires sont moindres dans les piles qui fonctionnent sous une pression de plusieurs atmosphères : les vitesses de diffusion et de réaction de l'hydrogène et de l'oxygène sont augmentées. Toutefois, les gains sont faibles, et la pressurisation alourdit les piles, notamment à cause de la nécessité d'un compresseur. En outre, le compresseur, bruyant, réduit le rendement.

Aujourd'hui, tous les constructeurs de piles les pressurisent aux alentours de 1,5 atmosphère. La Société *Ballard Power Systems* fabrique ainsi des piles qui utilisent la pression appliquée pour expulser l'eau qui obstrue les canaux d'arrivée de l'oxygène. En 1989, cette société a mis au point une pile, de

45 kilogrammes pour un volume d'environ 30 litres, qui produisait cinq kilowatts à partir d'hydrogène gazeux et d'air comprimé. Toutefois, ce dispositif contenait pour 3 000 francs de platine. Un nouveau système, présenté en 1995, peut concurrencer le moteur à combustion interne : pour le même poids et le même volume, il produit 32,3 kilowatts, avec un rendement de 54 pour cent, et deux à dix fois moins de platine (la quantité exacte est tenue secrète). Différents modèles de piles de la Société *Ballard* équipent aujourd'hui des autobus qui roulent à Vancouver et à Chicago, ainsi que la plupart des prototypes automobiles à piles à combustible (voir la figure 1).

Les constructeurs automobiles américains qui participent à un projet national d'étude de voiture propre ont retenu la pile à combustible à membrane échangeuse de protons parmi

leurs deux voies de recherche (la seconde est l'association d'un moteur à combustion interne et d'accumulateurs électriques). D'ici à juillet 2000, ils auront dépensé entre cinq et dix milliards de francs pour la mise au point de cette pile.

Selon ces constructeurs, une pile à combustible ne sera compétitive avec le moteur à combustion interne que si elle coûte moins de 300 francs par kilowatt. Comment y parvenir? On peut associer une pile à combustible de puissance moyenne et un accumulateur électrique, qui fournirait la puissance complémentaire nécessaire aux accélérations. Un tel système aurait un rendement total d'environ 40 pour cent si l'on récupérait l'énergie dans l'accumulateur lors des freinages (le moteur est alors transformé en générateur). L'accumulateur faciliterait aussi le démarrage des véhicules dont les piles à combustible devraient être préchauffées. Cette configuration a été utilisée sur plusieurs véhicules, notamment des autobus alimentés par des prototypes de piles à combustible à l'acide phosphorique. De tels véhicules hybrides pourraient être produits en grand nombre, en particulier avec des piles à combustible alcalines, qui nécessitent cinq fois moins de platine que les piles à membrane échangeuse de protons (mais pour lesquelles il faut enlever le dioxyde de carbone de l'air).

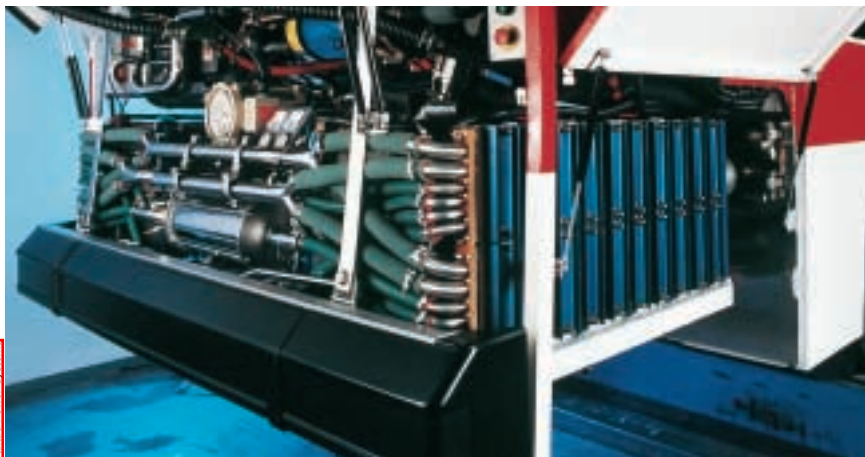
On réduira aussi les coûts en utilisant de nouveaux matériaux composites (graphite et polymères) et des mousses de métal résistant à la corrosion pour les distributeurs des plaques qui relient les électrodes. Le coût des membranes, 570 francs par kilowatt pour une pile classique, reste aussi un obstacle important. Selon la Société *Du Pont*, ce prix serait divisé par dix si la production atteignait 250 000 véhicules par an, mais le gain reste insuffisant, et les ingénieurs continuent à chercher de nouveaux électrolytes, avec des résultats encourageants en laboratoire.

Un plein volumineux

L'oxygène est disponible en grandes quantités dans l'air qui nous entoure, mais comment emporter dans une automobile les trois kilogrammes d'hydrogène nécessaires à un trajet de 500 kilomètres? À la pression atmosphérique, cette masse occupe un volume de 36 mètres cubes, soit cinq ou six fois le volume de l'habitacle.



2. CETTE AUSTIN A40, construite en 1966, était équipée de piles à combustible alcalines fabriquées par la Société *Union Carbide*. Ce véhicule n'a qu'un intérêt historique : les piles occupaient presque tout l'intérieur de la voiture, de sorte que les réservoirs d'hydrogène comprimé devaient être installés sur le toit.



3. UN AUTOBUS construit par la Société *Ballard Power Systems*, au Canada, fonctionne avec des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (visibles à droite). Il consomme de l'hydrogène gazeux comprimé et ne pollue pas.

La pressurisation du gaz à 700 atmosphères réduit son volume à 180 litres, trois fois plus qu'un réservoir d'essence actuel. La Société Ford prévoit de fabriquer un tel réservoir en matériaux composites, qui ne pèserait alors que 25 kilogrammes. La liquéfaction apporte un gain sup-

plémentaire : un réservoir cryogénique de 100 litres, pesant 45 kilogrammes, suffirait pour stocker les trois kilogrammes d'hydrogène. Toutefois, la liquéfaction de l'hydrogène consomme 40 pour cent de l'énergie contenue dans le gaz, et l'hydrogène liquide s'évapore rapide-

ment : après une semaine de stationnement, le réservoir serait vidé.

Le stockage le plus compact de l'hydrogène est aujourd'hui réalisé grâce à des composés nommés hydrures métalliques, qui absorbent jusqu'à deux pour cent de gaz en poids : 50 litres d'hydrure suffiraient à contenir les trois

DATE	PROMOTEUR	VEHICULE	PILES	COMBUSTIBLE, RAYON D'ACTION
1966	Karl Kordesch	Austin A40	Alcalines, 6 kilowatts	Hydrogène comprimé, 320 kilomètres
1990 (opérationnel en avril 1994)	H Power, Université de Georgetown, Gouvernement des États-Unis	Trois autobus de 9,1 mètres	Acide phosphorique, 50 kilowatts	Méthanol reformé
1991 (opérationnel en février 1993)	Ballard Power Systems	Autobus de 9,8 mètres	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 120 kilowatts	Hydrogène comprimé
octobre 1993	Energy Partners	Voiture de sport «verte»	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 15 kilowatts	Hydrogène comprimé, 100 kilomètres
avril 1994	Daimler-Benz	Necar (utilitaire Mercedes-Benz 180)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 60 kilowatts	Hydrogène comprimé
1994-1997	Ballard	Six autobus de 12,2 mètres	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 205 kilowatts	Hydrogène comprimé
mai 1996	Daimler-Benz	Necar 2 (Mercedes-Benz classe V)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Hydrogène comprimé, 250 kilomètres
novembre 1996	Toyota	Véhicule de sport RAV4	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 10 kilowatts, hybride	Hydrures métalliques, 250 kilomètres
mai 1997	Daimler-Benz	Nebus (autobus de 12 mètres)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 190 kilowatts	Hydrogène comprimé, 250 kilomètres
août 1997	Renault	Laguna break	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 30 kilowatts	Hydrogène liquide, 500 kilomètres
septembre 1997	Toyota	Véhicule de sport RAV4	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 25 kilowatts, hybride	Méthanol reformé, 500 kilomètres
septembre 1997	Daimler-Benz	Necar 3 (Mercedes-Benz classe A)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Méthanol reformé, 400 kilomètres
décembre 1997	Mazda	Demlo FCEV break	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 25 kilowatts, hybride	Hydrures métalliques 170 kilomètres
mai 1998	Université de Georgetown, Nova BUS, Ministère américain des Transports	Autobus de 12 mètres	Acide phosphorique, 100 kilowatts, hybride	Méthanol reformé, 550 kilomètres
juillet 1998	DaimlerChrysler	Necar 4 (Mercedes-Benz classe A)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Hydrogène liquide, 400 kilomètres
juillet 1998	Zevco	Taxi londonien Millenium	Alcaline, 5 kilowatts, hybride	Hydrogène comprimé, 150 kilomètres
octobre 1998	Opel	Zafira	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts, hybride	Méthanol reformé

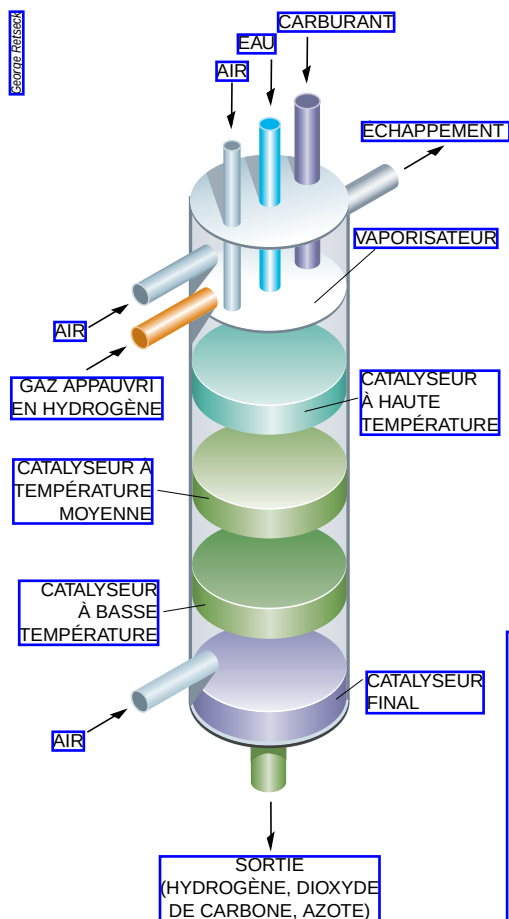
4. DE NOMBREUX VEHICULES A PILES A COMBUSTIBLE ont été construits ces dernières années. Le tableau ci-dessus présente les plus notables de ceux qui ont été homologués pour la circulation sur les autoroutes.

kilogrammes d'hydrogène. Comme ces matériaux sont chers et lourds, des chercheurs de l'Université Northeastern ont mis au point des nanofibres de carbone qui absorberaient de façon réversible de l'hydrogène à température ambiante. Si les études en cours confirment leurs résultats et même si ce matériau ne stocke que la moitié de la quantité d'hydrogène annoncée, les trois kilogrammes d'hydrogène tiendraient alors dans 35 litres, soit 1 000 fois moins que sous forme gazeuse.

Pour éviter de stocker l'hydrogène dans les véhicules, on pourrait le produire à bord, par reformage d'un composé hydrocarboné, tel le méthanol (on fait réagir le méthanol avec de la vapeur d'eau, à 280 °C, en présence d'un catalyseur). Comme le reformage produit un peu de dioxyde de carbone, ces systèmes ne sont pas aussi propres que les piles alimentées directement par de l'hydrogène. En outre, le transport et le stockage du méthanol nécessitent la mise au point de nouveaux réservoirs et l'organisation de sa distribution dans les stations-service.

Les piles à combustible à acide phosphorique fonctionnent particulièrement bien avec un reformeur, car leur système de chauffage produit simultanément la vapeur; leur température préviendrait aussi l'empoisonnement du catalyseur par les petites quantités de monoxyde de carbone produites lors du reformage (le monoxyde de carbone s'adsorbe sur les sites actifs du catalyseur; le chauffage entraîne sa désorption). Dans ces piles, le rendement de la transformation du méthanol en électricité atteint presque 50 pour cent. Depuis 1990, la Société *H Power* a ainsi construit plusieurs prototypes d'autobus silencieux, dont le rendement est le double de celui des autobus diesels, et qui n'émettent respectivement que 1,5 et 0,25 pour cent des quantités autorisées de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote.

Le reformage du méthanol convient moins bien aux membranes échangeuses de protons: l'empoisonnement du catalyseur n'est évité qu'au prix d'une étape supplémentaire d'oxydation catalytique, qui réduit le monoxyde de carbone à moins de dix parties par million, et d'une grande quantité de catalyseur, un alliage de



5. UN REFORMEUR POLYVALENT pourrait transformer l'essence ou le méthanol en un mélange gazeux riche en hydrogène pour les piles à combustible. La combustion du gaz contenant de l'hydrogène résiduel, provenant des anodes de la pile à combustible, chaufferait le carburant, l'eau et l'air, qui réagiraient au contact du catalyseur à haute température. Des catalyseurs complémentaires, actifs à des températures de plus en plus basses, réduiraient la quantité de monoxyde de carbone et augmenteraient la concentration en hydrogène dans le mélange d'échappement.

platine et de rhuthénium, sur l'anode. En outre, une partie de l'hydrogène produit doit être brûlé pour la production de vapeur dans le reformeur. La Société *Toyota* a présenté un véhicule équipé d'un tel système, dont le rendement n'était que de 37 pour cent. Un tel rendement peut être obtenu par un véhicule hybride propulsé par un moteur thermique et par un accumulateur, alors que le méthanol est aujourd'hui environ deux fois plus cher que l'essence pour un contenu énergétique équivalent (à terme, on devrait toutefois arriver au même coût). De plus, un reformeur de méthanol est volumineux et lourd.

Pourquoi ne pas produire de l'hydrogène en reformant simplement l'essence que l'on trouve aujourd'hui dans les stations-service? On profiterait de l'infrastructure de distribution déjà en

place. Dans un projet des Sociétés *Shell* et *DaimlerChrysler*, les véhicules seraient équipés d'un reformeur polyvalent, qui produirait de l'hydrogène à partir de méthanol ou d'essence et qui consommerait une partie du combustible pour produire la chaleur nécessaire (voir la figure 5). Le Laboratoire américain Argonne a testé un système qui convertit en hydrogène l'essence délivrée à la pompe avec un rendement de 78 pour cent. Toutefois, si l'on compte l'énergie consommée dans la vaporisation et l'énergie perdue dans la pile à combustible, le rendement global d'un véhicule ne serait que de 33 pour cent. En outre, le démarrage du reformeur à basse température doit encore être amélioré.

L'essence actuelle contient du soufre, qui empoisonne le catalyseur. Avec des piles stationnaires à acide phosphorique, l'essence devrait être désulfurée avant d'être transformée en gaz riche en hydrogène. Cependant, cette désulfuration est quasi impossible à bord des véhicules. Une possibilité est de faire traverser à l'hydrogène une membrane de palladium, à chaud et sous pression. Les sociétés pétrolières pourraient aussi produire de l'essence sans soufre qu'utiliseraient à la fois les véhicules à piles à combustible et les moteurs à combustion interne à haut rendement.

Verrons-nous un jour des «pompes à hydrogène» dans toutes les stations-service? Nos véhicules consommeraient alors moins d'énergie et seraient plus propres. En attendant, les techniques doivent encore progresser et, surtout, le coût des piles à combustible doit baisser.

John APPLEBY est professeur d'électrochimie à l'Université A&M.

A. John APPLEBY et Frank R. FOULKES, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1989.

Leo J.M.J. BIOMEN et Michael N. MUGERWA, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press, 1993.

Karl KORDESCH et Günter SIMADER, *Fuel Cells and Their Applications*, John Wiley & Sons, 1996.

Christopher E. BORRONI-BIRD, *Fuel Cell Commercialization Issues for Light-Duty Vehicle Applications*, in *Journal of Power Sources*, vol. 61, n° 1-2, pp. 33-48, 1996.

Une centrale électrique dans votre sous-sol

ALAN LLOYD

Des piles à combustible équipent aujourd'hui des maisons, qui n'ont plus besoin d'être reliées au réseau électrique.

Produite dans des centrales de plusieurs centaines de mégawatts de puissance, l'électricité parcourt souvent des dizaines, voire des centaines de kilomètres avant d'arriver chez les consommateurs. Dans 10 ou 20 ans, certains d'entre nous produiront leur propre électricité à l'aide d'un petit groupe électrogène, silencieux et efficace, de la taille d'un réfrigérateur, installé dans leur sous-sol ou dans leur cour : des maisons individuelles, des commerces, de petites entreprises, des hôtels, des immeubles d'habitation et même des usines seront ainsi alimentés par des piles à combustible d'une puissance de 5 à 500 kilowatts.

Dans tous les pays industrialisés, des entreprises et des laboratoires perfectionnent de tels systèmes. Quelques sociétés en vendent déjà. Ainsi, depuis presque dix ans, une filiale de la Société *United Technologies* a vendu quelque 170 piles à combustible d'une puissance maximale de 200 kilowatts ; la plupart produisent de la chaleur et de l'électricité dans des installations industrielles, ou servent de générateur de secours. On utilise aussi des piles à combustible dans les stations d'épuration des eaux et dans des usines qui affichent leur respect de l'environnement.

Aujourd'hui, ces piles à combustible coûtent cher : leur utilisation est encore restreinte, et leur achat est toujours largement subventionné par les organismes publics. L'investissement, pour une pile à combustible, est de 20 000 à 25 000 francs par kilowatt, contre 5 000 à 10 000 francs par kilowatt pour une centrale thermique classique ou nucléaire. En outre, on ne

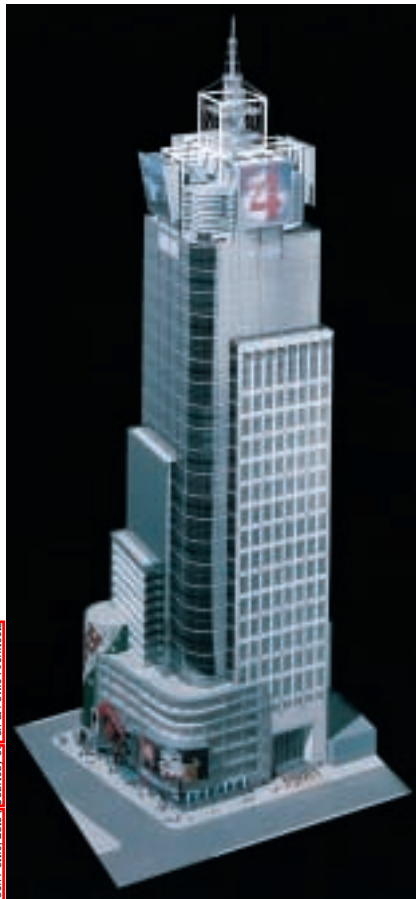
connaît pas encore la durée de vie d'une pile à combustible : aucune installation commerciale n'a fonctionné plus de dix ans (une centrale électrique thermique produit de l'électricité pendant 20 ans au moins, et la Société *Électricité de France* annonce une durée de vie de 40 ans pour ses centrales nucléaires).

Toutefois, les piles à combustible deviendraient compétitives si elles

coûtaient seulement 10 000 francs par kilowatt. Elles ont en effet plusieurs avantages : elles sont propres et silencieuses, elles consomment des combustibles variés et elles sont en général insensibles aux perturbations atmosphériques qui endommagent les réseaux électriques. Elles ont aussi de hauts rendements et permettent la cogénération d'électricité et de chaleur. Contrairement aux centrales thermiques classiques, qui émettent des gaz à effet de serre, et aux centrales nucléaires, qui produisent des déchets radioactifs, les piles à combustible ne rejettent que de l'eau (et éventuellement du dioxyde de carbone). En outre, l'hydrogène, aujourd'hui produit à partir d'hydrocarbures fossiles, pourrait être obtenu par électrolyse de l'eau avec des sources d'énergie renouvelables, telles des éoliennes ou des cellules photovoltaïques. L'épuisement des réserves de pétrole, au cours du siècle prochain, favorisera le passage à une production d'énergie fondée sur les énergies renouvelables.

Propres, rentables et versatiles

La pile à combustible a été inventée il y a plus d'un siècle. Comme les accumulateurs électriques, elle produit du courant électrique en canalisant les électrons qui sont échangés entre des réactifs, au cours d'une réaction électrochimique : au lieu de se combiner violemment, l'hydrogène et l'oxygène réagissent séparément, sur deux électrodes (voir la figure de la page 36). Pour produire une quantité utile de courant électrique, plusieurs cellules sont empilées.



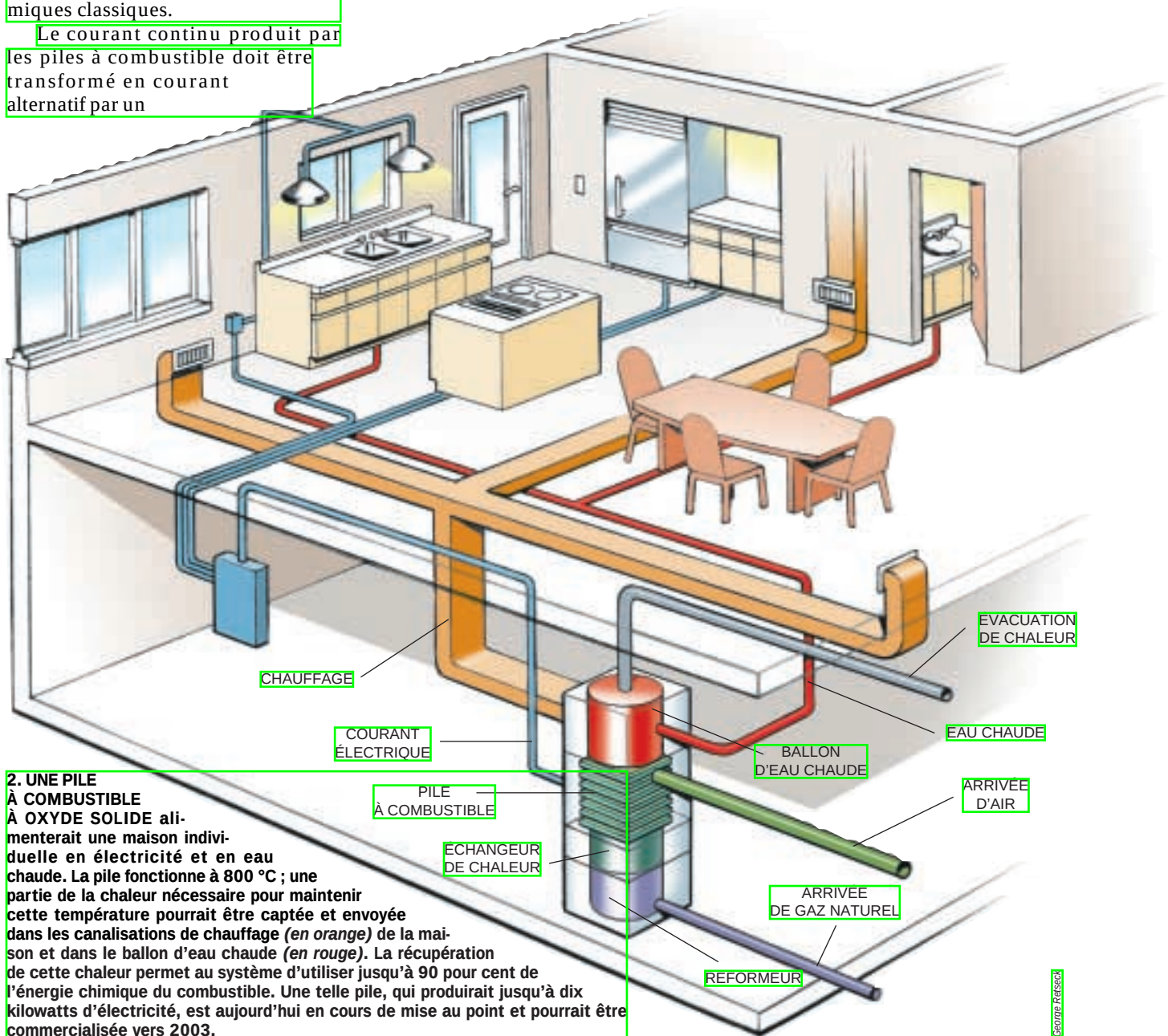
1. CET IMMEUBLE DE NEW YORK est équipé de deux piles à combustible de 200 kilowatts, installées au quatrième étage.

Un tel système fournit un courant électrique continu tant qu'il est alimenté en hydrogène et en oxygène. L'oxygène provient en général de l'air ambiant (ce dernier en contient 21 pour cent), et l'hydrogène est produit par dissociation d'autres molécules telles que l'eau, l'ammoniac, les hydrocarbures fossiles (gaz naturel et distillats de pétrole, propane liquide et charbon gazéifié) et les molécules organiques renouvelables (éthanol, méthanol, produits de décomposition de la biomasse). La transformation de ces composés en hydrogène, nommée reformage, produit aussi du dioxyde de carbone et d'autres gaz polluants, mais les pollutions sont 10 à 1 000 fois inférieures à celles des centrales thermiques classiques.

Le courant continu produit par les piles à combustible doit être transformé en courant alternatif par un

convertisseur, pour être utilisable dans des activités domestiques ou commerciales. Les rendements du reformeur et du convertisseur ne sont pas de 100 pour cent : ces systèmes dissipent de l'énergie, surtout sous forme de chaleur. Bien que le rendement électrochimique de conversion de l'hydrogène en électricité soit supérieur à 55 pour cent dans la pile elle-même, les pertes d'énergie dans le reformeur et dans le convertisseur abaissent le rendement global à environ 40 pour cent, équivalent à celui d'une turbine à gaz. On obtient des valeurs nettement supérieures en récupérant une bonne partie de la chaleur pour le chauffage d'eau ou d'air.

Quelle puissance doit avoir une pile à combustible stationnaire? Ces 20 dernières années, des entreprises de production d'électricité en ont testé de fortes puissances, sans grand succès : une pile de 4,5 mégawatts, construite à New York en 1982, n'a jamais fonctionné ; une centrale de deux mégawatts, construite en 1995 par la Société *Pacific Gas and Electric*, a fonctionné 3 000 heures sans jamais produire plus de la moitié de sa puissance nominale. Les résultats ont été plus concluants au Japon, où la Société *Tokyo Electric Power* a testé une pile de 4,5 mégawatts en 1984, et une pile de 11 mégawatts qui a fonctionné pendant 23 000 heures, entre 1991 et 1997.



Small is beautiful

Le succès mitigé de ces expériences a conduit les ingénieurs à fabriquer des piles à combustible moins puissantes. Une pile d'une cinquantaine de kilowatts couvre facilement les besoins en électricité d'une maison de cinq ou six pièces, ou d'un commerce tel qu'une blanchisserie. Cette puissance est proche de celle dont a besoin une voiture pour accélérer (voir *Le plein d'hydrogène, s'il vous plaît*, page 38) : des habitations isolées pourraient être alimentées en électricité par la même pile à combustible qui servirait à propulser l'automobile.

Les plus optimistes évaluent à 300 milliards de francs le marché annuel des piles stationnaires de 5 à 100 kilowatts aux États-Unis d'ici 2030. Ont-ils raison ? Aujourd'hui, aux États-Unis, trois sociétés seulement ont installé des piles qui fournissent de l'électricité à des maisons témoins, et la première pile à combustible installée de façon permanente dans un foyer n'a été mise en service qu'en juin 1998 (voir la figure 3).

Des piles plus puissantes, pour des usages industriels ou commerciaux, sont aussi à l'étude. Une société espère bientôt commercialiser une pile à combustible stationnaire de 500 kilowatts, et plusieurs autres préparent ou ven-

dent déjà des piles de 200 à 300 kilowatts. Ces dernières pourraient, par exemple, alimenter plusieurs magasins d'un centre commercial, un petit centre médical ou un centre d'affaires. Une pile de 300 kilowatts est ainsi en cours d'installation par les Sociétés *Alstom* et *Ballard*, à Berlin.

Pour satisfaire des besoins plus importants, on pourrait associer plusieurs piles. Ainsi, les constructeurs d'un nouvel immeuble new-yorkais (voir la figure 1), qui sert de vitrine pour les techniques «propres», ont installé deux piles à combustible de 200 kilowatts pour l'alimentation en eau chaude, l'éclairage de la façade et l'alimentation électrique de secours.

Des piles à combustible ont aussi été choisies lorsque leurs caractéristiques compensaient leur coût élevé. Ainsi, l'installation d'une pile de 200 kilowatts, dans le commissariat de police de Central Park, à New York, a évité le creusement de tranchées dans le parc. Au Nebraska, le centre de traitement des transactions par cartes de crédit de la Société *First National Bank* sera également équipé de quatre piles à combustible de 200 kilowatts : doublée par des générateurs auxiliaires de secours et par le réseau électrique local, cette alimentation sera très fiable.

L'acide phosphorique en tête

Comme la taille et le poids des piles à combustible ont peu d'importance dans les applications au bâtiment, de nombreux types de piles sont utilisables. Il en existe cinq principaux, que l'on distingue par leur électrolyte : piles à acide phosphorique, à carbonate fondu, à oxyde solide, à membrane échangeuse de protons et piles alcalines.

La pile à acide phosphorique est celle qui fonctionne le mieux aujourd'hui. Toutes les piles de plus de 100 kilowatts vendues sont à acide phosphorique. Dans l'ensemble du monde, douze sociétés commercialisent ou mettent au point ces piles. La Société *ONSI* en a vendu environ 170, alimentées presque toutes au gaz naturel ; certaines ont fonctionné des dizaines de milliers d'heures. Aux États-Unis, l'achat de beaucoup de ces piles a été subventionné par les ministères de la Défense et de l'Énergie. Les acquéreurs ont reçu 6 500 francs par kilowatt, plafonné à un tiers du coût total du projet. Plus de 120 millions de francs ont été ainsi distribués aux acheteurs et aux installateurs de plus de 90 piles à combustible. Quelques sociétés japonaises ont aussi vendu environ 120 piles à acide phosphorique de 50 à 500 kilowatts, dont plusieurs ont fonctionné plus de 40 000 heures.

Aux États-Unis, comme au Japon, la plupart des piles à acide phosphorique installées fournissent à la fois de la chaleur et de l'électricité. Cinq autres types d'installations s'équipent depuis peu : les décharges, les stations d'épuration des eaux usées, les usines agroalimentaires, les centrales électriques qui ne peuvent tolérer aucune interruption et les installations qui respectent l'environnement. Les trois premiers types utilisent ainsi le méthane, qui autrement serait un déchet indésirable : la gratuité de ce combustible facilite l'amortissement des installations.

Malgré ces succès, le coût des piles à acide phosphorique se stabilise depuis plusieurs années à environ 25 000 francs par kilowatt, soit le triple du prix qui les rendrait compétitives. Certains industriels en ont déduit que la technique est dans l'impasse, et la plupart des nouveaux fabricants de piles à combustible se concentrent sur

Comparaison des piles à combustible				
ELECTROLYTE	Membrane échangeuse de protons	Acide phosphorique	Carbonate fondu	Oxyde solide
TEMPERATURE DE FONCTIONNEMENT	80 °C	Environ 200 °C	650 °C	800-1.000 °C
PORTEUR DE CHARGE	Ion hydrogène	Ion hydrogène	Ion carbonate	Ion oxygène
REFORMAGE	Externe	Externe	Interne ou externe	Interne ou externe
MATÉRIAU DE LA PILE	A base de carbone	A base de graphite	Acier inoxydable	Céramique
CATALYSEUR	Platine	Platine	Nickel	Pérovskites (titanate de calcium)
RENDMENT (EN POUR CENT)	40 à 50	40 à 50	Plus de 60	Plus de 60
ÉTAT DE MISE AU POINT	Prototypes jusqu'à 50 kilowatts ; piles de 250 kilowatts dans quelques années	Pile de 200 kilowatts commercialisées ; une pile de onze mégawatts a été testée	Prototype de deux mégawatts	Prototypes jusqu'à 100 kilowatts

d'autres types de piles. Les piles à combustible à carbonate fondu et à oxyde solide fonctionnent toutes les deux à plus de 650 °C : comme son nom l'indique, l'électrolyte de la pile à carbonate fondu est un sel liquide, et les piles à oxyde solide nécessitent des températures élevées pour le reformage interne et l'ionisation de l'hydrogène sans catalyseurs onéreux. En outre, l'électrolyte ne conduit qu'à partir de 800 °C. La chaleur nécessaire est produite à partir de l'énergie rejetée par la pile, sans nuire au rendement électrique. Comme pour les piles à acide phosphorique, on récupère une partie de la chaleur dissipée pour la production d'eau chaude et le chauffage des pièces d'habitation (voir la figure 2).

La centrale de deux mégawatts que nous avons déjà évoquée était constituée de piles à carbonate fondu. Des piles de moindre puissance sont actuellement en cours de mise au point. Une quarantaine d'entreprises dans le monde s'intéressent aux piles à oxyde solide.

Un sérieux outsider

Malgré leurs adaptations récentes, les piles à combustible à acide phosphorique, à carbonate fondu et à oxyde solide sont toutefois des techniques mises au point à l'époque où l'on pensait construire des centrales de forte puissance. Les piles à membrane échangeuse de protons, en revanche, sont apparues en même temps que l'idée de petites centrales de production électrique. Elles semblent prometteuses, car les coûts de production de leurs électrolytes ont fortement baissé et l'on a mis au point des catalyseurs qui résistent mieux au blocage par le monoxyde de carbone produit lors du reformage.

L'électrolyte d'une pile à membrane échangeuse de protons est une mince membrane semi-perméable, qui ne laisse passer que les ions chargés positivement, tels les ions hydrogène (ou protons), mais pas les électrons (la membrane contient des groupements chargés négativement). Il y a quelques années, des ingénieurs ont découvert que le Gore-Tex®, un matériau utilisé pour la fabrication de vêtements étanches à l'eau et au froid, peut renforcer la membrane, améliorant ainsi ses caractéristiques de fonctionnement :



3. UNE PILE A COMBUSTIBLE à membrane échangeuse de protons, de la taille d'un réfrigérateur, installée près du garage, alimente une maison en électricité. Elle fournit sept kilowatts, assez pour couvrir la plupart des besoins de la maison, sauf aux heures de pointe.



elle peut être plus mince et plus résistante mécaniquement.

Aujourd'hui, 85 sociétés dans le monde mettent au point des piles à membrane échangeuse de protons d'une puissance de quelques kilowatts à quelques centaines de kilowatts. Ainsi, la Société *Ballard Generation Systems*, en collaboration avec la Société *Alstom*, prévoit de commercialiser, à partir de 2001, une pile à membrane échangeuse de protons qui produira jusqu'à 250 kilowatts. La Société *Plug Power* fait fonctionner une pile à membrane échangeuse de protons de sept kilowatts dans une maison occupée toute la semaine par deux de ses ingénieurs. La Société *H Power Corporation* vend de petites unités de 35 à 500 watts : elle propose leur utilisation dans des systèmes de secours, de télécommunications et de transports (pour l'alimentation de panneaux mobiles de signalisation, par exemple).

Les piles à combustible alcalines sont utilisées depuis longtemps dans des environnements spéciaux, telle la navette spatiale (où les astronautes utilisent l'eau produite par la réaction). Leurs rendements sont élevés, mais d'autres problèmes les ont écartées des applications domestiques. Néanmoins, quelques sociétés essaient de produire des piles alcalines à un prix compétitif par rapport à d'autres piles à combustible, sinon à d'autres filières de production d'électricité.

À quelles conditions les piles à combustible entreraient-elles vraiment sur le marché de la production d'énergie? Des subventions gouvernementales resteront nécessaires pendant encore quelques années, et ces dispositifs resteront cantonnés à quelques niches de marché, dont le nombre et la taille augmenteront petit à petit. À plus long terme, la lutte contre le réchauffement du climat planétaire, dû notamment aux émissions de dioxyde de carbone, pourrait imposer la généralisation des piles à combustible. Nous entrerions alors dans une économie de l'hydrogène, plus propre que celle des combustibles fossiles.

Alan LLOYD dirige le Bureau de la qualité de l'air de l'État de Californie.

Karl KORDESCH et Gunter SIMADER, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH Publishers, 1996.

R.H. WILLIAMS, *Fuel Decarbonization for Fuel Cell Applications and Sequestration of the Separated Carbon Dioxide*, Princeton University Center for Energy and Environmental Studies, janvier 1996.

E.A. PARSON et D.W. KEITH, *Fossil Fuels without Carbon Dioxide Emissions*, in *Science*, vol. 282, pp. 1053-1054, 6 novembre 1998.

Fuel Cells : A Handbook, quatrième édition, US Department of Energy, 1998.

Des piles à combustible pour les portables

CHRISTOPHER DYER

Des piles à combustible miniatures pourraient remplacer les accumulateurs électriques dans les téléphones cellulaires, dans les ordinateurs portables ou dans les caméscopes.

Les appareils électroniques portables sont de plus en plus petits et perfectionnés, mais leurs performances restent limitées par leur alimentation électrique, assurée aujourd'hui exclusivement par des accumulateurs. Lourds et coûteux, ceux-ci ont une capacité limitée : il faut alors les recharger (ce qui immobilise l'appareil pendant plusieurs heures) et, parfois, les changer (que faire alors des systèmes usagés?).

Pourrait-on remplacer les accumulateurs par des piles à combustible? Elles fonctionnent sur le même principe : la transformation silencieuse et non polluante d'énergie chimique en électricité. Leur recharge est toutefois beaucoup plus rapide : il suffit de les réapprovisionner en combustible. En outre, elles tirent leur énergie de l'oxydation de l'hydrogène en eau, réaction plus puissante que celles qui se produisent dans les accumulateurs. Une pile à combustible alimentée par du méthanol fournirait de l'électricité sept fois plus longtemps qu'un accumulateur au lithium de même volume, pour un coût et un poids moindres.

Tandis que les piles à combustible peinent à concurrencer le moteur à combustion interne pour la traction automobile ou la production d'électricité domestique, la concurrence avec les accumulateurs est plus ouverte pour la fourniture des faibles puissances nécessaires aux appareils portables. Plusieurs piles à combustible miniatures ont été fabriquées récemment. Elles laissent espérer des performances bien meilleures que les

accumulateurs actuels : une centaine d'heures d'autonomie pour un ordinateur portable, ou plusieurs mois d'autonomie en veille pour un téléphone cellulaire. Cette miniaturisation est un compromis délicat entre la puissance fournie, la taille, la maniabilité et le coût.

De vieux concurrents

Quels sont les avantages des piles à combustible sur les accumulateurs électriques? Ces deux systèmes reposent sur le même principe, la transformation en électricité de l'énergie chimique contenue dans des réactifs (voir la figure de la page 36). Les réactions électrochimiques ont des rendements très élevés ; elles sont silencieuses et simples, et elles produisent peu de chaleur et de polluants.

À masse égale, une pile à combustible, avec son réservoir de carburant, contient toutefois beaucoup plus d'énergie qu'un accumulateur. L'énergie des piles à combustible vient en effet de l'oxydation de l'hydrogène en eau et, à masse identique, l'hydrogène liquide contient 200 fois plus d'énergie qu'un accumulateur au lithium. La puissance délivrée par une pile à combustible, ou par un accumulateur, dépend de la tension électrique entre les deux électrodes, qui dépend elle-même de l'énergie libérée par la réaction électrochimique. La tension délivrée par un accumulateur au lithium d'ordinateur portable ne dépasse pas trois à quatre volts. Une pile à combustible portable fournit à peine plus de un volt, mais

elle est beaucoup plus légère et moins encombrante : elle contient plus d'énergie dans le même volume. Bien entendu, l'hydrogène liquide, qui bout à -250°C , est inutilisable dans un appareil grand public, mais des molécules contenant de l'hydrogène ont aussi une grande densité énergétique : en théorie, un litre de méthanol fournirait une énergie de 5 000 wattheures, soit dix fois plus qu'un accumulateur au lithium de même volume (l'accumulateur au lithium est pourtant celui qui a la plus grande densité d'énergie) ; l'autonomie d'un ordinateur portable serait ainsi portée à plus d'une semaine.

En outre, dans une pile à combustible, on n'a besoin de stocker que le combustible : l'oxygène est disponible dans l'air ambiant. Dans les accumulateurs électriques, au contraire, les réactifs sont les électrodes elles-mêmes (par exemple, l'oxyhydroxide de nickel et le cadmium dans un accumulateur au nickel-cadmium), ce qui en augmente le coût, la taille et le poids.

De surcroît, une pile à combustible se recharge plus facilement qu'un accumulateur : il suffit de la réapprovisionner en combustible pour qu'elle continue de fonctionner, comme un moteur à essence. Les accumulateurs, au contraire, doivent rester branchés longtemps sur le réseau électrique pour retrouver leur pleine charge.

Malgré ces avantages, le coût élevé des piles à combustible les a longtemps réservées à des usages spécifiques, telle l'alimentation électrique des véhicules spatiaux habités. La

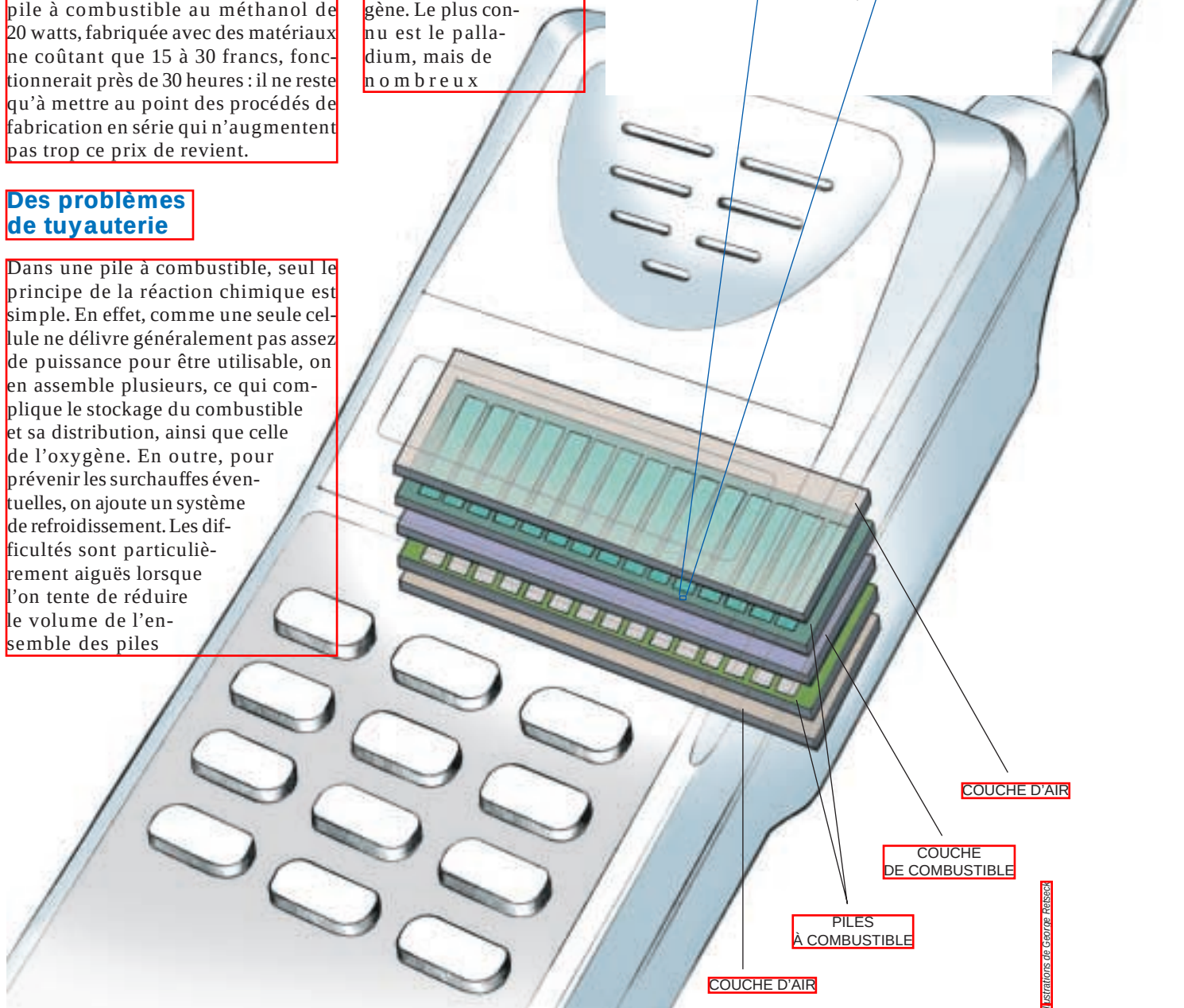
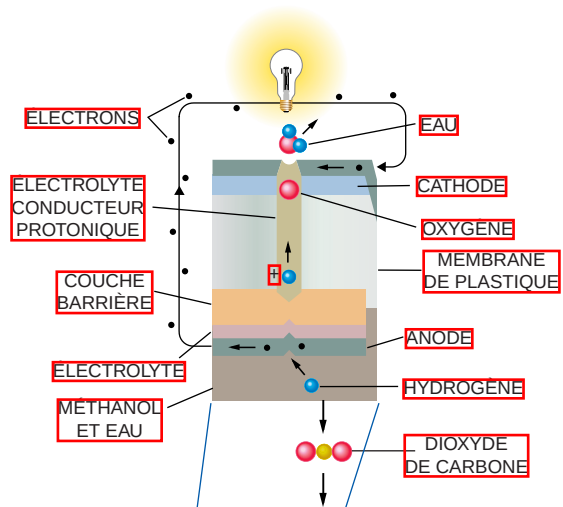
situation change aujourd'hui : le prix de revient des piles à combustible devrait baisser, notamment grâce à la diminution de la quantité de platine nécessaire pour les catalyseurs ; dans le même temps, le coût des accumulateurs à forte densité d'énergie a augmenté, car on les fabrique avec des matériaux plus coûteux. Ainsi, un accumulateur au nickel-cadmium de 20 watts, d'une masse de 0,5 kilogramme, se décharge en une heure et coûte environ 130 francs. Un accumulateur semblable au lithium fournit la même puissance pendant environ trois heures, pour le quadruple du prix. En revanche, une pile à combustible au méthanol de 20 watts, fabriquée avec des matériaux ne coûtant que 15 à 30 francs, fonctionnerait près de 30 heures : il ne reste qu'à mettre au point des procédés de fabrication en série qui n'augmentent pas trop ce prix de revient.

Des problèmes de tuyauterie

Dans une pile à combustible, seul le principe de la réaction chimique est simple. En effet, comme une seule cellule ne délivre généralement pas assez de puissance pour être utilisable, on en assemble plusieurs, ce qui complique le stockage du combustible et sa distribution, ainsi que celle de l'oxygène. En outre, pour prévenir les surchauffes éventuelles, on ajoute un système de refroidissement. Les difficultés sont particulièrement aiguës lorsque l'on tente de réduire le volume de l'ensemble des piles

pour le faire tenir dans un caméscope ou dans un téléphone portable : aujourd'hui, l'ensemble des sous-systèmes est toujours plus encombrant et plus lourd que la pile elle-même.

La miniaturisation détermine aussi le choix du combustible : nous avons vu qu'on ne peut pas transporter de l'hydrogène liquide ou gazeux dans un téléphone portable. En revanche, divers métaux absorbent l'hydrogène. Le plus connu est le palladium, mais de nombreux



1. LES PILES À COMBUSTIBLE MINIATURES pour les téléphones cellulaires occuperont le même volume que les accumulateurs actuels (à droite). La source d'énergie compacte contiendra une rangée de

cellules montées sur deux plaques minces. Chaque pile sera formée de plusieurs couches (en haut, à droite) fabriquées avec les techniques de l'industrie électronique.

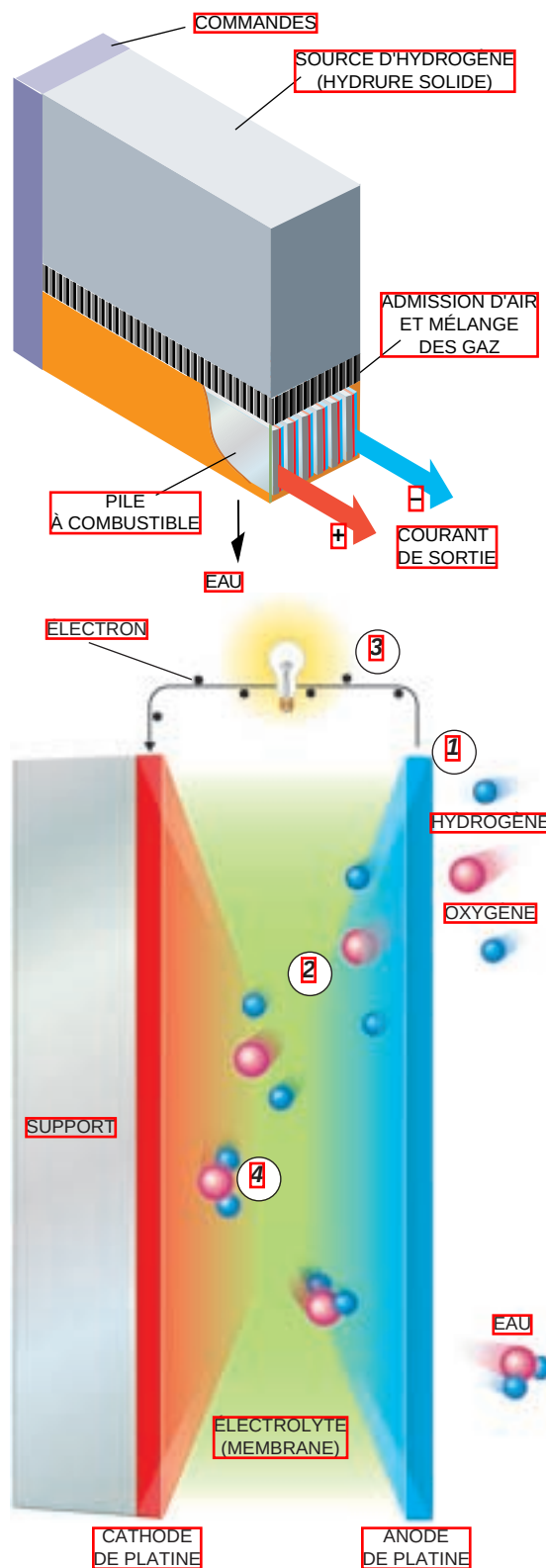
alliages bon marché, tels ceux de lanthane et de nickel, ou de fer et de titane, sont aussi utilisables : l'hydrogène est rapidement extractible à la température et à la pression ambiantes, et l'on n'a pas besoin de sous-systèmes complémentaires. Les hydrures métalliques sont aussi facilement rechargeables en hydrogène : 30 minutes suffisent à 0° C. Des électrolyseurs d'eau domestiques pourraient, dans le futur, produire l'hydrogène nécessaire à cette recharge.

D'autres hydrures, tels ceux contenant du lithium, de l'aluminium, du sodium ou du bore, sont aussi une source pratique d'hydrogène. Plus légers que les précédents, ils sont toutefois coûteux, non rechargeables et laissent un résidu corrosif. Les hydrures organiques liquides, tels la décaline et le méthylcyclohexane, sont beaucoup moins coûteux, mais l'extraction de l'hydrogène à partir de ces composés nécessite de les chauffer à plus de 200 °C en présence d'un catalyseur.

Le méthanol est aussi une bonne source d'hydrogène pour les petites piles à combustible. Cet alcool, riche en énergie, est peu coûteux (on peut le produire à partir du gaz naturel par fermentation de matières végétales à un prix équivalant à celui de l'essence) et facile à manipuler : un téléphone cellulaire pourrait fonctionner avec des ampoules de méthanol vendues dans les grandes surfaces.

Toutefois, l'extraction d'hydrogène du méthanol par une réaction chimique nommée reformage produit aussi du dioxyde de carbone et du monoxyde de carbone. Ce dernier, bien que produit en petites quantités, doit être éliminé : il se fixe sur le platine et bloque son action catalytique. Ainsi, bien que de petits reformeurs réalisant l'extraction et la purification de l'hydrogène aient été récemment mis au point, le reformage du méthanol accroît la complexité et le coût de la pile à combustible.

L'oxydation directe du méthanol sans reformage est possible à moins de 100 °C, avec des



2. UNE PILE A COMBUSTIBLE en couches minces est alimentée par un mélange d'hydrogène et d'oxygène. L'électrolyte est une mince couche poreuse, de moins de un micromètre d'épaisseur, qui sépare les deux électrodes. Sur l'anode, l'hydrogène perd ses électrons (1) ; les ions ainsi formés diffusent vers la cathode à travers la membrane. L'oxygène diffuse aussi à travers l'électrolyte (2), tandis que les électrons empruntent un circuit externe (3). Sur la cathode, les ions hydrogène, les électrons et l'oxygène se combinent (4), formant de l'eau.

catalyseurs spéciaux, mais la puissance de la pile est alors inférieure. En outre, les inévitables fuites de méthanol vers la cathode, qui créent des pertes, réduisent aussi la puissance et le rendement. On évite cet inconvénient en diluant le méthanol (qui est de toute façon déjà dilué pour que la réaction se produise), mais on dilue simultanément sa densité énergétique : une membrane électrolytique imperméable au méthanol serait un meilleur remède.

Des prototypes

Plusieurs entreprises et laboratoires de recherche tentent aujourd'hui de fabriquer des micropiles à combustible. La plupart de ces travaux sont gardés secrets, mais on sait quelles approches sont étudiées.

Ainsi, les Sociétés *Ballard Power Systems* et *H Power* miniaturisent des piles à combustible existantes, pour qu'elles fournissent seulement 20 à 100 watts. Les prototypes semblent avoir des performances comparables à celles des batteries au lithium.

L'Institut Fraunhofer pour les systèmes à énergie solaire, à Fribourg, en Allemagne, et la Société *Siemens* ont construit un prototype de pile à combustible pour ordinateurs portables composé de cinq plaques très minces, contenant chacune cinq cellules. Alimentée par un hydrure métallique solide, cette série de 25 cellules produit 20 watts, ce qui est légèrement mieux en volume que les batteries au lithium.

La Société *Manhattan Scientifics* étudie une micropile à combustible qui serait produite en série par des techniques analogues à celles de l'industrie micro-électronique. Un film de plastique de 25 micromètres d'épaisseur est percé de petits trous par un bombardement de particules nucléaires, puis décapé chimiquement. Ces trous sont remplis d'un polymère conducteur, puis le film est recouvert, par dépôt sous vide, d'une barrière à perméabilité sélective (qui empêche les fuites

de méthanol), de deux films métalliques constituant les électrodes, du catalyseur et du réseau conducteur qui relie les piles.

Ces piles à combustible peuvent être remplies directement de méthanol dilué. Elles ne délivrent aujourd'hui qu'une faible puissance, mais elles pourraient être assemblées en série dans un faible volume pour dépasser les performances des batteries au lithium. Elles resteront toutefois insuffisantes pour les démarrages, qui nécessiteront l'assistance d'une batterie, également indispensable lors des pics de consommation.

Le Laboratoire américain de propulsion spatiale et l'Université de Californie du Sud mettent aussi au point, ensemble, une micropile dont le combustible serait le méthanol, dont l'électrolyte serait un polymère et dont l'anode serait couverte d'un catalyseur composé d'un alliage de platine et de ruthénium. Des prototypes fournissant une puissance de 10, 40, 150 watts et plus ont fonctionné pendant plus de huit jours en continu à la température de 90 °C.

Comme ces piles ne fonctionnent pas dès qu'il y a plus de deux pour cent de méthanol dans l'eau, on fait passer l'eau produite à la cathode vers une cavité voisine, l'anode, où elle dilue le méthanol pur, augmentant ainsi le rendement du système tout en minimisant sa taille. L'ensemble du système fournit aujourd'hui 30 watts par litre, et l'objectif est de tripler ce chiffre d'ici à la fin de 1999.

La plus mince

Depuis 1990, j'étudie une pile à combustible en couches minces alimentée par un mélange d'hydrogène et d'oxygène. C'est probablement la pile la plus mince et la plus légère proposée jusqu'ici. Son fonctionnement simple devrait permettre de produire un système plus compact et moins cher que les autres. L'électrolyte, perméable aux gaz, a moins d'un micromètre d'épaisseur. Cette membrane est en sandwich entre deux films minces de platine, les deux électrodes, dont l'un est exposé au mélange gazeux et l'autre en est isolé par un support (voir la figure 2).

Les molécules d'hydrogène perdent des électrons sur l'électrode de platine en contact direct avec le mélange gazeux, et se décomposent

L'énergie des piles à combustible		
ÉNERGIE ÉLECTROCHIMIQUE STOCKÉE (en wattheures)		
	En masse (par kilogramme)	En volume (par litre)
PILES À COMBUSTIBLE		
Décane ($C_{10}H_{18}$)	2 400	2 100
Hydrogène liquide	33 000	2 500
Borohydrure de lithium ($LiBH_4$ et $4H_2O$)	2 800	2 500
Hydruure métallique solide ($LaNi_5H_6$)	370	3 300
Méthanol	6 200	4 900
Hydrogène dans des nanofibres de graphite	16 000	32 000
ACCUMULATEURS		
Plomb	30	80
Nickel-cadmium	40	130
Nickel-hydruure métallique	60	200
Ion lithium	130	300

Note : On suppose que l'oxydation de l'hydrogène et des combustibles hydrocarbonés est totale. Les valeurs sont théoriques (maximum thermodynamique), sauf pour les hydruures métalliques et pour les nanofibres de graphite. Les chiffres indiqués pour ces deux matériaux concernent l'hydrogène extractible. Pour les nanofibres de graphite, encore à l'étude, on estime la densité à deux grammes par centimètre cube. Pour les accumulateurs, les valeurs correspondent aux énergies électrochimiques réellement disponibles.

en ions hydrogène, qui diffusent très vite à travers la membrane, vers l'autre électrode. Là, ils se recombinaient avec les électrons, apportés par le circuit électrique externe, et avec l'oxygène qui a aussi diffusé, produisant de l'eau. La différence de potentiel, aux bornes de la pile est égale à un volt. Elle fonctionne grâce à la proximité des deux électrodes, qui permet une diffusion rapide dans l'électrolyte.

Une seule cellule de ce type, d'une surface de 16 centimètres carrés, fournirait jusqu'à 0,85 watt. Ainsi, une série de six cellules, d'une épaisseur totale de un centimètre seulement, fournirait jusqu'à cinq watts (trois volts avec un courant de 1,7 ampère). Des piles à combustible compactes délivreraient ainsi jusqu'à 1 000 wattheures par kilogramme d'hydruure solide et jusqu'à 1 400 wattheures par litre de méthanol, nettement plus, à masse égale, que les accumulateurs au lithium.

Ces différentes piles à combustible miniatures ne sont encore que des prototypes. La production en série les mettra-t-elle à un prix inférieur à celui des accumulateurs ? Les coûts seraient réduits si l'on trouvait une source d'hydrogène plus facile à utiliser que le méthanol ou que les hydruures

métalliques. Récemment, Terry Baker et ses collègues de l'Université Northeastern ont présenté des tubes de graphite dont un seul gramme contiendrait dix litres d'hydrogène. En théorie, 0,5 litre seulement de ce matériau alimenterait un ordinateur portable de 20 watts en continu pendant plus d'un mois.

Les piles à combustible l'emporteront-elles sur les accumulateurs grâce au carbone ? Ce serait un retournement de situation amusant : on a mis au point les accumulateurs au lithium qui équipent aujourd'hui les appareils électroniques portables quand on a découvert que certaines formes du carbone peuvent contenir d'importantes quantités de lithium.

Christopher DYER est ingénieur de la Société Motorola.

John O'M. BOCKRIS et Supramaniam SRINIVASAN, *Fuel Cells : Their Electrochemistry*, McGraw-Hill, 1969.

A.J. APPLEBY et F.R. FOULKES, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1989.

C.K. DYER, *A Novel Thin-Film Electrochemical Device for Energy Conversion*, in *Nature*, vol. 343, pp. 547-548, 8 février 1990.

Vaccins génétiques

DAVID WEINER • RONALD KENNEDY

Les biologistes mettent au point des vaccins en assemblant des séquences génétiques. Ils espèrent ainsi lutter efficacement contre le SIDA, le paludisme et d'autres maladies qui résistent aux techniques d'immunisation actuelles.

La vaccination est un progrès indubitable de la médecine : des vaccins ont éradiqué la variole, quasiment supprimé la poliomyélite et sauvé des millions de personnes du typhus, du tétanos, de la rougeole, des hépatites A et B, et d'autres infections graves. Pourtant, de nombreuses maladies mortelles ou invalidantes, notamment le paludisme, le SIDA, l'herpès et l'hépatite C, résistent à l'immunisation, car les vaccins classiques contre ces maladies sont peu efficaces ou font courir des risques inacceptables.

Après avoir été considérés comme dangereux, les vaccins contenant du matériel génétique, tel l'ADN ou l'ARN, sont activement testés. Les premiers essais montrent que ce sont des produits prometteurs.

Les vaccins à l'œuvre

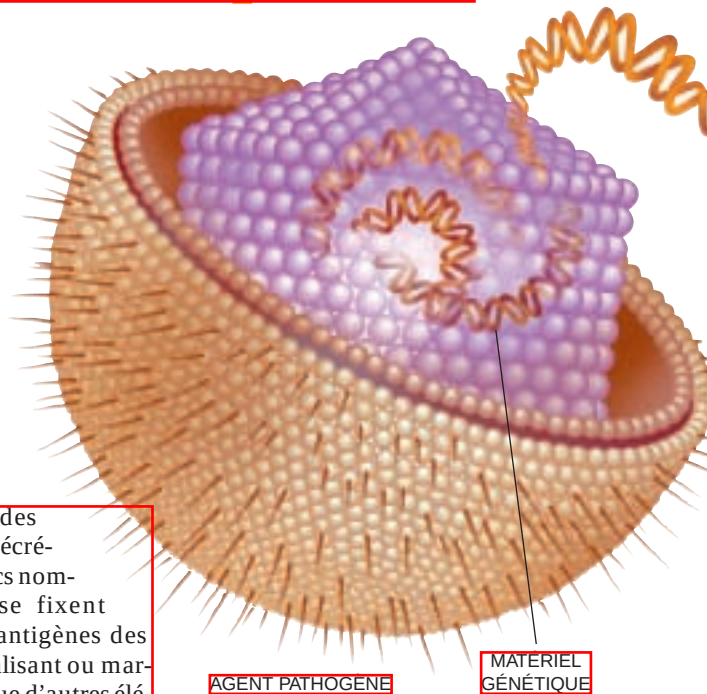
Comme les vaccins classiques, les vaccins génétiques préparent le système immunitaire à neutraliser rapidement des virus, des bactéries ou des parasites dangereux, avant qu'ils ne s'installent dans l'organisme. Les vaccins classiques dupent le système immunitaire parce qu'ils contiennent une forme tuée ou atténuée d'un agent pathogène ou un fragment de cet agent. L'organisme réagit alors comme s'il était assailli par un micro-organisme vivant et actif.

Quand le système immunitaire détecte des antigènes (des protéines ou des sucres produits uniquement par l'agent pathogène), il les attaque de deux manières : la voie humorale et la voie cellulaire. La première vise les agents

pathogènes situés hors des cellules : des anticorps sécrétés par des globules blancs nommés lymphocytes B se fixent spécifiquement sur les antigènes des agents infectieux, neutralisant ou marquant ces derniers, afin que d'autres éléments du système immunitaire les détruisent. La voie cellulaire fait intervenir des lymphocytes T cytotoxiques qui éliminent les agents pathogènes qui ont colonisé les cellules de l'organisme : les lymphocytes T cytotoxiques repèrent des fragments de protéines exposés à la surface des intrus ou des cellules de l'organisme qui ont absorbé ceux-ci. Un contact suffit pour que les cellules infectées et les agents pathogènes soient détruits. Des lymphocytes T auxiliaires activent et coordonnent l'ensemble des mécanismes humoraux et cellulaires.

Par ailleurs, l'activation du système immunitaire provoque l'apparition de cellules qui mémorisent les caractéristiques de l'agent pathogène et accélèrent la réaction de l'organisme lors d'une attaque ultérieure. Les vaccins protègent en induisant, de façon similaire, la formation des cellules à mémoire : l'organisme est immunisé.

Idéalement, un vaccin doit être efficace et sans danger. Les vaccins classiques le sont-ils ? Les agents pathogènes tués (tels le vaccin contre l'hépatite A ou les vaccins injectables contre la poliomyélite) ou les antigènes isolés à partir d'agents pathogènes (le vaccin contre l'hépatite B) n'infectent pas les cellules, de sorte qu'ils sont bloqués par des réactions humorales et n'activent pas les lymphocytes T cytotoxiques. De telles



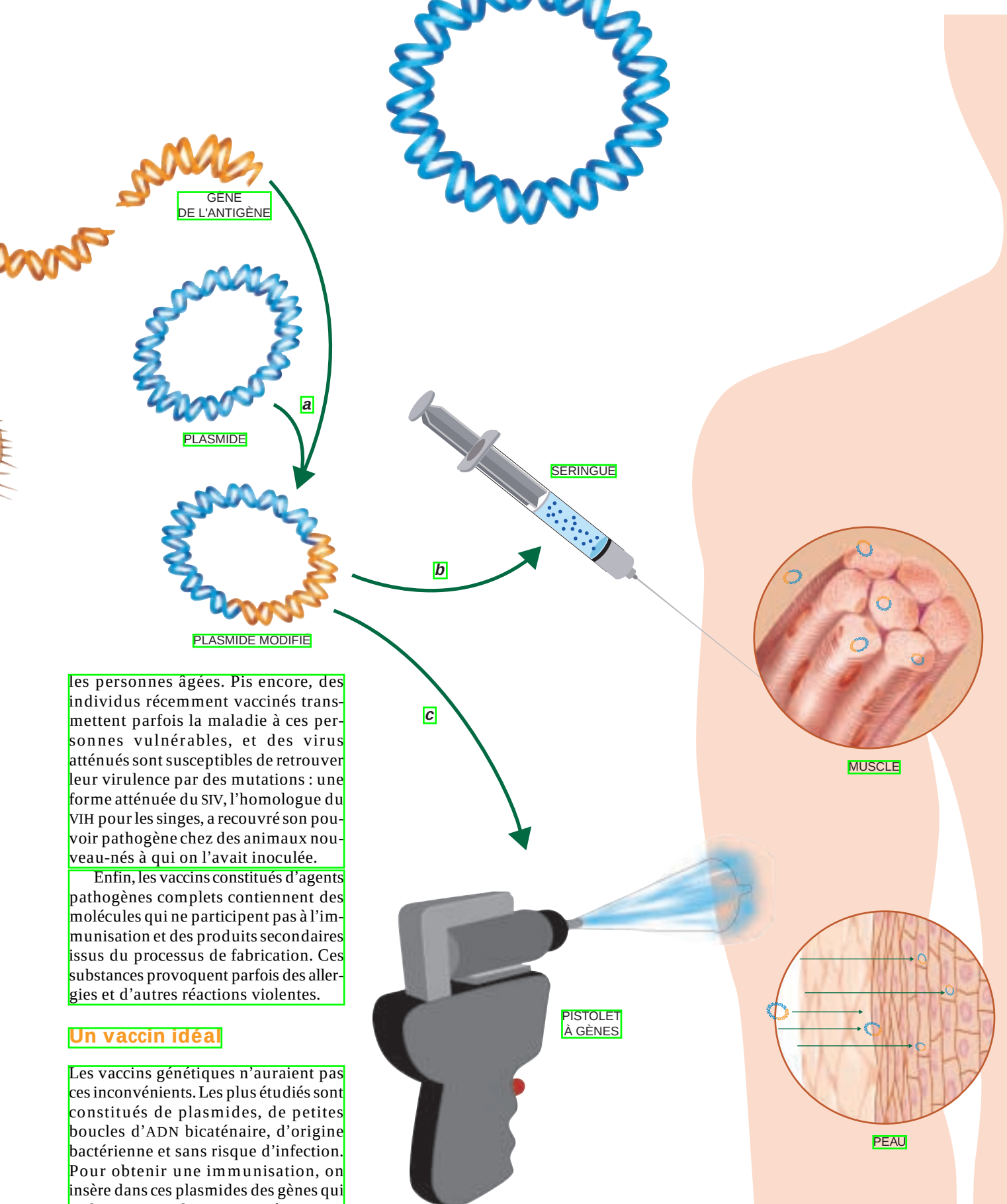
AGENT PATHOGENE

MATERIEL GÉNÉTIQUE

réactions sont inefficaces contre de nombreux micro-organismes qui pénètrent dans les cellules. De surcroît, la protection par des virus morts est souvent provisoire et nécessite des rappels périodiques.

En revanche, les micro-organismes vivants atténués, généralement des virus, pénètrent dans les cellules et libèrent des antigènes qui sont ensuite exposés par les cellules infectées. Ces antigènes activent ainsi les lymphocytes T cytotoxiques et, de plus, déclenchent la libération d'anticorps. Cette double activité – humorale et cellulaire – bloque l'infection par de nombreux virus et assure une immunité forte dans les cas où une réaction humorale seule serait probablement insuffisante. De même, les vaccins vivants, tels ceux de la rougeole, des oreillons, de la rubéole, de la poliomyélite par voie orale ou de la variole confèrent souvent une immunité de longue durée.

Malgré leur supériorité, ces vaccins vivants ne sont pas la panacée : certains sont insuffisamment efficaces chez quelques individus ou, au contraire, ils provoquent parfois des troubles chez des personnes dont le système immunitaire est défaillant, telles les personnes atteintes d'un cancer et traitées par chimiothérapie, les victimes du SIDA ou



les personnes âgées. Pis encore, des individus récemment vaccinés transmettent parfois la maladie à ces personnes vulnérables, et des virus atténués sont susceptibles de retrouver leur virulence par des mutations : une forme atténuée du SIV, l'homologue du VIH pour les singes, a recouvré son pouvoir pathogène chez des animaux nouveaux-nés à qui on l'avait inoculée.

Enfin, les vaccins constitués d'agents pathogènes complets contiennent des molécules qui ne participent pas à l'immunisation et des produits secondaires issus du processus de fabrication. Ces substances provoquent parfois des allergies et d'autres réactions violentes.

Un vaccin idéal

Les vaccins génétiques n'auraient pas ces inconvénients. Les plus étudiés sont constitués de plasmides, de petites boucles d'ADN bicaténaire, d'origine bactérienne et sans risque d'infection. Pour obtenir une immunisation, on insère dans ces plasmides des gènes qui codent une ou plusieurs protéines antigéniques normalement synthétisées par un agent pathogène, évitant soigneusement les gènes qui permettraient un assemblage des particules virales ou le déclenchement d'une maladie.

1. POUR FABRIQUER UN VACCIN GÉNÉTIQUE, on isole un ou plusieurs gènes d'un agent pathogène que l'on insère dans des plasmides (a), des boucles d'ADN. On introduit alors ces plasmides dans des cellules, souvent par injection intramusculaire (b) ou par un pistolet à gènes (c). Les gènes sélectionnés codent des antigènes – des substances qui provoquent la réaction immunitaire – synthétisés normalement par l'agent pathogène.

Ces vaccins sont administrés par injection ou à l'aide d'un «pistolet à gènes». L'injection, généralement en intramusculaire, amène les plasmides près des cellules musculaires, tandis que le pistolet à gènes utilise de l'hélium pour propulser de petites billes d'or, recouvertes des plasmides, dans les cellules superficielles de la peau ou des muqueuses. Quelques plasmides recombinés atteignent le noyau de cellules de l'organisme et leur font synthétiser les protéines codées par les gènes insérés dans les plasmides. Comme les protéines d'un agent pathogène actif, ces protéines déclenchent une immunité humorale (la libération d'anticorps) lorsqu'elles sortent des cellules, et une immunité cellulaire (l'activation de lymphocytes *T* cytotoxiques) quand elles sont dégradées et exposées à la surface des cellules qui les produisent ou qui les absorbent.

Bien que les vaccins à ADN activent les deux voies du système immunitaire, ils ne provoquent pas d'infection, car ils sont dépourvus des gènes nécessaires à la réplication de l'agent pathogène. Simples à concevoir et à produire en grandes quantités à un coût relativement faible, ils sont aussi stables que les autres vaccins. Enfin, l'insertion de gènes de différentes souches d'un agent pathogène procurerait en une seule vaccination une immunité contre plusieurs souches de micro-organismes variables, tels le virus de la grippe et le VIH.

Quelques biologistes testent des vaccins constitués d'ARN, une molécule analogue à l'ADN, mais composée d'un seul brin. Dans les cellules, l'ARN est l'intermédiaire de synthèse entre les gènes, composés d'ADN, et les protéines qu'ils codent. L'ARN est une molécule moins stable que l'ADN, de sorte que les vaccins à ARN seraient

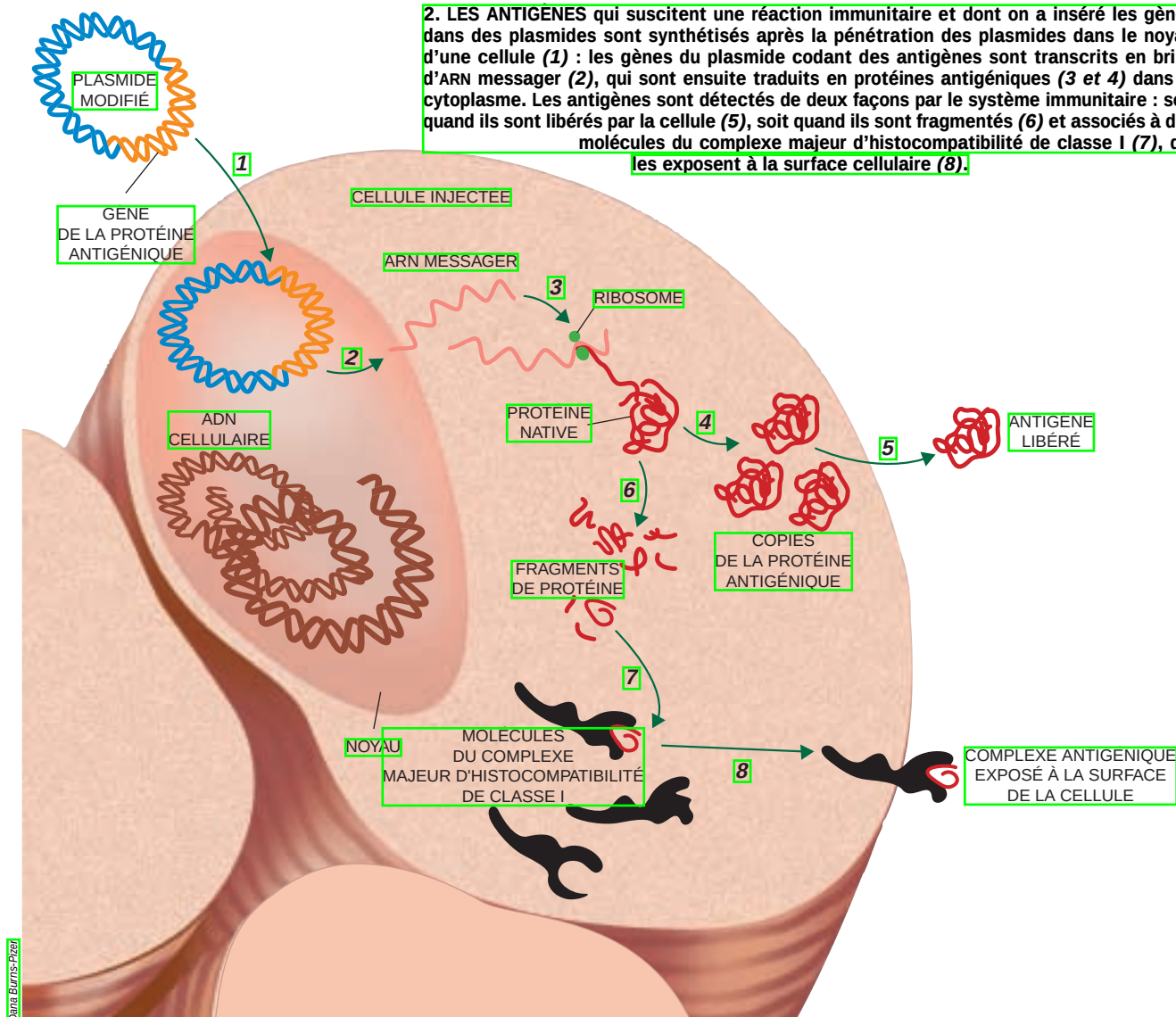
difficiles à fabriquer et à stocker. À terme, on palliera probablement ces défauts. Ici, nous ne considérerons que les vaccins à ADN, plus étudiés.

De l'indésirable au convoité

Les vaccins génétiques sont nés d'un demi-siècle d'études fondamentales. Dans les années 1950 et 1960, des expériences sans rapport avec les vaccins ont montré que l'introduction de matériel génétique dans les cellules d'un animal déclenche la synthèse des protéines codées, ainsi que celle d'anticorps ciblés contre ces protéines. Ultérieurement, quelques biologistes ont même utilisé ce phénomène pour établir que des gènes codaient des protéines.

Puis, dans les années 1970 et au début des années 1980, les biologistes qui étudiaient la thérapie génique

2. LES ANTIGÈNES qui suscitent une réaction immunitaire et dont on a inséré les gènes dans des plasmides sont synthétisés après la pénétration des plasmides dans le noyau d'une cellule (1) : les gènes du plasmide codant des antigènes sont transcrits en brins d'ARN messager (2), qui sont ensuite traduits en protéines antigéniques (3 et 4) dans le cytoplasme. Les antigènes sont détectés de deux façons par le système immunitaire : soit quand ils sont libérés par la cellule (5), soit quand ils sont fragmentés (6) et associés à des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe I (7), qui les exposent à la surface cellulaire (8).



(l'introduction, dans un organisme malade, de gènes destinés à corriger des désordres héréditaires) ont remarqué que des protéines synthétisées à partir de gènes thérapeutiques étaient parfois détruites par des réactions immunitaires.

Enfin, au début des années 1990, quelques équipes ont cherché si ces réactions, initialement jugées néfastes, pouvaient être utilisées pour des vaccinations. La plupart des biologistes étaient sceptiques : l'immunité engendrée suffirait-elle à bloquer une infection ? En 1992, quatre équipes, dont celle de l'un d'entre nous (D. Weiner), ont montré que ce scepticisme n'était pas justifié.

D'une part, l'inoculation de vaccins à ADN dans des cellules stimule le système immunitaire de rongeurs et de primates, provoquant des réactions humorales et cellulaires contre plusieurs agents pathogènes et également contre certains cancers ; d'autre part, plusieurs types d'administration différents conduisent à la même protection. De surcroît, des techniques qui favorisent l'introduction de l'ADN dans les cellules renforcent les réactions.

Le premier test clinique a été effectué en 1995 : on a inoculé des plasmides contenant des gènes du VIH à des patients déjà infectés par ce virus, afin d'établir l'innocuité d'un vaccin génétique. Puis, en 1996, des médecins ont injecté pour la première fois des gènes (codant des protéines du VIH ou du virus de la grippe) à des personnes saines, et non à des personnes infectées par un virus. Aucun effet secondaire notable n'est apparu.

Certains vaccins testés visent à prévenir diverses infections, tels le SIDA, l'herpès, la grippe, l'hépatite B et le paludisme ; d'autres doivent renforcer l'immunité réduite de patients déjà infectés par le VIH, d'autres encore devraient être des traitements contre des cancers, notamment les lymphomes et les affections malignes de la prostate et du côlon (bien que les cancers

ne soient pas des maladies infectieuses, le renforcement immunitaire devrait aider l'organisme à lutter contre eux).

Les premières observations sont encourageantes : des vaccins contre le VIH ont stimulé des réactions humorales et cellulaires ; des plasmides porteurs d'antigènes du parasite responsable du paludisme ont provoqué des réactions immunitaires cellulaires notables ; et un vaccin contre l'hépatite B a entraîné une synthèse d'anticorps suffisante, chez un patient, pour prévenir l'infection. Toutefois, dans de nombreux cas, les vaccins génétiques devront probablement être associés à des molécules, nommées adjuvants, qui stimulent le système immunitaire.

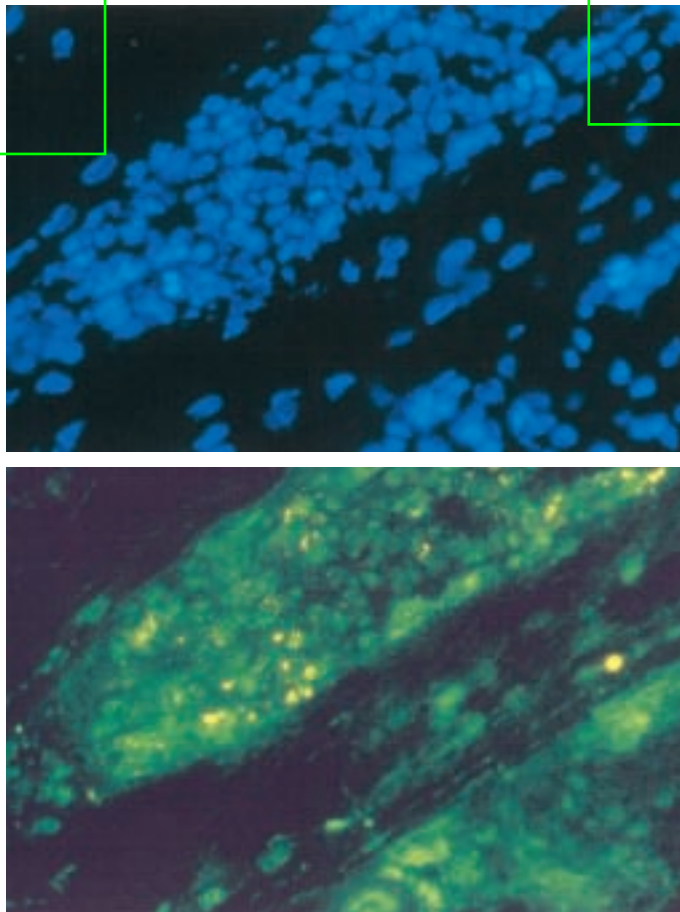
Vaccin génétique : mode d'emploi

L'étude du fonctionnement des vaccins à ADN devrait fournir des indications propres à renforcer leur efficacité. Pendant des années, les immunolo-

gistes n'ont pas compris comment les vaccins à ADN activent les lymphocytes T cytotoxiques... En théorie, de simples morceaux d'ADN, insérés dans des cellules qui exposent ensuite à leur surface des fragments des antigènes codés, ne devraient pas agir ainsi. Des cellules présentatrices d'antigènes (d'autres globules blancs) devraient d'abord exposer les mêmes fragments antigéniques que les cellules inoculées, accompagnées d'une molécule co-stimulatrice, un second signal ; les lymphocytes T ne détruisent les cellules infectées qu'après avoir reconnu les cellules présentatrices d'antigènes (voir l'encadré des deux pages suivantes).

Contrairement à ce que de nombreux biologistes pensaient, on a progressivement compris que quelques plasmides parviennent jusqu'aux cellules présentatrices d'antigènes, qui disposent alors des antigènes à côté des molécules co-stimulatrices et déclenchent ainsi l'activation des lymphocytes T. En pratique, on devra donc privilégier les modes d'administration qui favorisent l'insertion des plasmides dans les cellules de présentation des antigènes.

D'autres études récentes ont montré que l'ADN plasmidique, qui véhicule les gènes codant les antigènes, renforce également la réaction immunitaire provoquée par les antigènes, probablement grâce à une proportion différente des composants de l'ADN. L'ADN est une double hélice composée par l'enchaînement de groupes chimiques nommés nucléotides, qui se distinguent par les « bases azotées » qu'ils contiennent ; ces bases sont l'adénine (A), la guanine (G), la cytosine (C) ou la thymine (T). Dans l'ADN des plasmides bactériens, la fréquence des séquences guanine-cytosine (GC) est supérieure à celle de l'ADN des vertébrés. En outre, les séquences GC des plasmides bactériens sont souvent dépourvues de groupe méthyle ($-CH_3$), contrairement à l'ADN des vertébrés.



3. CES CELLULES MUSCULAIRES, colorées en bleu par un marqueur (en haut), ont intégré un gène du VIH après la vaccination par un plasmide où l'on avait inséré ce gène. La protéine codée par le gène viral est repérée par un marqueur vert (en bas). Ces micrographies démontrent que les vaccins à ADN provoquent la synthèse des protéines nécessaires aux réactions immunitaires.

DÉPÔT : SVENOD / UNIVERSITÉ D'ASTORIA

Comment fonctionnent les vaccins à ADN



Apparemment, l'organisme des vertébrés interprète la présence de paires GC non méthylées comme un signal de danger : des mécanismes immunitaires primitifs tenteraient alors d'éliminer l'envahisseur sans chercher à reconnaître des antigènes.

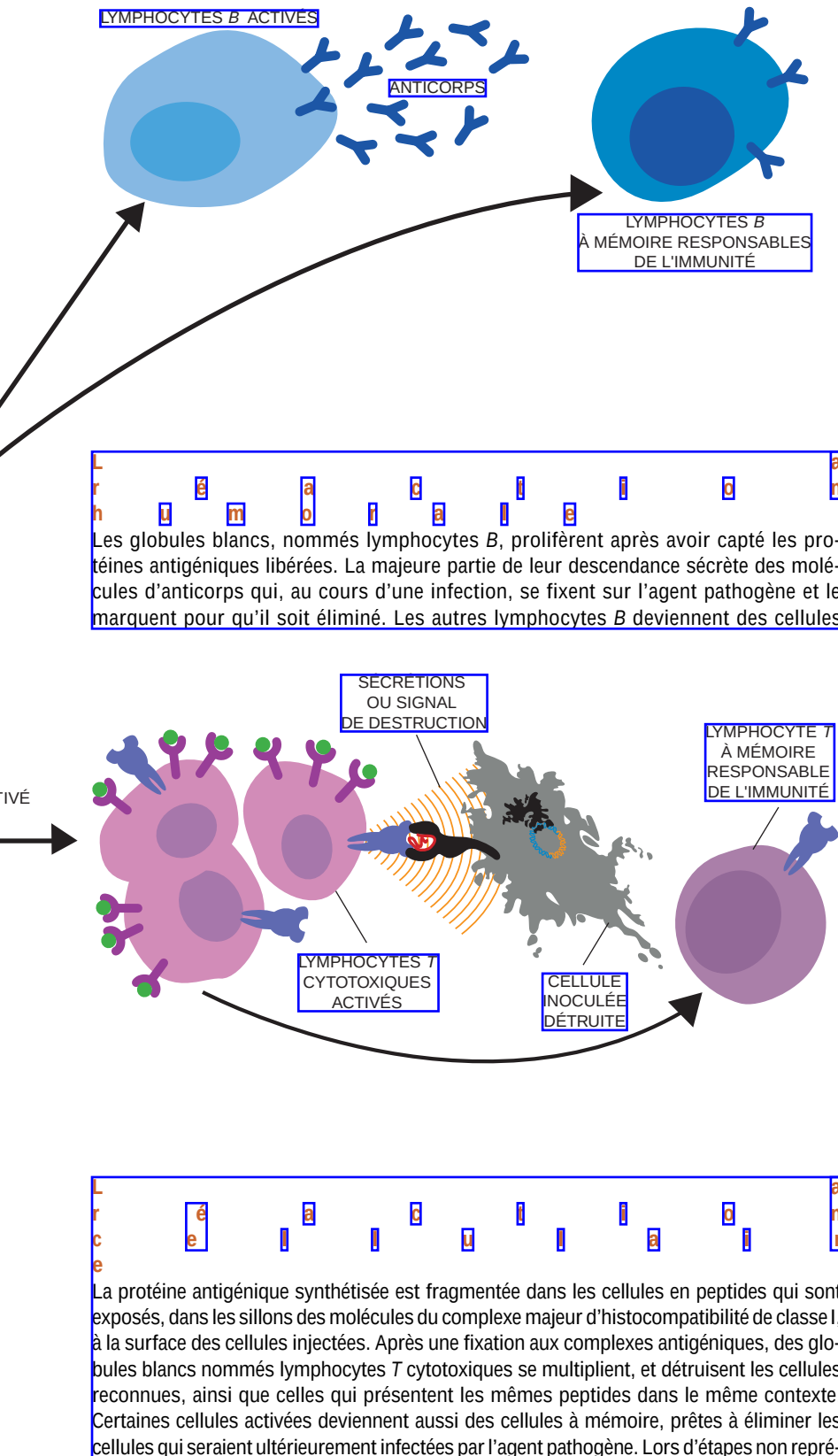
Ingénierie pour un effet optimal

Tandis que des équipes explorent le mode d'action des vaccins génétiques, des immunologistes cherchent à accroître la réactivité immunitaire globale et à favoriser les réactions cellulaires. Certains ont montré que l'ADN plasmidique provoque une réaction immunitaire maximale lorsque les séquences GC sont accompagnées de deux purines (A ou T) du côté de la cytosine, et de deux pyrimidines (G ou C) du côté de la guanine. Chez des souris, les plasmides comportant de telles séquences immunostimulantes induisent une activité des lymphocytes T cytotoxiques et des anticorps plus importante que celle que provoquent les mêmes plasmides sans ces séquences.

D'autres groupes étudient les molécules, nommées cytokines, que les cellules du système immunitaire libèrent pour régler leurs propres activités, ainsi que les activités des autres globules blancs. L'incorporation de gènes codant des cytokines, dans les plasmides porteurs d'antigènes ou dans des plasmides séparés, stimule la réaction immunitaire. Par exemple, l'inclusion du gène d'un facteur de prolifération de cellules précurseurs de certains globules blancs amplifie l'ensemble des réactions immunitaires, en stimulant l'apparition des cellules présentatrices d'antigènes.

D'autres équipes encore étudient l'effet des gènes codant des cytokines qui activent les lymphocytes T cytotoxiques. Chez la souris et chez l'être humain, des lymphocytes T auxiliaires, nommés *Th1*, sécrètent des cytokines qui favorisent la réaction cellulaire, tandis que les cytokines des lymphocytes *Th2* favorisent la synthèse d'anticorps.

Ainsi, un vaccin incluant des gènes qui codent des antigènes du VIH et l'interleukine-12 (une cytokine de lymphocyte *Th1* classique) diminue la production des anticorps anti-VIH chez des souris « immunisées », mais augmente la capacité de réaction des lymphocytes T cytotoxiques aux antigènes du VIH. Cette observation est très



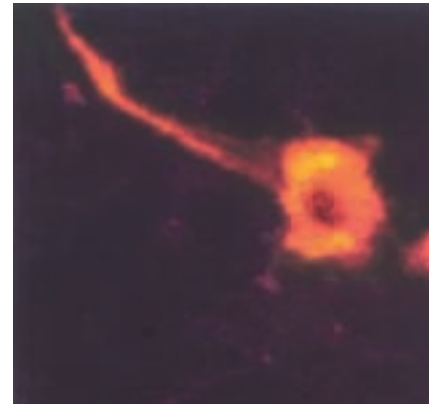
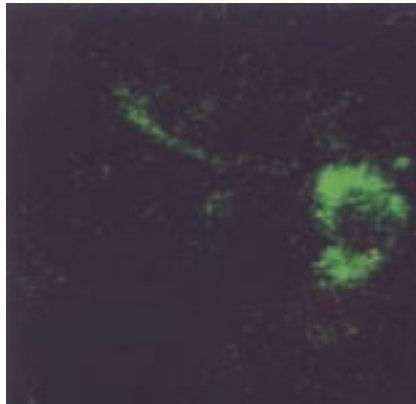
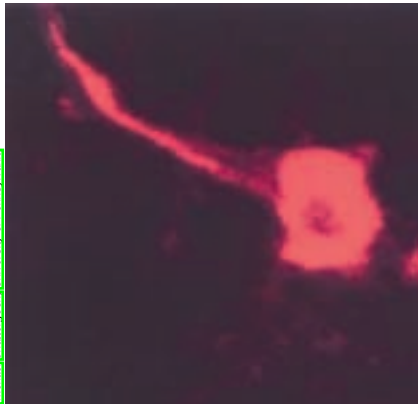
encourageante, car des expériences récentes indiquent que l'activation des lymphocytes *T* cytotoxiques est la clé d'un blocage de la réplication du VIH.

On pourrait également introduire, dans les plasmides vaccinaux, des gènes qui codent les chémokines, de

petites molécules qui attirent les cellules présentatrices d'antigènes et des lymphocytes *T* vers les tissus lésés ou infectés. Comme les cytokines, chacune de ces substances agit sur des cellules particulières et a des effets spécifiques. Un choix approprié de

gènes de chémokines et de gènes de cytokines optimisera le type de réaction immunitaire et son intensité.

Enfin, on imagine même de fabriquer des vaccins qui n'activeraient pas les cellules présentatrices d'antigènes classiques : si l'on introduisait dans les



4. L'ABSORPTION des vaccins à ADN par les cellules présentatrices d'antigènes est essentielle à l'induction de l'immunité. Dans un tissu exposé à un vaccin à ADN, les cellules présentatrices d'antigènes ont été marquées en rouge (à gauche), et les cellules qui ont synthé-

tisé l'antigène codé par le vaccin, en vert (au centre). Sur la superposition des deux images, les cellules présentatrices d'antigènes ayant absorbé le vaccin et produit la protéine codée apparaissent en orange (à droite).

Les test des vaccins à ADN

Ce tableau répertorie certains des tests cliniques qui évaluent l'innocuité et l'efficacité immunitaire des vaccins

à ADN. Tous les vaccins testés ont été bien tolérés, et les déterminations d'efficacité sont en cours.

OBJECTIF	PROTÉINES CODÉES PAR LES GÈNES	RÉSULTATS
Prévention de l'hépatite B	Antigène de surface de l'hépatite B	Réactions humorales et cellulaire
Prévention de l'herpès	Glycoprotéine de l'herpès	Analyses immunologiques en cours
Prévention du SIDA	Protéines de l'enveloppe et de régulation, ou protéines de la capsid et enzymes de réplication	Réactions cellulaires (l'ensemble des gènes sera probablement testé dans un seul vaccin)
Prévention de la grippe	Héماغlutinine	Analyses immunologiques en cours (l'essai est terminé)
Prévention du paludisme	Protéine d'une des formes du parasite	Réactions cellulaires
Thérapie du SIDA	Protéines de l'enveloppe et régulatrices, ou protéines TAT, NEF et régulatrices	Réactions humorales dans le premier essai. Réactions cellulaires dans un autre essai
Thérapie du SIDA	Protéines de l'enveloppe, régulatrices et de la capsid, et enzymes impliquées dans la réplication du VIH	Ce vaccin a été associé à une trithérapie, analyses immunologiques en cours
Thérapie des adénocarcinomes du sein et de l'intestin	Antigène carcinoembryonnaire	Réactions cellulaires
Thérapie des lymphomes des lymphocytes B	Immunoglobuline	Réactions humorales
Thérapie des lymphomes cutanés des lymphocytes T	Récepteur de lymphocyte T	Analyses immunologiques en cours (l'essai est terminé)
Thérapie du cancer de la prostate	Antigène spécifique de la membrane prostatique	Analyses immunologiques en cours

plasmides le gène d'un antigène associé au gène d'une molécule co-stimulatrice normalement synthétisée par une cellule présentatrice d'antigènes, les cellules inoculées présenteraient alors à la fois l'antigène et le second signal essentiel.

La programmation des vaccins

Lorsque l'efficacité des vaccins génétiques sera établie, les médecins ajouteront probablement des plasmides vaccinaux à des vaccins classiques, afin d'améliorer les effets de ces derniers. Par exemple, si l'on connaît une protéine qui provoque seulement l'apparition d'une réaction humorale efficace et un plasmide qui induit une réaction cellulaire, on mélangera les deux composants, afin d'obtenir une meilleure efficacité. Puis, quand on connaîtra plus finement les activations des diverses cellules immunitaires, on ne construira plus que des vaccins génétiques.

Naturellement, bien des questions subsistent, et la tâche des immunologistes est titanesque. L'ADN délivré en tant que médicament induit-il une réaction immunitaire contre le propre ADN de l'organisme? Avec la plupart des vaccins à ADN, la synthèse de protéines antigéniques cesse au bout d'un mois environ : en augmentant la durée de vie du plasmide, renforce-t-on l'immunité ou, au contraire, provoque-t-on une attaque des tissus sains, non vaccinés? Quelle est la durée de l'immunité chez les êtres humains? Pourquoi les réactions immunitaires varient-elles chez les divers individus? Quels sont les doses et les systèmes d'administration les plus efficaces? Comment peut-on mieux cibler certaines cellules, par exemple les cellules présentatrices d'an-

tigènes, et augmenter la capture cellulaire des plasmides? Quels gènes des agents pathogènes sont-ils les plus efficaces et les plus sûrs?

Les essais cliniques qui évaluent l'efficacité de la première génération des vaccins à ADN seront terminés dans plus de dix ans. Que ces premiers vaccins soient ou non commercialisés, ils éclaireront les mécanismes fondamentaux de l'immunité et serviront à la conception de vaccins de deuxième génération, plus efficaces.

Aujourd'hui, les immunologistes ignorent quels sont les meilleurs composants immunitaires contre les divers agents pathogènes et comment activer ces composants. Toutefois, des plans d'expériences bien faits et de nombreux vaccins génétiques testés sur de petits animaux devraient rapidement donner les informations nécessaires à la conception de vaccins efficaces.

En préparation de ces études, des biologistes créent des «banques de gènes d'agents pathogènes», composées de nombreux plasmides portant chacun un gène. On prévoit d'administrer à des animaux de laboratoire des groupes de tels plasmides, avant d'infecter les animaux vaccinés par les agents pathogènes vivants. On identifiera le lot le plus efficace, puis on le subdivisera, et l'on répétera les tests jusqu'à l'obtention du mélange d'antigènes le plus efficace.

Lorsque les mécanismes immunitaires de l'organisme face aux divers agents pathogènes seront ainsi élucidés, les immunologistes concevront des vaccins qui provoqueront des réactions précises. La rationalisation de la mise au point des vaccins génétiques autorisera probablement de nouvelles thérapies immunitaires contre le cancer et contre de nombreuses infections aujourd'hui incurables.

David WEINER est professeur de pathologie à l'Université de Pennsylvanie. Ronald KENNEDY est professeur d'immunologie et de microbiologie à l'Université de l'Oklahoma.

J.B. ULMER et al., *Heterologous Protection against Influenza by Injection of DNA Encoding a Viral Protein*, in *Science*, vol. 259, pp. 1745-1749, 19 mars 1993.
M.A. BARRY, W.C. LAI et S.A. JOHNSTON, *Protection against Mycoplasma Infection Using Expression-Library Immunization*, in *Nature*, vol. 377, pp. 632-635, 19 octobre 1995.

Mark ROMAN et al., *Immunostimulatory DNA Sequences Function as T Helper-I-Promoting Adjuvants*, in *Nature Medicine*, vol. 3, n° 8, pp. 849-854, août 1997.

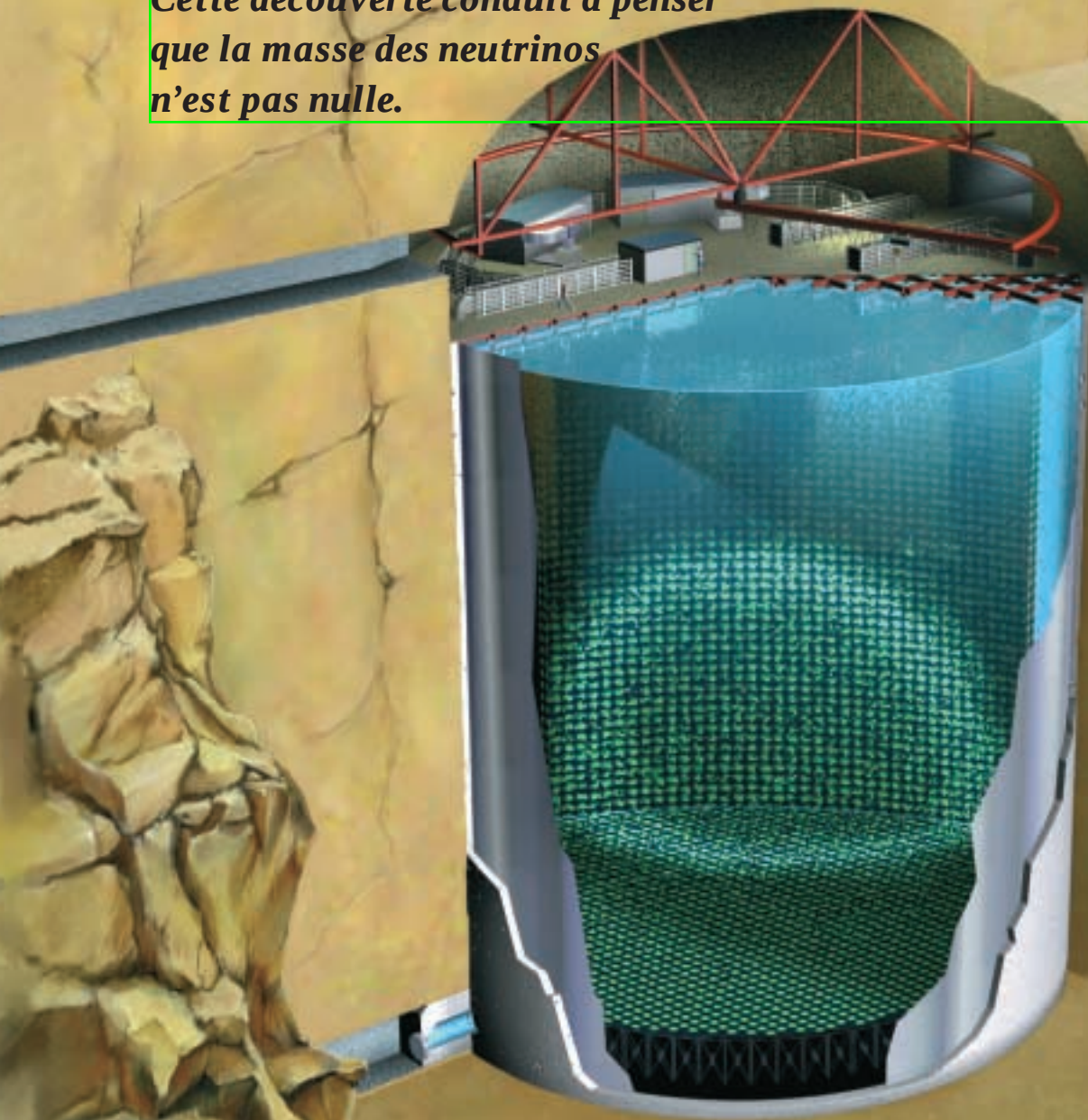
Adam D. COHEN, Jean D. BOYER et David B. WEINER, *Modulating the Immune Response to Genetic Immunization*, in *FASEB Journal*, vol. 12, n° 15, pp. 1611-1626, décembre 1998.

Harriet L. ROBINSON et al., *Neutralizing Antibody-Independent Containment of Immunodeficiency Virus Challenges by DNA Priming and Recombinant Pox Virus Booster Immunizations*, in *Nature Medicine*, vol. 5, n° 5, pp. 526-534, mai 1999.

La détection des neutrinos massifs

EDWARD KEARNS • TAKAAKI KAJITA • YOJI TOTSUKA

Sous le mont Ikenoyama, au Japon, un détecteur géant a montré que les neutrinos se métamorphosent lors de leur propagation. Cette découverte conduit à penser que la masse des neutrinos n'est pas nulle.



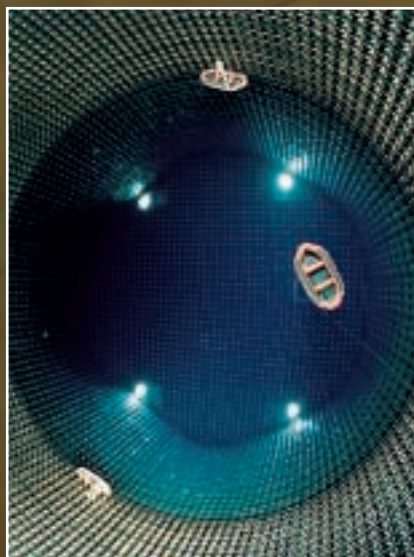
Le malheur des uns fait parfois le bonheur des autres. Le dicton vient de s'appliquer en physique. Le malheur, c'était un «bruit de fond», c'est-à-dire une réaction indésirable. Le bonheur, c'était une information importante sur le fonctionnement de l'Univers. L'histoire a commencé il y a environ 20 ans, quand plusieurs groupes de physiciens ont entrepris de distinguer la désintégration radioactive du proton, un signal excessivement rare (si tant est qu'il existe), du bruit de fond des réactions déclenchées par des particules insaisissables nommées neutrinos.

Le proton, l'un des principaux constituants des atomes, semble éternel, mais la théorie actuelle prévoit qu'il se désintégrerait en 10^{32} ans. L'observation de sa désintégration corroborerait les théories de grande unification, dont de nombreux physiciens estiment qu'elles généralisent le très fécond Modèle standard de la physique des particules. Afin d'observer cette désintégration, les physiciens ont installé de gigantesques détecteurs dans les profondeurs de la Terre, dans des mines ou dans des tunnels, où ils échappent à la pluie permanente des rayons cosmiques, des particules qui perturbent

les mesures. Toutefois, quelle que soit la profondeur à laquelle on les installait, ces détecteurs restaient exposés aux neutrinos produits dans les interactions des rayons cosmiques.

La première génération de ces détecteurs, exploitée entre 1980 et 1995, n'enregistra aucun indice de désintégration de protons. En revanche, les physiciens découvrirent que le bruit de fond des neutrinos, prétendument banal, n'était pas si facile à comprendre. L'une de ces expériences, nommée *Kamiokande*, fut installée dans le petit village minier de Kamioka, au Japon, à 250 kilomètres de Tokyo. Tout comme

1. LE DÉTECTEUR SUPER-KAMIOKANDE est installé dans une mine de zinc en activité, sous le mont Ikenoyama, au Japon. Sa cuve en acier inoxydable contient 50 000 tonnes d'une eau ultra-pure, si transparente que la lumière parcourt 70 mètres avant de perdre la moitié de son intensité (dans une piscine ordinaire, cette distance se réduit à quelques mètres). Cette eau est surveillée par 11 000 photomultiplicateurs qui tapissent les parois de la cuve. Chaque photomultiplicateur est une ampoule de verre de 50 centimètres de diamètre, soufflée à la main, couverte à l'intérieur d'une mince pellicule de métal alcalin, et au sein de laquelle on a fait le vide. Ces ampoules enregistrent les éclairs de lumière Tcherenkov, qui signalent les rares collisions d'un neutrino de haute énergie avec un noyau atomique de l'eau. Le cartouche ci-contre montre des techniciens, à bord de canots pneumatiques, en train de nettoyer les ampoules lors d'une opération de remplissage de la cuve.



Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), University of Tokyo

l'expérience IMB, située dans une mine de sel près de Cleveland, des détecteurs sensibles placés dans de l'eau ultra-pure guettaient l'éclair révélateur d'une désintégration de proton.

Comme une aiguille dans une botte de foin, un tel éclair aurait été dissimulé parmi des milliers d'éclairs semblables, engendrés par les interactions des neutrinos et des noyaux atomiques de l'eau. L'analyse ne trouva aucune désintégration de proton, mais elle livra un trésor : une preuve de l'instabilité des neutrinos, de leur transformation au cours de leur propagation.

Les neutrinos sont des particules étonnantes. Chaque seconde, 60 milliards d'entre eux, provenant pour la plupart du Soleil, traversent chaque centimètre carré de n'importe quel corps à la surface de la Terre. Cependant, comme ils interagissent rarement avec les autres particules, la quasi-totalité de ces 60 milliards de neutrinos

passent sans même effleurer un seul atome. Si l'on envoyait un tel faisceau de neutrinos sur un bloc de plomb d'une année-lumière d'épaisseur, les particules ressortiraient presque toutes sans avoir interagi au cours de la traversée. Un détecteur aussi grand que celui de *Kamiokande* ne capte qu'une infime fraction des neutrinos qui le traversent chaque année.

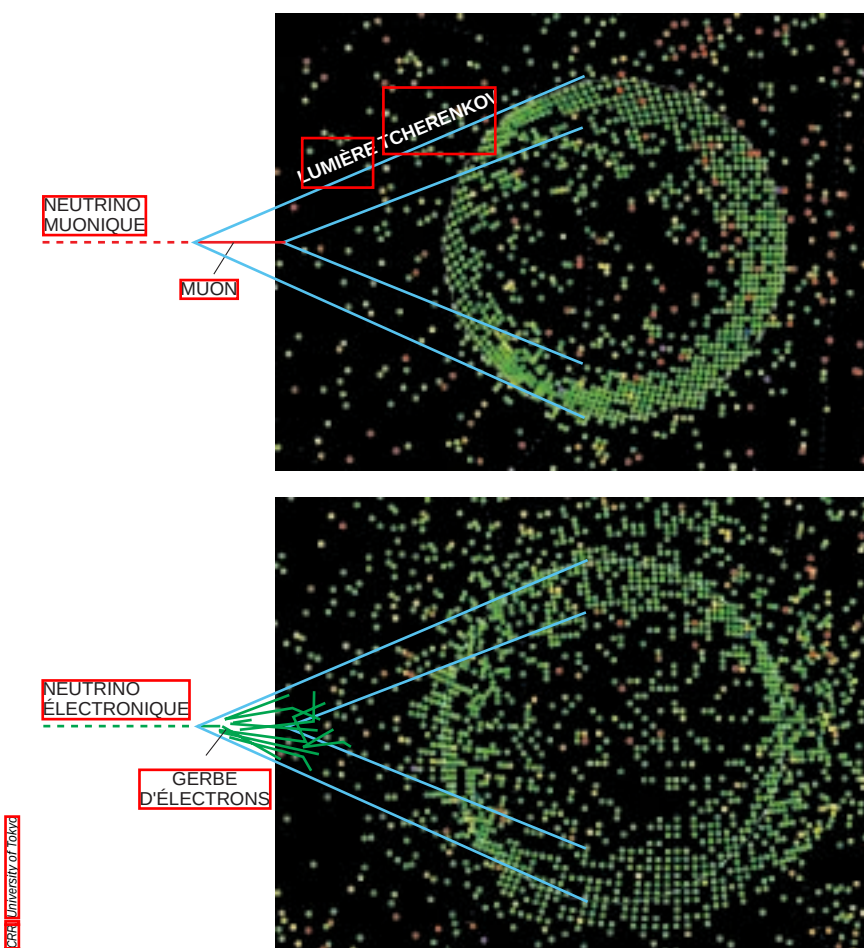
Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, qui correspondent à leurs trois partenaires chargés du Modèle standard : l'électron et ses cousins plus lourds, le muon et la particule tau. Un neutrino électronique interagissant avec un noyau atomique produit un électron ; dans les mêmes interactions, un neutrino muonique engendre un muon, et un neutrino tauique un tau. Depuis leur découverte, voici plus de 60 ans, ces particules semblaient dépourvues de masse. Toutefois, si elles changent de saveur au cours du temps, la théorie quantique

indique qu'elles possèdent très probablement une masse. Dans cette hypothèse, les neutrinos de l'Univers auraient, à eux tous, une masse supérieure à celle de toutes les étoiles de l'Univers.

La construction d'un piège géant

Souvent, la physique des particules progresse en construisant des machines de plus en plus grosses. Ce fut ici le cas : on a construit le détecteur *Super-Kamiokande* sur les mêmes plans que *Kamiokande*, mais en décuplant les dimensions (voir la figure 1) : un ensemble de photomultiplicateurs est pointé vers 50 000 tonnes d'eau, dont les protons peuvent se désintégrer ou être heurtés par des neutrinos. Dans chacun de ces cas, la réaction crée des particules qu'on détecte par un éclair bleuté de lumière Tcherenkov. Cette lumière doit son nom à Pavel Tcherenkov, qui a compris en 1934 qu'elle était l'analogue optique du bang supersonique. De même qu'un avion supersonique engendre une onde de choc sonore, une particule électriquement chargée (par exemple, un électron ou un muon) émet un rayonnement Tcherenkov lorsque sa vitesse est supérieure à celle de la lumière dans le milieu traversé. La théorie de la relativité n'est pas violée : la vitesse maximale c qu'elle impose à tout mouvement est celle de la vitesse de la lumière dans le vide. Or, dans l'eau, la vitesse de la lumière n'est égale qu'au trois-quarts de c ; des particules très énergétiques peuvent donc aller plus vite que la lumière. Dans un tel cas, un cône de lumière centré sur la trajectoire des particules est émis.

Dans le détecteur *Super-Kamiokande*, les particules chargées de l'énergie qui nous intéresse ne parcourent généralement que quelques mètres, et le cône Tcherenkov projette un anneau de lumière sur la paroi tapissée de photomultiplicateurs (voir la figure 2). La taille, la forme et l'intensité de cet anneau lumineux révèlent les propriétés de la particule chargée. Puis l'analyse de cette particule renseigne sur le type de neutrino qui l'a engendrée. Par exemple, on distingue les motifs Tcherenkov qui proviennent des électrons de ceux issus des muons : les électrons engendrent une gerbe de particules, dessinant un anneau flou, différent du cercle plus net engendré par les muons. L'analyse de cette



2. LORSQU'UN NEUTRINO DE HAUTE ÉNERGIE percute un noyau atomique et crée une particule chargée, celle-ci émet un cône de lumière Tcherenkov. Un neutrino muonique (en haut) crée un muon qui parcourt environ un mètre en projetant sur les détecteurs un anneau lumineux bien défini. Un électron créé par un neutrino électronique (en bas) engendre une petite gerbe d'électrons et de positons qui créent chacun leur propre cône de lumière Tcherenkov : l'anneau lumineux résultant est plus flou. Les points verts indiquent des éclairs détectés dans un même infime intervalle de temps.

lumière indique également l'énergie et la direction de l'électron ou du muon incident, qui sont relativement proches de celles du neutrino initial.

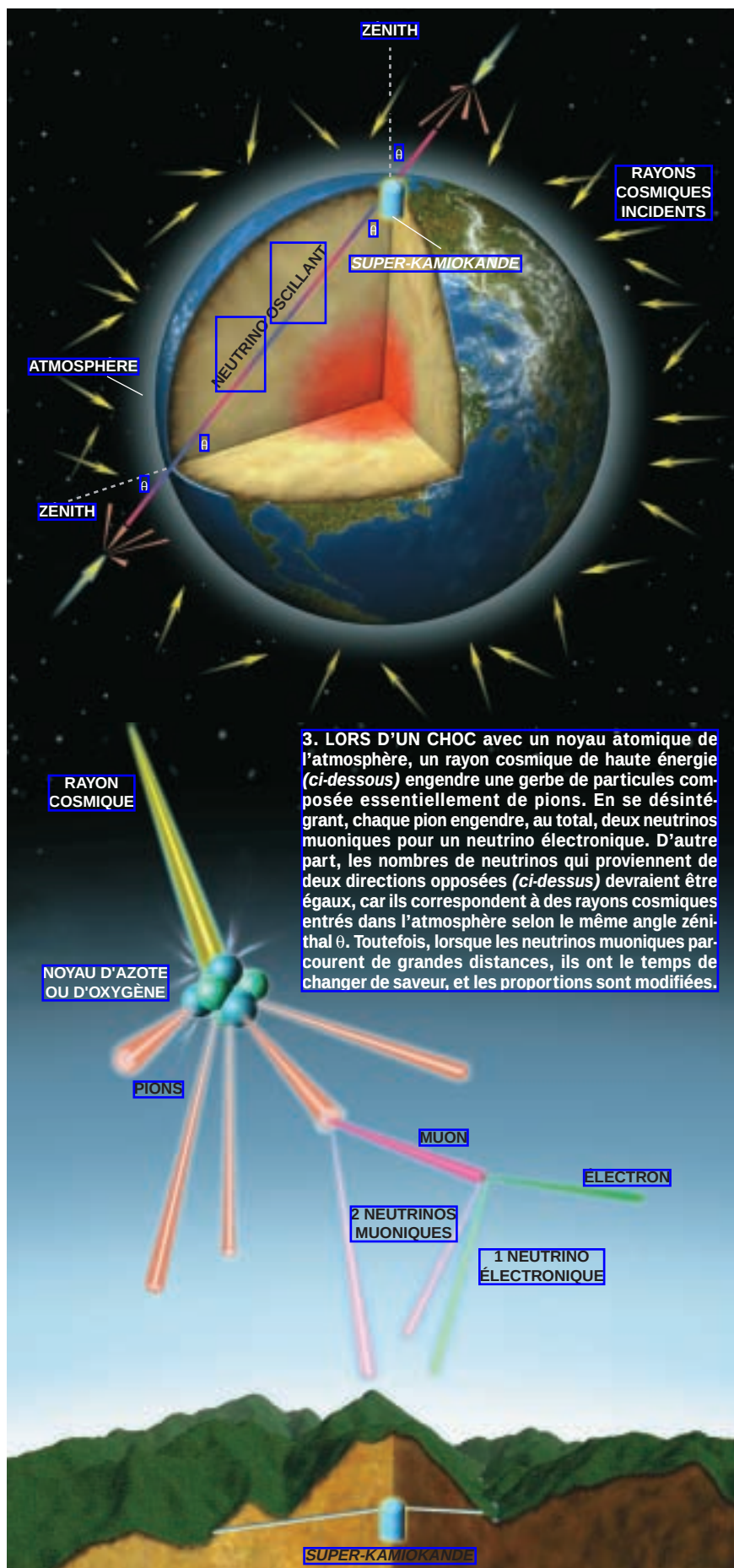
En revanche, l'expérience identifie moins facilement le troisième type de neutrino : le neutrino tauique. Un tel neutrino n'interagit avec un noyau et ne produit une particule tau que s'il a suffisamment d'énergie : le tau est environ 3 500 fois plus lourd qu'un électron (le muon, lui, est seulement 200 fois plus massif qu'un électron). Si les neutrinos produits dans l'atmosphère ont suffisamment d'énergie pour engendrer une particule de la masse du muon, seule une infime partie d'entre eux peut créer des tau. La plupart des neutrinos tauiques créés dans l'atmosphère traversent le détecteur *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Après avoir construit notre nouveau détecteur, nous avons compté combien nous voyions de chaque neutrino. Puis nous avons comparé ces nombres aux nombres attendus théoriquement.

L'expérience *Super-Kamiokande* surveille les neutrinos atmosphériques qui se forment dans la pluie de particules déclenchée lorsqu'un rayon cosmique heurte le sommet de notre atmosphère. Ces rayons cosmiques «primaires» sont essentiellement des protons et quelques noyaux plus lourds tels celui d'hélium ou celui de fer. Chaque collision engendre une cascade de particules secondaires, principalement des pions et des muons, qui se désintègrent presque immédiatement en émettant des neutrinos (voir la figure 3). Comme on sait à peu près combien de rayons cosmiques heurtent l'atmosphère chaque seconde et combien de pions et de muons apparaissent lors de chaque collision, on a estimé le nombre de neutrinos attendus.

Jouer avec les quotients

Comme cette estimation n'est qu'à 25 pour cent près, nous utilisons une astuce classique en science : nous utilisons plutôt le quotient de deux grandeurs, plus précisément connu que les deux grandeurs prises individuellement. Dans nos études, la réaction clé est la désintégration d'un pion en un muon et en un neutrino muonique, suivie de la désintégration du muon en un électron, en un neutrino électronique et en un autre neutrino muonique. Quel que soit le nombre de rayons cosmiques qui pénètrent dans





[AIP Emilio Segre Visual Archives](#)



1933

1956



1962

1969

Ainsi, si nous «regardons» le ciel dans une certaine direction par rapport à la verticale, puis dans la direction opposée, nous devrions «voir» arriver le même nombre de neutrinos de ces deux directions. Ces deux ensembles de neutrinos sont en effet créés par des rayons cosmiques heurtant l'atmosphère sous un même angle (*voir la figure 3*). En pratique, on sélectionne des neutrinos suffisamment énergiques (dont les rayons cosmiques parents n'ont donc pas été déviés par le champ magnétique terrestre), puis on divise le nombre de neutrinos ascendants par le nombre de neutrinos descendants. Si aucun neutrino n'a changé

Autres mystères, autres possibilités

Les physiciens disposent de divers indices sur les oscillations de neutrinos et ils ont encore plusieurs mystères à élucider. Durant plus de 30 ans, des expériences ont détecté quelques-uns des neutrinos électroniques engendrés lors des réactions de fusion nucléaire qui se déroulent à l'intérieur du Soleil. Ces expériences ont toujours recensé moins de neutrinos que ne le prévoyaient les meilleures théories (voir *Où sont les neutrinos solaires ?*, par John Bahcall, in *Pour la Science*, juillet 1990). L'expérience *Super-Kamiokande*, qui a également compté ces neutrinos solaires, n'en a trouvé que la moitié. Nous étudions actuellement ces données, en espérant y trouver une signature claire des oscillations de neutrinos. En mai 1998, l'Observatoire à neutrinos de Sudbury, dans l'Ontario, a décelé ses premiers neutrinos. Son détecteur renferme 1 000 tonnes d'eau lourde, ce qui renforce considérablement sa capacité à repérer les neutrinos solaires. D'autres détecteurs seront bientôt opérationnels.

Une expérience effectuée au Laboratoire américain de Los Alamos fournit d'autres indices en faveur de l'oscillation des neutrinos : elle détecte les neutrinos électroniques émis par une source censée produire uniquement des neutrinos muoniques. Le signal est difficile à extraire du bruit de fond. Le résultat, non encore confirmé de manière indépendante, est en cours de vérification par plusieurs expériences. Très récemment, l'expérience européenne KARMEN a infirmé ce résultat.

Si les oscillations entre les neutrinos muoniques et les neutrinos tauiques sem-

plent être l'explication la plus naturelle aux données recueillies par le détecteur *Super-Kamiokande*, d'autres interprétations sont possibles. Le scénario d'oscillation le plus général inclut un mélange des trois saveurs de neutrinos. Les données du détecteur *Super-Kamiokande* sont compatibles avec quelques oscillations entre les neutrinos électroniques et muoniques aux énergies couvertes par ce détecteur. Toutefois, les résultats d'une expérience réalisée à la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, limitent grandement le nombre d'oscillations des neutrinos électroniques pouvant survenir dans le détecteur *Super-Kamiokande*.

On peut également imaginer que les oscillations des neutrinos muoniques incluent une saveur de neutrino encore non découverte. Toutefois, les études réalisées au CERN sur le boson Z montrent clairement qu'il n'existe que trois saveurs de neutrinos «actives» (par actives, on entend des saveurs qui participent à l'interaction nucléaire faible). Si elle existait, la quatrième saveur devrait donc être «stérile» et constituer un type de neutrinos ne participant qu'aux interactions gravitationnelles. Certains physiciens apprécient cette idée, car trois faits distincts (les neutrinos solaires, les neutrinos atmosphériques et les données de Los Alamos) n'admettent aucune explication convaincante si l'on se cantonne à attribuer des masses aux seuls neutrinos électroniques, muoniques et tauiques.

D'autres mécanismes d'oscillation, reposant sur des effets plus ésotériques que la masse des neutrinos, ont également été proposés.

1975-1977

Découverte du quark "bas" et du lepton tau, révélant une troisième génération de quarks et de leptons.

1983

Découverte, au CERN, des bosons W et Z : ce sont les vecteurs de l'interaction faible, responsable des réactions entre neutrinos.

1987

L'astronomie des neutrinos : les expériences IMB et Kamiokande, qui exploraient la désintégration du proton, détectent 19 neutrinos émis il y a 150 000 ans par la supernova 1987A du Grand Nuage de Magellan

David M. N. 400 PAGES (à l'observation)

1989

La détermination précise, au CERN et au SLAC (Californie), du taux de désintégration du boson Z^0 montre qu'il n'existe que trois familles de neutrinos.

1998

Grâce à l'analyse des neutrinos atmosphériques, le détecteur *Super-Kamiokande* recueille des données qui indiquent l'oscillation des neutrinos.



de saveur en cours de route, ce rapport doit être exactement égal à un.

Comme prévu, nous avons mesuré des nombres presque égaux de neutrinos électroniques descendants et ascendants. En revanche, le nombre de neutrinos muoniques ascendants était deux fois inférieur au nombre de neutrinos muoniques descendants. Ce second argument en faveur d'un changement d'identité des neutrinos fournit un indice sur la nature de cette métamorphose. Les neutrinos muoniques ascendants ne peuvent se transformer en neutrinos électroniques, car on ne constate aucun excès de neutri-

nos électroniques ascendants. Reste le neutrino tauique. Une partie des neutrinos muoniques se seraient donc transformés en neutrinos tauiques qui ont traversé *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Une saveur volage

Pourquoi les neutrinos changeraient-ils de saveur? Selon la théorie quantique, une particule se déplaçant dans l'espace se comporte à la fois comme une particule et comme une onde : outre ses propriétés, telles que la masse et la charge, elle possède une longueur

d'onde, peut être diffractée, etc. De surcroît, elle peut être la superposition de deux ondes.

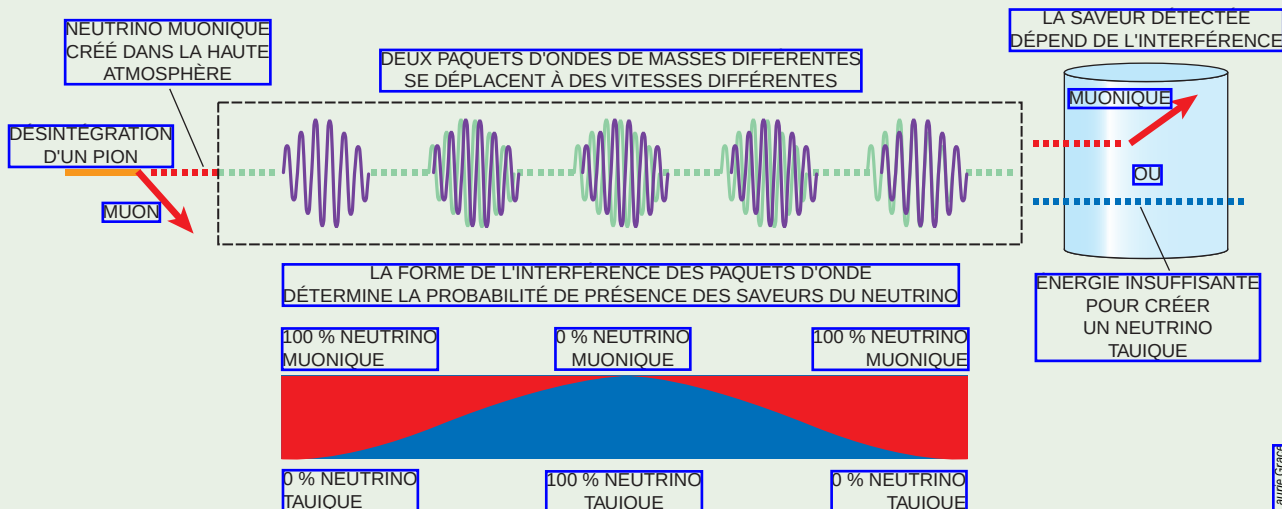
Supposons que ces deux ondes correspondent à des masses légèrement différentes. À mesure qu'elles se propagent, l'onde «plus légère» distace l'onde «plus massive», de sorte que toutes deux interfèrent avec un motif qui varie le long de la trajectoire (voir l'encadré ci-dessous). Cette interférence a un analogue musical : les battements sonores que l'on entend lorsque l'on joue deux notes presque identiques.

En musique, cet effet se perçoit à une oscillation du volume sonore ; en

Le mécanisme d'oscillation des neutrinos

orsqu'un pion se désintègre, il engendre toujours un neutrino. Comme toute particule quantique, un neutrino est décrit par une onde. Cette onde est une superposition de paquets d'ondes de différentes masses (*en violet et en vert, au centre*), qui se propagent à des vitesses différentes : le moins massif est plus rapide que le plus massif. Au cours de cette propagation, les ondes interfèrent : ces interférences expliquent que l'on observe un neutrino muonique (*en rouge*) ou un neutrino tauique (*en bleu*), selon les points de la trajectoire (*en bas*). Comme tout effet quantique, le phénomène est aléatoire, avec une probabilité supérieure de détection

d'un neutrino muonique près de son point de production. Les probabilités oscillent : elles sont en faveur de la détection d'un neutrino tauique à une certaine distance de la source, puis en faveur de la détection d'un neutrino muonique un peu plus loin. Finalement, lorsque le neutrino interagit dans le détecteur (*à droite*), les dés quantiques sont lancés. Si c'est un neutrino muonique qui interagit avec l'eau, un muon est produit. Si les probabilités sont en faveur du neutrino tauique, qui n'a pas suffisamment d'énergie pour créer une particule tau, 12 fois plus massive que le muon, le détecteur *Super-Kamiokande* ne détecte rien.



physique quantique, c'est la probabilité de détecter l'un ou l'autre des types de neutrino qui oscille. Au début, la probabilité que le neutrino soit muonique est égale à 100 pour cent. Après une certaine distance, la probabilité que le neutrino soit tauique est égale à 100 pour cent. Entre les deux positions, quand les probabilités sont inférieures, on verra, au hasard, un neutrino tauique ou un neutrino muonique.

Cette oscillation ne doit pas surprendre : les photons, ou grains de lumière, ont le même comportement. La lumière peut avoir divers états de polarisation, par exemple verticale, horizontale, circulaire droite ou circulaire gauche. Ces états ne correspondent pas à des masses différentes (tous les photons ont une masse nulle), mais, dans certains matériaux « optiquement actifs », la lumière de polarisation circulaire gauche se déplace plus vite que la lumière de polarisation circulaire droite. Or, un photon de polarisation verticale est une superposition de ces deux polarisations circulaires. Lorsqu'il traverse un matériau optiquement actif, sa polarisation tourne (autrement dit, oscille) de la verticale à l'horizontale à mesure que les phases de ses deux composantes circulaires alternent.

Dans *Super-Kamiokande*, l'observation des oscillations de neutrinos ne nécessite aucun matériau spécifique : si les deux composantes du neutrino ont des masses suffisamment différentes, elles engendrent des oscillations de saveur, que le neutrino se déplace dans l'air, dans une roche ou dans le vide. Lorsqu'un neutrino descend dans la cuve de l'expérience, le nombre d'oscillations qu'il a effectuées dépend de son énergie et de la distance qu'il a parcourue depuis sa création. Comme les neutrinos muoniques descendants ont parcouru quelques dizaines de kilomètres au plus, seule une fraction de

cycle s'est déroulée : on détecte presque toujours la saveur muonique originelle (voir la figure 3). En revanche, les neutrinos muoniques ascendants, créés à des milliers de kilomètres du détecteur, ont oscillé tant de fois qu'en moyenne seule la moitié d'entre eux est détectée sous la forme de neutrinos muoniques. L'autre moitié traverse le détecteur sous la forme de neutrinos tauiques, indétectables.

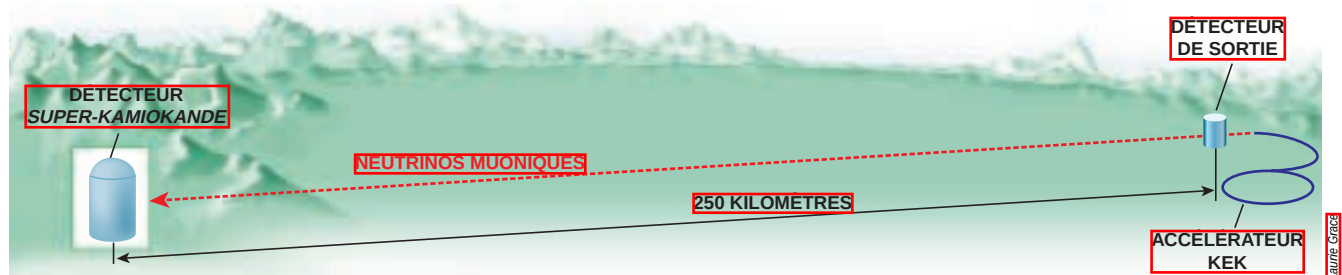
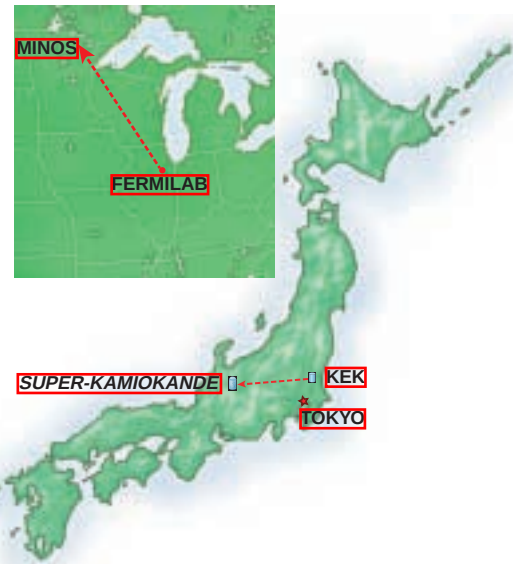
Un témoignage convaincant

Ces arguments sur le quotient des saveurs et les quantités d'événements ascendants par rapport aux événements descendants sont si convaincants que la majorité des physiciens ont admis cette oscillation des neutrinos. Pour compléter notre étude, nous avons précisé la dépendance du nombre de neutrinos muoniques en fonction de leur énergie et de leur angle d'incidence, puis nous avons comparé les nombres mesurés avec les prévisions obtenues à partir de plusieurs scénarios d'oscillations (y compris aucune oscillation). Les données décrivent très bien des oscillations pour certaines valeurs des différences de masses et pour certains autres paramètres physiques (voir la figure 5).

Ayant observé quelque 5 000 événements durant les deux premières années de notre expérience, nous savons que les anomalies observées ne s'expliquent pas par des fluctuations statistiques. Cependant, nous voulons maintenant confirmer notre découverte en observant l'oscillation des neutrinos muoniques à l'aide d'autres techniques ou dans le cadre d'autres expériences. Plusieurs détecteurs, au Minnesota et en Italie, ont déjà fourni une telle confirmation, mais avec trop peu d'événements pour donner une statistique satisfaisante.

Les oscillations de neutrinos ont été corroborées par des études d'un autre type d'interactions des neutrinos atmosphériques : leurs collisions avec les noyaux atomiques de la roche qui entoure notre détecteur. Lorsqu'ils interagissent dans la montagne, les neutrinos électroniques créent des électrons et des gerbes de particules, mais celles-ci sont absorbées dans la roche et n'atteignent jamais la grotte où est installé le détecteur. En revanche, les neutrinos muoniques de grande énergie créent des muons énergiques, qui peuvent traverser plusieurs centaines de mètres de roche et pénétrer dans la cuve du détecteur. Les muons captés proviennent alors des neutrinos ascendants, car les muons descendants sont masqués par le bruit de fond des muons engendrés par les rayons cosmiques qui pénètrent dans le mont Ikenoyama par en haut.

Les muons ascendants que nous parvenons à compter arrivent selon des directions comprises entre la verticale et presque l'horizontale. Ces directions correspondent à des distances de propagation des neutrinos



4. LE JAPON, LES ÉTATS-UNIS ET L'EUROPE projettent des expériences où des faisceaux de neutrinos émis par des accélérateurs seront détectés après avoir parcouru plusieurs centaines de kilo-

mètres. Ces expériences devraient confirmer l'existence de l'oscillation des neutrinos. Elles permettront la mesure précise des constantes naturelles qui la gouvernent.

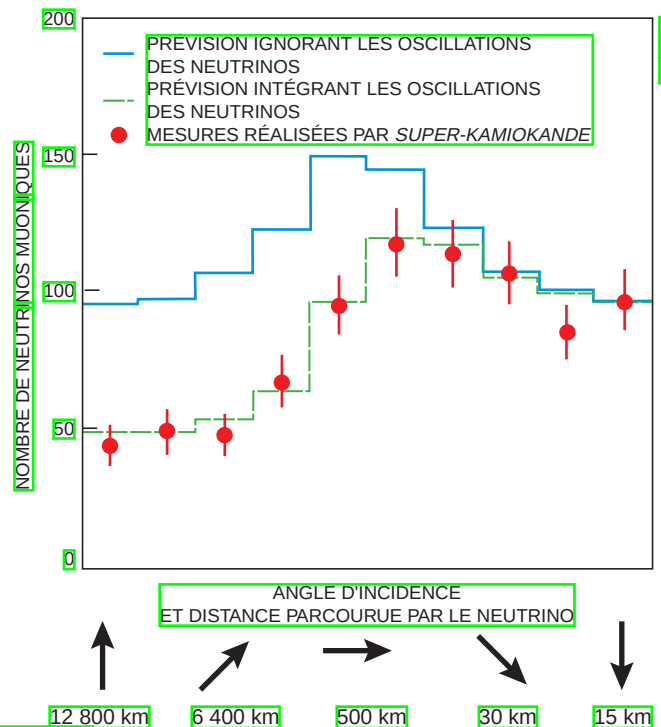
(de leur production dans l'atmosphère à la création d'un muon près du détecteur) comprises entre 500 kilomètres (distance de la limite atmosphérique lorsqu'on regarde selon la verticale, vers le bas) et 13 000 kilomètres (le diamètre de la Terre, lorsqu'on regarde directement l'opposé du zénith). Nous trouvons alors que les neutrinos muoniques de faible énergie qui parcourent une grande distance sont plus rares que les neutrinos de haute énergie qui parcourent une faible distance. Ce comportement, conforme à la théorie des oscillations, est caractérisé par des paramètres voisins de ceux qui avaient été déduits de notre première étude.

Si les seuls neutrinos possibles sont les trois actuellement connus, les données que nous avons recueillies montrent que les neutrinos muoniques se transforment en neutrinos tauoniques. Selon la théorie quantique, les oscillations sont dues à la masse des neutrinos (l'encadré de la page 66 indique d'autres possibilités).

Malheureusement, la théorie quantique limite également nos expériences : elle permet uniquement de mesurer les différences entre les carrés des masses des deux saveurs de neutrinos, car cette différence détermine la longueur d'onde des oscillations. Les données recueillies par notre expérience situent cette différence des carrés des masses entre 0,001 et 0,01 électronvolt au carré. À l'examen des masses des particules connues, on pense qu'un des deux neutrinos est bien plus léger que l'autre, ce qui situerait la masse du neutrino lourd entre 0,03 électronvolt et 0,1 électronvolt (à titre de comparaison, la masse de l'électron est égale à 511 000 électronvolts).

Quelles conséquences peut-on maintenant tirer de ce résultat ?

Premièrement, l'existence de neutrinos massifs n'infirme pas le Modèle standard de la physique des particules. Toutefois, on doit alors introduire dans le Modèle des paramètres « de mélange » qui compliquent les interactions. Un mélange similaire existe aussi entre les différents types de quarks, mais nos données indiquent



5. LES NOMBRES DE NEUTRINOS MUONIQUES DE HAUTE ÉNERGIE qui arrivent sur le détecteur *Super-Kamiokande* selon diverses trajectoires concordent avec les théories qui envisagent des oscillations des neutrinos (en vert), et sont en désaccord avec les théories qui les ignorent (en bleu). Les neutrinos ascendants (partie gauche du graphique) ont parcouru une distance suffisante pour que la moitié d'entre eux aient changé de saveur et échappé ainsi à la détection.

que les neutrinos ont besoin de beaucoup plus de mélange.

Deuxièmement, une masse de 0,05 électronvolt resterait bien inférieure à celle des autres particules de matière. Cela explique que l'on ait longtemps pensé que les neutrinos avaient une masse nulle. Cette observation intéresse beaucoup les théoriciens qui cherchent une théorie unifiée afin de décrire toutes les forces, sauf la gravitation, par un même formalisme. Ils utilisent souvent une procédure mathématique nommée *basculé*, qui attribue naturellement à un neutrino une masse petite, mais non nulle.

Les cosmologistes sont également intéressés parce qu'ils doivent désormais tenir compte de la masse des neutrinos dans le décompte de la masse de l'Univers. Depuis des années, les astrophysiciens cherchent à connaître cette masse. Ils ont d'abord recensé la masse présente dans la matière lumineuse – par exemple, dans les étoiles et les galaxies – et dans la matière ordinaire – par exemple, dans les naines brunes ou dans les gaz diffus. Puis ils ont également estimé cette masse de manière indirecte, à partir du mouvement orbital des galaxies et de la vitesse d'expansion de l'Univers. Or, le recen-

sément direct donne un résultat 20 fois inférieur au décompte indirect : l'Univers est plus massif qu'il ne le paraît. Bien que la masse des neutrinos soit très faible, l'ensemble des neutrinos créés lors du Big Bang, et omniprésents dans l'espace, aurait une masse presque égale à la masse totale des étoiles.

Enfin, nos données sont importantes en physique des particules. Des physiciens ont décidé d'étudier les oscillations des neutrinos en utilisant des neutrinos émis par l'accélérateur du *Fermilab*, situé dans la banlieue de Chicago plutôt que les neutrinos incontrôlables de l'atmosphère ; la détection sera assurée par un appareil en construction dans une mine, à Soudan (Minnesota).

Comme un bon détecteur de neutrinos atmosphériques est également un bon détecteur de neutrinos émis par un accélérateur, nous allons utiliser notre

détecteur *Super-Kamiokande* pour étudier un faisceau de neutrinos émis par l'accélérateur du KEK, situé à 250 kilomètres, près de Tokyo. On règle ce faisceau à volonté (direction, énergie, intensité). Un détecteur semblable à *Super-Kamiokande*, placé près de l'origine du faisceau, caractérisera les neutrinos muoniques avant qu'ils n'oscillent. Pour éliminer toute incertitude, nous utilisons (une nouvelle fois) le rapport des comptages à la source par des comptages loin de la source. En ce moment même, les neutrinos du premier faisceau de neutrinos artificiel passent sous les montages du Japon. Les 50 000 tonnes d'eau ultrapure de *Super-Kamiokande* devraient en détecter quelques-uns, mais combien exactement ?

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoji TOTSUKA sont membres de la collaboration *Super-Kamiokande*.

J.M. LOSECCO, Frederick REINES et Daniel SINCLAIR, *Les protons sont-ils stables ?*, in *Pour la Science*, août 1985. Nickolas SOLOMEY, *The Elusive Neutrino : A Subatomic Detective Story*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

Nouvelles visions des quasi-cristaux

CHRISTOPH POPPE

La structure des quasi-cristaux est réalisable avec une infinité de motifs «supérieurs» soumis à certaines règles de superposition. Le choix du motif réaliste prend en compte la nature chimique des constituants du quasi-cristal.

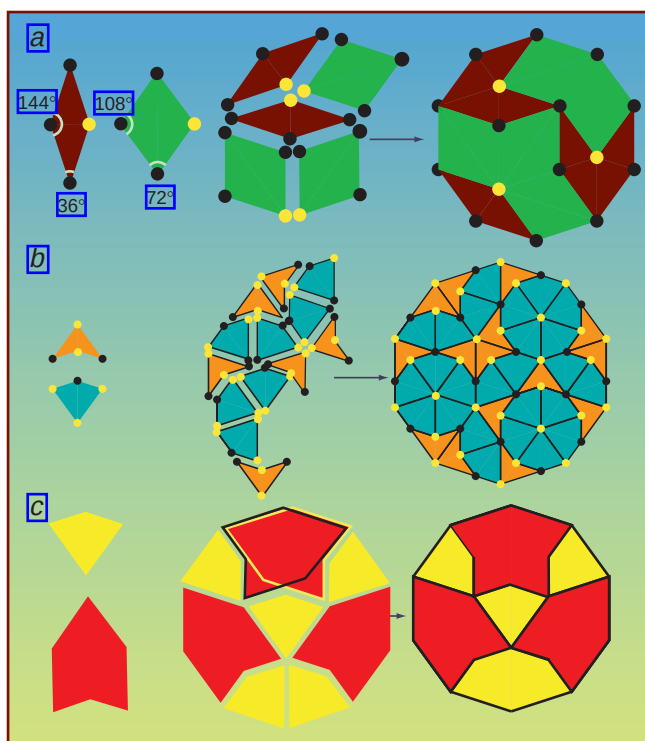
*C'est de la folie, mais il y a une méthode.
Hamlet, acte 2, scène 2.*

Les physiciens découvrent un phénomène et, comme par magie, les mathématiciens ont une théorie toute prête qui permet de l'analyser. Le miracle est d'autant plus remarquable qu'il est fréquent, comme si les mathématiciens avaient une sorte de prescience de ce que peut être la nature. Ainsi la géométrie des tenseurs était déjà là toute prête quand Einstein en eut besoin pour la relativité générale,

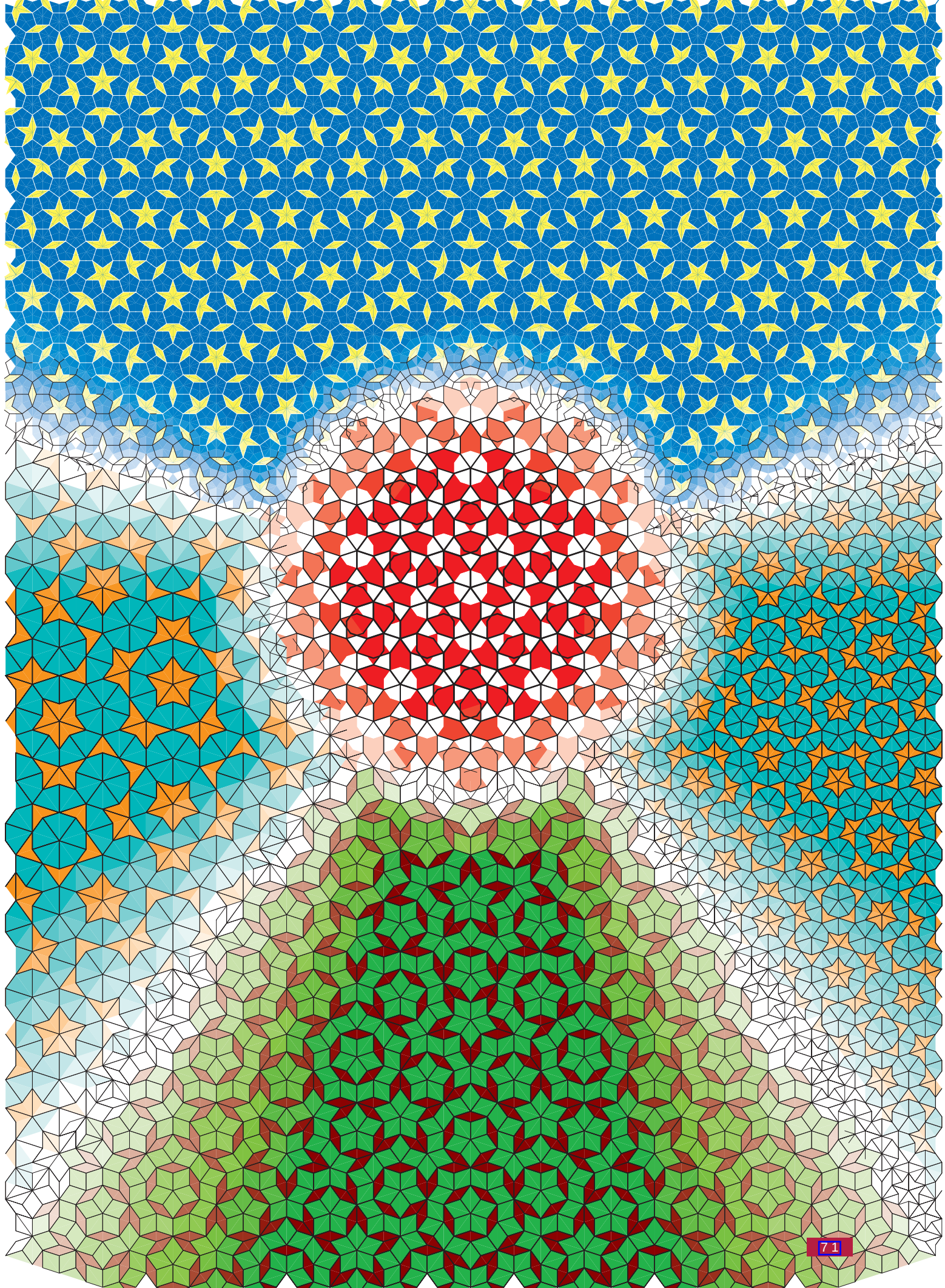
et un autre exemple tout aussi spectaculaire concerne la découverte des quasi-cristaux en 1984.

Dans un cristal ordinaire, les atomes s'assemblent selon une structure, la maille élémentaire, qui se répète périodiquement dans les trois directions de l'espace. Cette maille pave l'espace comme les éléments de carrelage pavent le plan ; on peut paver le plan avec des triangles, des carrés et des hexagones (symétrie d'ordre 3, 4 et 6), mais pas avec des pentagones réguliers (symétrie d'ordre 5). Cette symétrie semblait

interdite par les lois de la minéralogie : les deux impératifs, périodicité et symétrie d'ordre 5, s'excluaient mutuellement. À la surprise générale on a découvert, en 1984, des quasi-cristaux, formés d'atomes d'aluminium et de manganèse par exemple, qui ont une symétrie d'ordre 5. Nul ne croyait alors que les atomes d'un solide pouvaient remplir un volume selon un agencement déterminé par une loi, sans que cet agencement soit périodique. Pourtant l'évidence était là. Depuis, on tente d'élucider la structure de ces cristaux.



1. LES MOTIFS «SUPERIEURS» du pavage de Penrose, ici des décagones (roues de charrette), sont construits avec différents motifs de base. Le physicien pourra choisir, parmi ces motifs, ceux qui correspondent aux arrangements atomiques mesurés. Pour assembler ces motifs, on marque, par exemple, les sommets des losanges par des points, et la règle d'assemblage impose que les points de même couleur se superposent (a). La même règle s'applique aux cerfs-volants et aux flèches (b). Dans la décoration élaborée par Petra Gummelt, la symétrie de rotation d'ordre 10 du décagone est brisée par la coloration de deux «fusées» et leur chevauchement (c). Sur la figure de la page de droite, on a pavé le plan en superposant ces motifs supérieurs : on a ainsi pavé le plan avec des décagones c de Gummelt (au centre), avec des structures a (en bas), avec des structures b (à gauche et à droite). Examinons les passages d'une structure à l'autre. Les cerfs-volants et les flèches du motif de Penrose (à gauche) sont coupés selon leur axe de symétrie en deux triangles isocèles : les flèches sont divisées en triangles larges et les cerfs-volants en triangles étroits (illustré dans l'espace entre le motif de gauche et celui du bas). Si l'on découpe chaque triangle étroit en deux triangles plus petits, un large et un étroit, deux triangles larges contigus forment un losange large et deux triangles étroits forment un losange étroit. On obtient alors le motif de Penrose en losanges (en bas). En divisant chaque triangle large en un triangle étroit et un triangle large plus petit, on obtient les éléments du motif miniaturisé en cerfs-volants et flèches (à droite). On peut réitérer à volonté ce «processus de déflation» et produire des motifs avec des éléments toujours plus petits. Les petits triangles forment des «roues de charrette» décagonales (au milieu) ; chaque roue de charrette correspond à une flèche du motif du niveau de déflation juste supérieur (représenté à gauche). La voûte étoilée (en haut) est une décoration du motif en losanges.



Le problème est compliqué par le fait que, si l'on connaît tous les pavages périodiques du plan, on ne connaît pas bien, il s'en faut de beaucoup, les structures périodiques qui pavent l'espace.

Le physicien Peter Kramer, de l'Université de Tübingen, a découvert un remplissage non périodique de l'espace avec des rhomboèdres, des cubes déformés par cisaillement dans les trois directions spatiales (les faces sont des losanges). Ce remplissage présente une symétrie d'ordre 5 (plus précisément, une symétrie icosaédrique).

Néanmoins, comme il est plus facile de visualiser, et donc de comprendre, deux dimensions que trois, la plupart des activités de recherche sur les pavages possédant une symétrie d'ordre cinq ont porté sur des structures à deux dimensions, et non pas à trois, avec des losanges, et non des rhomboèdres.

Les résultats les plus connus de ces activités sont les pavages du mathématicien Roger Penrose, pavages qui comportent deux motifs élémentaires en forme de losanges l'un large, l'autre étroit. Lorsqu'on juxtapose les losanges d'une seule espèce, on obtient un motif

périodique ; quand on combine les deux formes selon des règles précises (voir la figure 1), on obtient des pavages non périodiques.

Les pavages de Penrose peuvent être réalisés avec différentes formes. Il existe ainsi des pavages équivalents réalisés avec deux sortes de triangles, avec des pentagones, des étoiles à cinq branches, des losanges étroits ou des «bateaux», ou encore avec les célèbres «cerfs-volants» et «flèches».

Et la chimie dans tout cela ?

Les physico-chimistes ont cherché la structure de leurs quasi-cristaux auprès des mathématiciens, et un choix possible consistait à assimiler les formes de base à des atomes de natures différentes. Ainsi l'une des formes aurait été un atome d'aluminium, l'autre un atome de manganèse et les règles d'assemblage auraient exprimé les forces qui s'exercent entre les atomes ; l'endroit où une règle d'assemblage interdit la pose d'un pavé symbolisant le manganèse correspond dans le quasi-cristal réel à un site énergétiquement défavorable à la mise en place d'un tel atome.

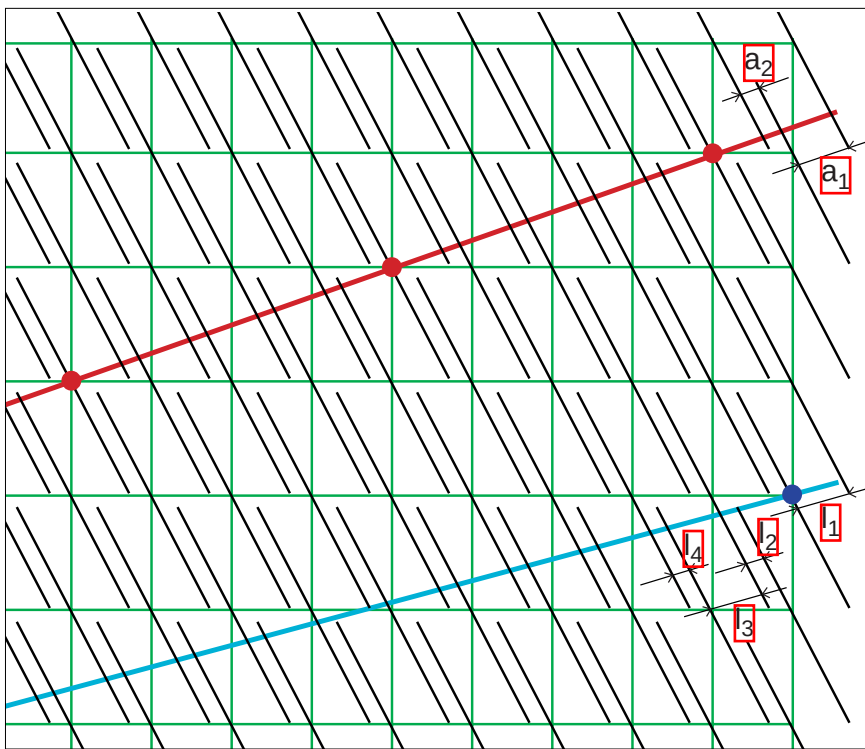
Hélas pour le réalisme, les atomes ne sont pas des losanges ou des rhomboèdres, et une forme de Penrose correspondrait plutôt à un agrégat de plusieurs atomes. Il faudrait «décorer» avec des atomes un losange (à deux dimensions) ou un rhomboèdre (à trois dimensions) de façon que le résultat global soit en concordance avec le spectre de rayons X ou avec les autres résultats de mesures. On a déjà obtenu quelques modestes résultats avec cette méthode. Toutefois, il est difficile d'imaginer pourquoi les atomes adopteraient un tel agencement en cellules rhomboédriques plutôt qu'un autre.

Le succès d'une décoration repose aussi sur la réponse qu'elle apporte à une question : comment un quasi-cristal se forme-t-il ? Si l'on essaie de construire un pavage de Penrose par ajouts successifs d'éléments en respectant les règles d'assemblage, on aboutit généralement à une impasse : en certains endroits, on ne peut plus rien ajouter du tout. Les règles d'assemblage ne sont pas suffisantes, même lorsqu'on les renforce en prescrivant comment il faut disposer les losanges autour d'un sommet (c'est ce que l'on dénomme les configurations *Vertex*).

Même si ces règles étaient suffisamment précises, il faudrait qu'un quasi-cristal croisse exactement de cette façon : sur un germe cristallin, les atomes s'ajoutent les uns après les autres, guidés par les forces qui déterminent leur position momentanée dans un voisinage changeant. Lorsque ces informations locales ne fournissent plus les indications suffisamment précises, les atomes ne trouvent pas leur place, et le quasi-cristal ne dépasse pas la taille d'un nanomètre.

Les mathématiciens sont plus chanceux : il construisent des pavages sans défaut et aussi grands qu'ils le souhaitent en considérant que le quasi-cristal est la projection d'un cristal périodique d'une dimension supérieure (voir la figure 2).

Ainsi le pavage d'une surface par les motifs de Penrose est interprété comme la projection à trois dimensions d'un motif périodique très simple en cinq dimensions. Il est non périodique uniquement parce que le réseau en cinq dimensions est projeté sous un angle oblique (irrationnel). Cette simplicité de construction à partir d'un espace de dimensions cinq fait qu'il existe un grand nombre d'empilements non périodiques.



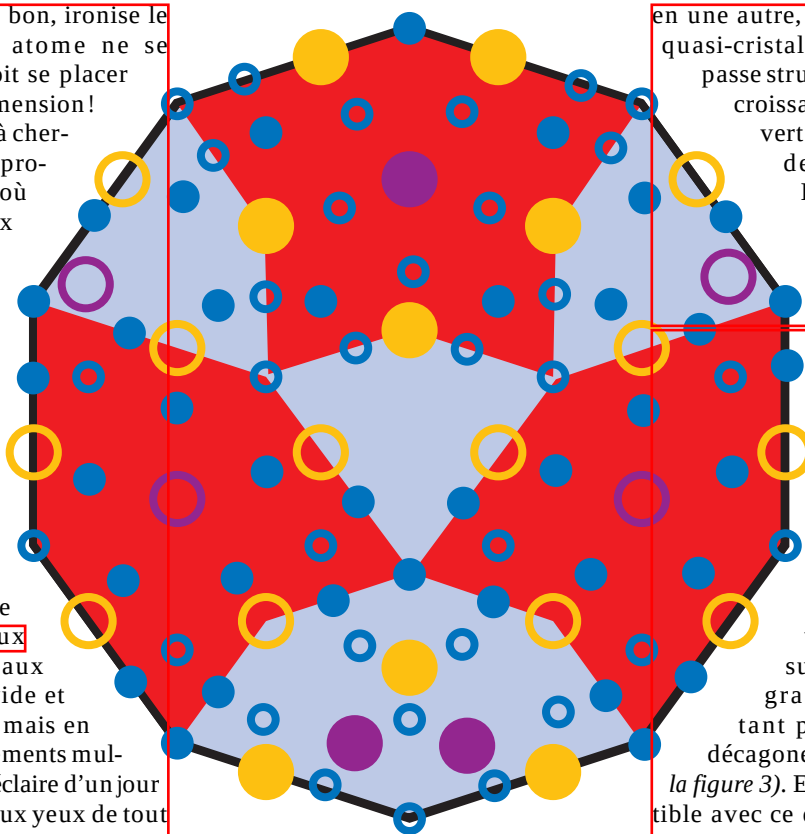
2. LA PROJECTION D'UN ESPACE PÉRIODIQUE à deux dimensions donne un espace périodique à une dimension si la droite (en rouge) représentant l'espace à une dimension a une pente rationnelle (elle passe par une infinité de nœuds du réseau) et un espace quasipériodique si la droite (en bleu) a une pente irrationnelle, c'est-à-dire ne passe que par un nœud du réseau. Sur le réseau à deux dimensions (en vert), on a des structures figurées par des segments inclinés dont les intersections avec les droites donnent les positions des atomes dans l'espace à une dimension. Similairement les structures quasipériodiques à trois dimensions sont les projections des structures périodiques à cinq dimensions, difficilement représentables.

Tout cela est bel et bon, ironise le physicien, mais un atome ne se demande pas où il doit se placer dans la cinquième dimension ! Il faut donc continuer à chercher des solutions au problème dans le monde où vivent les atomes, à deux ou à trois dimensions.

Petra Gummelt, de l'Université de Greifswald, a réussi une telle entreprise (*Geometriae Dedicata*, vol. 62, pp. 1-17, 1996, et *Aperiodische Überdeckungen mit einem Clustertyp*, Shaker, Aix-La-Chapelle, 1999). Elle a généralisé la construction en ne se limitant pas aux pavages, c'est-à-dire aux recouvrements sans vide et sans chevauchement, mais en autorisant des recouvrements multiples. Cette possibilité éclaire d'un jour nouveau ce qui saute aux yeux de tout observateur des pavages de Penrose : le motif comporte de nombreux décagones réguliers. Penrose les a dénommés *cart-wheels* (roues de charrette) : leur fréquence est si élevée que chaque point de la surface est couvert par au moins une telle roue décagonale.

La théorie du pavage de Penrose fournit encore plus d'informations : deux de ces décagones ne peuvent, quand ils se chevauchent, le faire que d'une manière très particulière. Ces règles peuvent être illustrées de façon convaincante : on colorie certaines parties des décagones en rouge et l'on fixe la règle d'assemblage suivante : les décagones doivent se chevaucher en faisant correspondre les couleurs (rouge sur rouge et blanc sur blanc), et toutes les surfaces rouges doivent être recouvertes au moins deux fois (voir la figure 1).

Le résultat de Petra Gummelt rapproche les physico-chimistes de leur but, qui est d'expliquer comment se forme un quasi-cristal. D'abord, il n'existe plus qu'un seul type d'élément de pavage, dont on coud divers exemplaires comme dans un patchwork. Cette hypothèse est plus plausible que celle selon laquelle les mêmes atomes devraient être prêts à prendre



3. LA « DÉCORATION » DE PAUL STEINHARDT des décagones de Gummelt. Les grands cercles représentent des atomes de nickel (en violet), de cobalt (en jaune), et les petits cercles des atomes d'aluminium (en bleu). En recouvrant la surface de décagones en respectant les règles de superposition, on obtient une couche de l'hypothétique quasi-cristal. Sur une couche, les atomes sont disposés sur les cercles pleins, sur la couche suivante sur les cercles vides, et ainsi de couche en couche.

deux formes différentes et ce en proportion à peu près égales : généralement, un agencement donné est énergétiquement plus favorable et se produit avec une fréquence beaucoup plus élevée que d'autres. Il est donc raisonnable de penser qu'il n'y a qu'un seul type de motif.

D'autre part, la forme du décagone est déjà relativement arrondie. Que des atomes s'assemblent en une telle cellule, ou en ce qui lui correspond en trois dimensions, paraît moins saugrenu que la forme très pointue du losange.

La croissance difficile

Enfin, quand la croissance d'un quasi-cristal, qui se fait par additions successives d'éléments conformément aux règles de chevauchement des décagones, aboutit à une impasse, le grand nombre des configurations possibles fait que les éléments se replacent en une position permettant la poursuite du processus. Certaines pièces de la construction déjà en place pourraient passer d'une configuration autorisée

en une autre, également possible. Le quasi-cristal sortirait ainsi de l'impasse structurelle, poursuivant sa croissance sur le chemin de la vertu, guidé par la recherche de l'énergie minimale. L'organisation idéale est celle qui présente la plus forte densité maximale réalisable en décagones.

Paul Steinhardt, un physicien de l'Université de Princeton, a développé cette idée. Il a trouvé une décoration du décagone par les atomes, qui non seulement respecte les règles de chevauchement, mais qui de surcroît, rapportée à une grande surface, est d'autant plus favorable que les décagones sont plus denses (voir la figure 3). En outre, elle est compatible avec ce que l'on sait des forces

entre les atomes. Seul inconvénient : en général les quasi-cristaux existant réellement ne se présentent pas de petites différences d'énergie entre les divers états. Les quasi-cristaux sont souvent obtenus par refroidissement rapide, et leur état peut être fortement hors d'équilibre.

Jusqu'ici, toutes ces considérations sont faites en deux dimensions, ce qui ne gêne pas leur vérification, car il existe effectivement des quasi-cristaux constitués de telles surfaces empilées périodiquement : ils sont quasi périodiques en deux dimensions et périodiques dans la troisième dimension.

L'objectif à long terme est d'appliquer à l'espace les techniques développées avec succès par Petra Gummelt dans le plan. Des travaux que Peter Kramer a publiés sur l'Internet <http://xxx.lanl.gov/abs/math-ph/9904001> pourraient y contribuer : il propose une structure dans un espace abstrait de dimension élevée, dont les décagones sont les projections à deux dimensions.

Christoph POPPE est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.

La guerre biologique contre les cultures

PAUL ROGERS • SIMON WHITBY • MALCOLM DANDO

Les armées et les terroristes disposent d'une arme redoutable : les micro-organismes qui dévastent les cultures vivrières.

Le 25 novembre 1969, le président américain Richard Nixon annonce que les États-Unis renoncent aux techniques de guerre biologique. Le gouvernement américain explique l'abandon de ces armes par leur intérêt militaire limité.

Toutefois, en 1989, Matthew Meselson, biologiste moléculaire à l'Université Harvard et spécialiste d'armement biologique, donne d'autres explications au Sénat américain : les armes biologiques sont une menace aussi importante que les armes nucléaires ; leur mise au point et leur production sont plus simples et moins chères que les armes nucléaires ; enfin, le programme américain d'armement biologique offensif peut être facilement copié. Aussi, ce programme serait une menace pour la sécurité des États-Unis.

Les Romains ont été les premiers à utiliser des armes biologiques : ils empoisonnaient les réserves d'eau des ennemis en y jetant des cadavres d'animaux. Depuis, les armes biologiques évoquent souvent des épidémies mortelles, tels le charbon ou la peste, déclenchées à des fins militaires ou terroristes. Pourtant, les armes biologiques qui détruisent les cultures plutôt que les populations ont également une importante capacité destructrice.

Au début des années 1960, à l'Institut de recherche sur la protection des végétaux de Pretoria, J.E. Van Der Plank observe que l'expression «épidémie explosive» prend tout son sens en temps de guerre : peu d'explosifs sont aussi destructeurs qu'un agent pathogène qui s'accroît au rythme de 40 pour cent par jour pendant plusieurs mois. De nombreux types de spores (des

formes que prennent les plantes ou les micro-organismes pour résister aux conditions défavorables) se propagent aussi facilement que de la fumée lorsqu'elles sont dispersées au bon endroit, au bon moment. Tel le virus de la grippe qui a tué 20 millions de personnes en 1918 en se propageant dans l'air, les spores de nombreux agents pathogènes des cultures passent de plantes en plantes, transportées par le vent ou par la pluie. Par ailleurs, la plupart des pathologies végétales se répandent rapidement pendant la période de croissance de la plante, ont une courte période d'incubation et atteignent visiblement les feuilles.

Le potentiel de la guerre contre les cultures

En 1972, la Convention sur les armes biologiques et les toxines impose aux États signataires d'arrêter leurs recherches sur les armes biologiques et de détruire leurs stocks. Bien qu'elle ait été signée par 141 pays, les craintes de guerre biologique ont considérablement augmenté ces dix dernières années : le terrorisme utilise des armes de plus en plus redoutables, et l'on a appris que l'Irak avait un programme actif d'armes biologiques, avec un armement anti-cultures, avant la guerre du Golfe.

La recherche irakienne sur les armes biologiques a commencé dans les années 1970, et elle s'est intensifiée entre 1985 et 1991 : les biologistes militaires ont étudié des agents pathogènes de l'homme, tel le bacille du charbon, et des toxines, telles la toxine botulique (présente dans certaines conserves avariées) et l'aflatoxine (une toxine de moisissure responsable d'une nécrose du

foie). Contre les cultures, l'Irak étudiait plusieurs espèces de champignons du genre *Tilletia*, qui provoquent le charbon du blé : des masses de spores noires remplacent la partie florale des plants infectés, puis se propagent aux autres plants. Le champignon du charbon du blé produit également de la triméthylamine, un gaz inflammable capable de détruire les moissonneuses qui récoltent des grains contaminés. Les charbons du blé, endémiques en de nombreux endroits du monde, réduisent considérablement les récoltes. La cible probable des essais irakiens était l'Iran, où le blé est la principale culture céréalière.

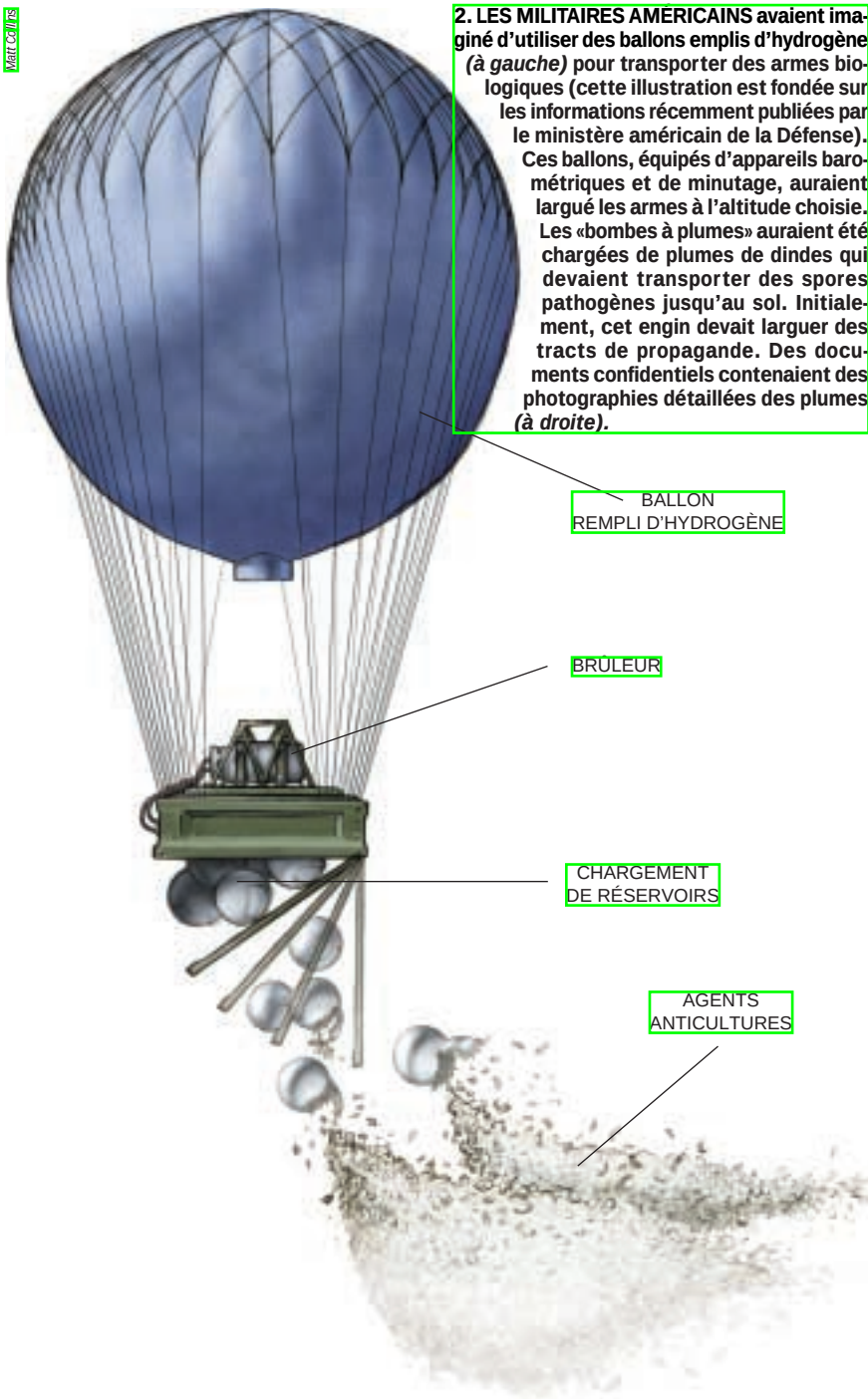
La guerre biologique est une menace internationale, car les pays dépourvus des compétences techniques pour produire des bombes atomiques peuvent toutefois fabriquer des armes qui déclencheraient des famines dévastatrices ou des crises économiques.

Les principales cultures vivrières ont de nombreuses variétés, dont chacune est adaptée à des conditions particulières de climat et de sol. Ces variétés ont des sensibilités différentes aux maladies. Les agents pathogènes des cultures existent aussi sous différentes formes, qui infectent les cultures et provoquent plus ou moins de dégâts selon les variétés cultivées. Un agresseur pourrait utiliser ces propriétés pour réaliser une arme spécifique : en isolant une souche d'agent pathogène qui n'attaquerait que les ressources principales de l'ennemi, il éviterait que les effets de l'arme ne se retournent contre lui.

Les exemples d'épidémies naturelles montrent que les dégâts seraient terribles. En 1970, l'helminthosporiose,



1. LES DEFOLIANTS CHIMIQUES, tels ceux qui furent utilisés pendant la guerre du Vietnam, sont issus des programmes de recherche sur les armes biologiques contre les cultures vivrières.



une maladie due à un ver, a détruit pour six milliards de francs de blé dans le Sud des États-Unis. Dans le monde entier, des épidémies périodiques de rouille et de charbon des céréales coûtent des centaines de millions de francs. La rouille des feuilles du caféier, qui a détruit les plantations de café du Sud-Est asiatique au XIX^e siècle, dévasta l'Amérique latine depuis 20 ans.

De surcroît, une épidémie des cultures vivrières due à une attaque biologique ressemblerait à une épidémie naturelle, dissimulant l'agresseur et lui évitant des représailles. Un gouvernement ferait mieux admettre à sa population une attaque contre des plantes que la mort d'êtres humains. Pourtant, la destruction de cultures serait indirectement aussi redoutable que des armes biologiques contre les personnes. Par exemple, une attaque de charbon, qui infecterait et tuerait plusieurs centaines de milliers de personnes, semblerait plus grave que la destruction des récoltes, alors que l'anéantissement d'une culture stratégique, tel le riz dans un pays en développement, engendrerait une famine au moins aussi meurtrière. La famine serait aggravée par un affaiblissement immunitaire et par des maladies qui provoqueraient de terribles souffrances.

Contrairement aux armes classiques, les armes biologiques atteindraient les civils, ce qu'essaient d'éviter les règlements internationaux. Or, l'histoire montre que les maladies des cultures décimeraient les populations civiles. En Irlande, en 1845 et en 1846, le mildiou de la pomme de terre a tué un million de personnes et en a chassé un autre million. Au Bengale, en 1942 et en 1943, plus de deux millions de personnes sont mortes de faim à la suite d'une épidémie d'helminthosporiose du riz.

Les tentatives des pays occidentaux

Plusieurs pays industrialisés se sont intéressés à la guerre biologique, avant que la Convention de 1972 soit signée. Le programme français d'armement biologique, par exemple, a commencé en 1921. Vers la fin des années 1930, les militaires étudiaient deux ravageurs de la pomme de terre : le mildiou et le doryphore. Puis, pendant la Seconde Guerre mondiale, la Grande-Bretagne a concentré ses recherches sur le bacille du charbon ; les tests, sur l'île Gruinard, au large de l'Écosse, ont rendu



ce territoire inhabitable pendant près de 50 ans. En 1943, les militaires britanniques ont jugé que l'île Gruinard était trop proche du continent et ils ont préféré faire leurs essais dans la prairie de l'Alberta, au Canada. Dans les années 1950, ils ont également utilisé des herbicides chimiques, notamment pendant l'insurrection communiste en Malaisie.

L'Allemagne n'a pas été en reste. Une étude effectuée à la fin de la Seconde Guerre mondiale a révélé que les plans et les idées étudiés par les biologistes végétaux de l'armée allemande étaient nombreux. L'Angleterre et les États-Unis étaient particulièrement visés. L'Allemagne a notamment étudié le mildiou de la pomme de terre, la piriculariose du riz, les rouilles jaune et noire du blé, ainsi que des insectes nuisibles, tels le doryphore, le charançon du colza, un carabe du maïs et une guêpe du pin. En 1943, un vaste programme d'élevage de doryphores commençait ; les coléoptères étaient prêts en juin 1944, mais trop tard pour détruire les récoltes de pommes de terre britanniques de l'année.

Au Japon, pendant la Seconde Guerre mondiale, un programme d'armement biologique fut activement dirigé par la tristement célèbre Unité 731. Les membres de cette unité disséquaient des prisonniers vivants et mettaient au point des agents biologiques contre l'homme. Ils étudiaient également de nombreux agents pathogènes des végétaux, et des herbicides chimiques, qui pouvaient contaminer les cultures américaines et soviétiques,

en particulier celles du Nord-Ouest du Pacifique. Le champignon du charbon du blé et les nématodes parasites du blé semblaient les plus prometteurs. Une installation produisait annuellement plus de 90 kilogrammes de spores de rouille des céréales.

Les essais américains

Dès les années 1940 jusqu'à la décision de R. Nixon, en 1969, les États-Unis ont conservé un important programme de guerre biologique, avec des études approfondies d'armes anticultures. Grâce à la loi américaine sur la liberté de l'information, on a aujourd'hui accès aux documents naguère confidentiels qui décrivent ce programme. Julian Robinson, de l'Université du Sussex, a montré que les recherches sur les agents anticultures étaient suffisamment encourageantes pour continuer de financer l'ensemble du programme américain d'armement biologique, lorsqu'il a été interrompu en 1969. L'un d'entre nous (S. Whitby) a poursuivi le travail de J. Robinson et montré que le programme américain anticultures visait la pomme de terre, avec le mildiou, et le soja, la betterave à sucre, les patates douces et le coton, avec des sclérotinia (des champignons qui attaquent les racines de la plante). Le blé d'Ukraine, le grenier de l'ex-Union soviétique, et le riz chinois étaient les cibles principales du programme américain.

Entre 1951 et 1969, les États-Unis ont accumulé plus de 30 tonnes de spores de *Puccinia graminis tritici*, le champignon responsable de la rouille



3. DES PLANTS DE POMMES DE TERRE (à gauche) sont rapidement détruits par le mildiou (à droite). Même légèrement touchées par le mildiou (en bas à droite), les pommes de terre ont un goût désagréable. Cette maladie, qui provoqua une famine en Irlande, en 1845, est une arme biologique puissante.

noire du blé. Une telle quantité aurait suffi à contaminer le blé de toute la planète. Les spores du champignon restent viables pendant plus de deux ans lorsqu'elles sont stockées au frais, et le micro-organisme se propage rapidement quand il est lâché. Un seul grain de blé contaminé contient près de 12 millions de spores, qui peuvent chacune contaminer un plant. Contre le riz, les États-Unis avaient rassemblé, en 1966, une tonne de spores de la taille d'un grain de poussière du champignon *Piricularia oryzae*, responsable de la piriculariose.

Les armes américaines étaient diaboliques : une bombe d'environ 200 kilogrammes, initialement mise au point pour la dispersion de tracts de propagande, était emplie de plumes couvertes

La guerre biologique contre les drogues

En 1998, le Congrès américain a voté un budget de 150 millions de francs pour un programme de lutte contre la drogue. Ce programme comporte des recherches sur des agents pathogènes des plantes qui sont à l'origine de la cocaïne, de l'héroïne ou du haschich.

L'article I de la Convention de 1972 condamne la mise au point, la production et le stockage d'agents biologiques à des fins hostiles ou dans les conflits armés, mais il autorise les armes biologiques pour des objectifs prophylactiques, protecteurs ou pacifiques. La collaboration avec les États où les drogues sont produites serait requise.

Toutefois, le programme suscite des craintes : les épidémies provoquées pourraient-elles s'étendre à d'autres plantes ? Et les agents pathogènes des plantes seraient-ils toujours libérés avec le consentement

des pays traités ? Enfin, les connaissances recueillies lors de ce programme pourraient être détournées.



Plant de coca.

de la fine poudre des spores du champignon (environ 300 ans auparavant, les Britanniques usaient également de ruse en distribuant aux Indiens des couvertures contaminées par la variole). Les plumes libérées par la bombe devaient flotter vers le sol, emportées par le vent, et se répartir sur une vaste zone, où elles devaient contaminer les cultures par contact. D'après un rapport du Camp Detrick, où les «bombes à plumes» ont été testées, les plumes couvertes par dix pour cent (en masse) de spores de rouille des céréales et larguées par un adaptateur M16A1 modifié, de 400 à 550 mètres d'altitude, transportent assez de spores pour déclencher une épidémie.

Les Américains ont également pulvérisé des herbicides chimiques sur le Vietnam avec des avions d'assaut F-100, F-105 et F-4C, et ils ont mis au point des techniques de dissémination par ballons, sans équipage (voir la figure 2).

Une menace croissante ?

Alors que les États-Unis arrêtaient les travaux en 1969, l'Union soviétique semble avoir poursuivi son programme anticultures jusqu'à sa dissolution, en 1991. Les programmes de divers pays sont restés inconnus jusqu'en 1995, lorsque la Commission spéciale de l'Organisation des Nations unies a notamment fait connaître les travaux irakiens.

La menace de la guerre biologique reste donc considérable. Les pays

industrialisés ont les moyens financiers et techniques d'identifier précocement la survenue d'une maladie et d'enrayer l'épidémie à l'aide de pesticides, mais les pays en développement sont démunis.

Toutefois, les pays industrialisés seraient pénalisés par la forte standardisation de leur agriculture : un même agent pathogène pourrait détruire d'un coup toute une culture, et même s'ils enrayeraient une épidémie, le coût de la défense serait considérable.

Les recherches fondamentales sur le génome des plantes et leurs interactions avec les agents pathogènes visent à augmenter la productivité agricole, mais ces travaux pourraient être détournés vers la conception d'armes plus efficaces contre les cultures : à l'aide des techniques biologiques, on peut créer des organismes pathogènes plus robustes, résistant aux pesticides classiques ou survivant dans une large gamme de température ou d'humidité.

Selon un rapport de l'Organisation des Nations unies, dix maladies sont principalement à craindre ; la rouille du blé, le charbon de la canne à sucre et la piriculariose du riz sont les pires. Le maïs, les pommes de terre, de nombreuses variétés de haricots, divers fruits et le café seraient également menacés, tout comme les pins, économiquement importants pour le bois d'œuvre.

Depuis la fin de la guerre froide, les pressions politiques et les sanctions économiques sont devenues aussi

importantes que les conflits armés : le contrôle des armes anticultures devrait être renforcé.

Peu après la guerre du Golfe, à Genève, des négociations ont conclu qu'un protocole de contrôle efficace doit être établi. Une commission devrait pouvoir inspecter les installations capables d'élaborer des armes biologiques, et contrôler les déclarations des États. N'importe quel site devrait être accessible aux inspecteurs, à n'importe quel moment. En cas de violation présumée du traité, les enquêtes approfondies sur le terrain devraient être également autorisées.

L'Union européenne, les États-Unis et divers autres États sont en faveur de la création d'un tel protocole de contrôle avant 2001, date de la cinquième conférence d'examen de la Convention de 1972. Toutefois, le consensus n'est pas atteint : le détail des contrôles reste à définir, et les exigences en matière d'assistance scientifique et technique des pays industrialisés et des États en développement divergent. Le protocole lui-même ne doit pas favoriser l'accès des pays les moins avancés à l'arme biologique, mais il ne doit pas gêner les échanges scientifiques non militaires. D'importantes sociétés biotechnologiques redoutent également l'espionnage industriel pendant les visites et les inspections. Enfin, certains pays souhaitent peut-être conserver des programmes d'armement biologique.

En cas d'échec de la Convention sur les armes biologiques et les toxines, une part importante de l'armement de destruction en masse échapperait au contrôle international, au moment où les progrès scientifiques et techniques s'accroissent. Les cultures vivrières qui nourrissent les milliards de citoyens du monde seraient alors en danger.

Paul ROGERS, Simon WHITBY et Malcolm DANDO sont membres du Département d'études sur la paix de l'Université de Bradford, en Angleterre.

Simon WHITBY et Paul ROGERS, *Anti-Crop Biological Warfare – Implications of the Iraqi and US Programs*, in *Defense Analysis*, vol. 13, n° 3, pp. 303-318, 1997.

George N. AGRIOS, *Plant Pathology*, quatrième édition, Academic Press, 1997.

Malcolm DANDO, *Biotechnology, Weapons and Humanity*, British Medical Association, Harwood Academic Publishers, 1999.

La cartographie de l'Univers

STEPHEN LANDY

Grâce à des techniques issues de l'analyse musicale, les astronomes étudient comment les galaxies s'agrègent.



1. TROIS MILLIONS DE GALAXIES, contenant chacune des milliards d'étoiles, apparaissent sur cette carte qui couvre 15 pour cent du ciel autour de la constellation du Sculpteur. Les galaxies, qui semblent emplir le ciel et lui conférer la même apparence dans toutes les directions, se groupent en amas, groupes et chaînes. Cette carte, où la luminosité de chaque point est proportionnelle au nombre de galaxies qu'il représente, est le résultat d'un recensement automatique des galaxies. L'image a été créée à partir de photographies en noir et blanc. Dans cette version en fausses couleurs, les points bleus, verts et rouges représentent respectivement les galaxies brillantes, intermédiaires et faibles. Les trous sombres sont des zones, autour d'étoiles brillantes, qui n'ont pu être sondées.

Pour les astronomes, les galaxies sont des structures immenses : rassemblements de quelques centaines de milliards d'étoiles, enchâssées dans un gigantesque nuage de gaz et de poussières, elles s'étendent sur plusieurs centaines de milliers d'années-lumière. Pour les cosmologistes, qui considèrent l'ensemble de l'Univers plutôt que ses constituants, les galaxies ne sont que des briques de base. L'Univers observable en contient des milliards, assemblées en amas, qui s'étendent chacun sur plus de trois millions d'années-lumière et sont réunis à leur tour en

superamas encore plus grands. Dès le début de l'expansion de l'Univers, les forces qui étaient alors à l'œuvre ont structuré l'ensemble des galaxies, puis cette structure a été amplifiée par les interactions gravitationnelles. Aujourd'hui, quelle que soit l'échelle d'observation, les galaxies sont regroupées en structures complexes.

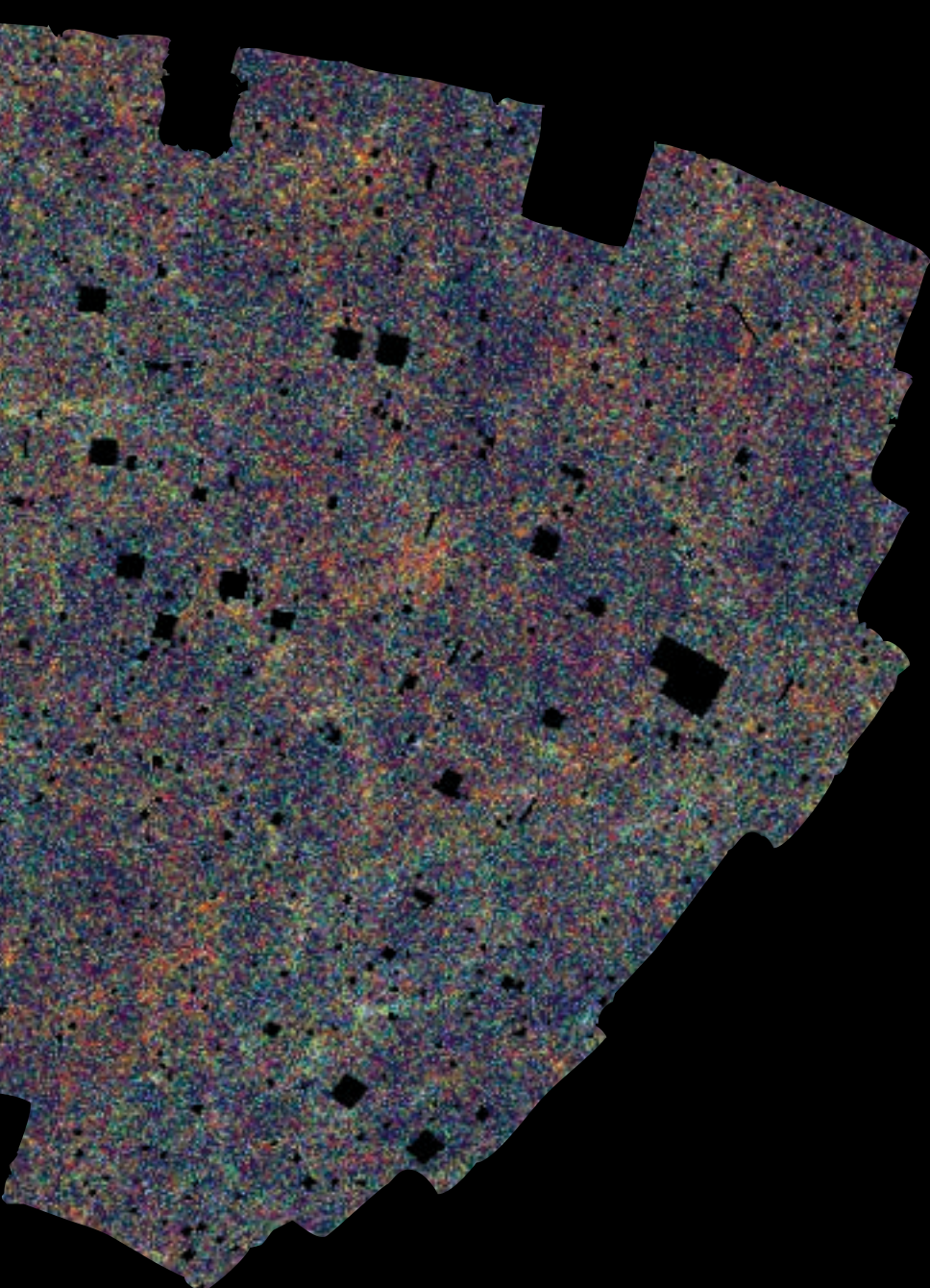
La grégarité des galaxies et des amas de galaxies va pourtant à l'encontre d'un pilier de la cosmologie moderne : le principe cosmologique. Selon ce principe, l'Univers est globalement homogène et isotrope ; aucun de ses points et aucune orientation

ne sont particuliers. Toutes les études cosmologiques sur la densité moyenne de l'Univers, son expansion ou sa forme sont fondées sur le principe cosmologique. À l'échelle de l'Univers observable, d'un rayon de 15 milliards d'années-lumière, la répartition de ces paquets galactiques devrait être quasi uniforme. Comment concilier l'homogénéité de la matière aux plus grandes échelles et son hétérogénéité aux échelles inférieures ?

Grâce à de nouvelles techniques d'observation, les astronomes étudient aujourd'hui la répartition des galaxies lointaines. Contrairement à ce qu'on croyait, l'Univers ne devient pas homogène à partir d'une certaine échelle, et une structure à grande échelle doit être comprise en termes de processus aléatoires : on suppose que l'Univers n'est homogène et isotrope que de manière statistique. Ces nouvelles théories donnent des pistes pour l'exploration des questions les plus ardues de la cosmologie : à quoi ressemblait l'Univers à ses débuts ? Comment est-il devenu ce que nous connaissons aujourd'hui ? Quelles formes de matière, classique ou exotique, contient-il ?

Les récentes avancées résultent de deux décennies de découvertes palpitantes. À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les cosmologistes ont commencé une cartographie systématique des galaxies. Ils voulaient analyser la répartition de toute la matière, y compris la « matière sombre » intergalactique, laquelle n'émet pas de lumière.

Les cosmologistes ont ainsi découvert d'abord que les galaxies ont une répartition fractale jusqu'à des échelles de 100 millions d'années-lumière (voir *La distribution des galaxies : vides et superamas*, par Stephen Gregory et Laird Thompson, in *Pour la Science*, mai 1982) : comme la côte de la Bretagne, par exemple, une courbe fractale a la même structure à toutes les échelles. Si la répartition fractale des galaxies subsistait aux échelles les plus grandes, on devrait douter du principe cosmologique : contrairement à une foule, une fractale n'apparaît pas homogène lorsqu'on la regarde de loin. D'autre part, on caractérise une structure fractale par sa dimension, qui peut être non entière. La structure fractale de l'Univers jusqu'aux plus grandes échelles observées est comprise entre



un et deux. Or, dans un Univers fractal de dimension deux, la masse située au sein d'un volume sphérique centré sur une galaxie quelconque augmente avec le carré du rayon. Dans un tel Univers, la densité moyenne dépend de l'échelle, et d'autres paramètres fondamentaux, telle la vitesse d'expansion cosmique, perdent leur signification. En bref, la découverte de la fractalité de l'Univers sembla d'abord anéantir la cosmologie moderne.

Puis les observations montrèrent que la nature fractale disparaît à des échelles de quelques centaines de millions d'années-lumière. À très grande échelle, la répartition des galaxies se décrit en termes statistiques, comme un bruit, par une moyenne et une variance.

Le principe cosmologique était sauf, jusqu'à ce que, vers la fin des années 1980, de nouvelles observations le remet-

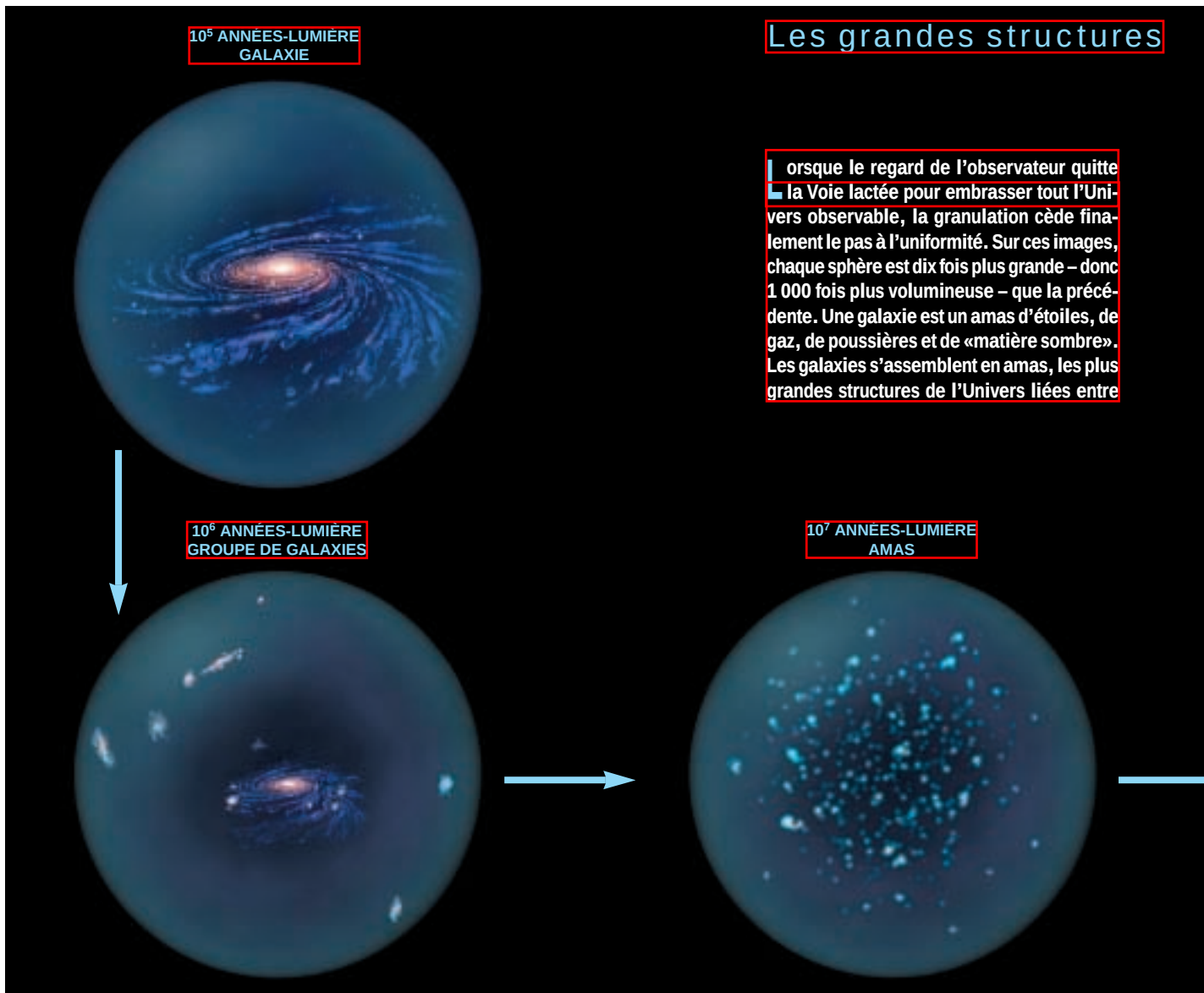
tent en question (voir *Les plus vastes structures de l'Univers*, par Jack Burns, in *Pour la Science*, septembre 1986) : on identifia une «Grande muraille» de galaxies, qui mesurait 750 millions d'années-lumière de longueur, plus de 250 millions d'années-lumière de largeur et 20 millions d'années-lumière d'épaisseur. Une structure cohérente aussi colossale ne s'expliquait plus par une fluctuation statistique. Il fallut poursuivre la cartographie : ce fut le recensement mené entre 1988 et 1994 à Las Campanas, dans le désert du Chili.

Une tranche d'Univers

Les difficultés techniques furent légion : en raison de la faible luminosité des galaxies les plus lointaines, les temps de pose étaient très longs, et l'énorme volume d'espace à étudier augmentait

le nombre d'objets à observer. Autrement dit, nous devions observer plus d'objets avec des expositions plus longues, mais un temps de télescope plus court ! Pour ces raisons, nous avons décidé d'effectuer un recensement très profond (deux milliards d'années-lumière), large (85 degrés à travers le ciel), mais mince (1,5 degré) : nous avons examiné la répartition des galaxies dans une tranche presque plane d'Univers. Bien que la portion d'Univers ainsi observée ait été faible, nous connaissons aujourd'hui l'organisation de l'Univers à des échelles de quelques milliards d'années-lumière ; nous avons six cartes de la tranche explorée et nous connaissons la position de 26 000 galaxies.

Le sondage s'est effectué en plusieurs étapes. D'abord, nous avons fait des observations photométriques – c'est-à-dire que nous avons pris des



photographies du ciel en captant des émissions très faibles – avec une caméra à transfert de charge (CCD) montée sur un télescope de un mètre de diamètre. Pour abrégier l'étude, nous avons utilisé une technique nommée photométrie par balayage à entraînement : on pointe le télescope vers un point du ciel, puis on coupe le système de poursuite automatique qui compense la rotation de la Terre ; le télescope reste immobile pendant que le ciel défile et que des ordinateurs lisent les données du détecteur CCD. On obtient ainsi une longue image continue, à une latitude céleste constante et l'on évite de longs repositionnements du télescope. Au total, cette étude photométrique totalisa près de 450 heures de pose.

Ensuite, nous avons analysé les images afin de déterminer quels objets étaient des galaxies, et non des étoiles

ou des défauts. Nous avons choisi les candidats à leur luminosité et à leur aspect flou, typique des galaxies. Nous avons observé les galaxies sélectionnées à l'aide d'un spectrographe couplé à un télescope de 2,5 mètres de diamètre. À la manière d'un prisme, le spectrographe décompose la lumière en ses différentes longueurs d'onde, ce qui nous a permis de calculer le décalage vers le rouge de ces galaxies (le décalage des rayonnements vers les courtes longueurs d'onde mesure la distance des objets, car l'Univers est en expansion : plus les objets sont éloignés de nous, plus ils s'éloignent rapidement).

Un recensement de cette ampleur aurait été impossible si nous avions mesuré les spectres individuellement : pour chaque galaxie, on doit faire une pose de deux heures pour recueillir assez de lumière. Grâce à Stephen

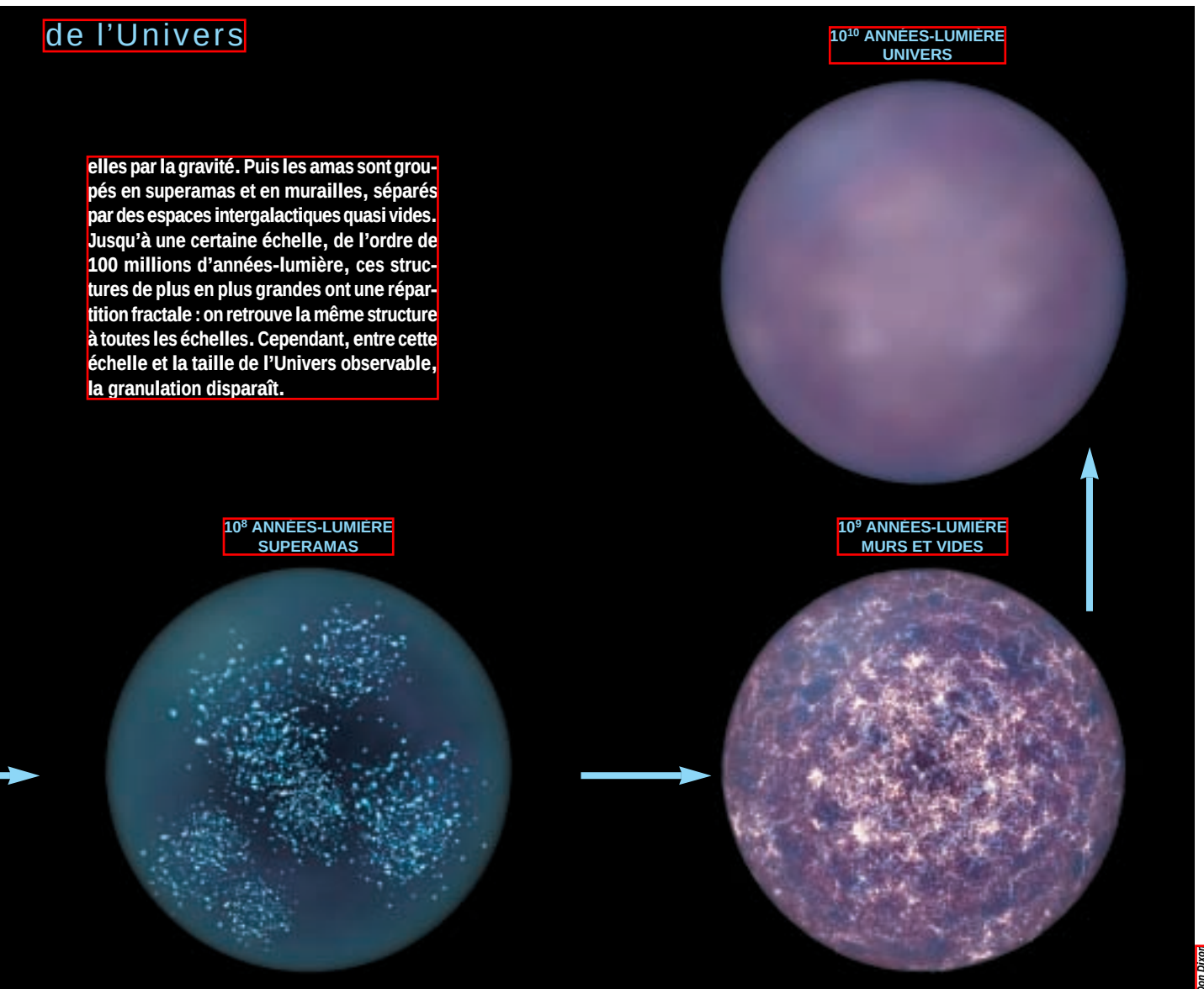
Shectman, de l'Observatoire Carnegie, le travail a été accéléré : son système à plusieurs fibres optiques mesure simultanément les spectres de 112 galaxies. Une fois des objets sélectionnés, on perce une plaque métallique de trous en des positions qui correspondent aux positions des objets dans le ciel. Puis on place cette plaque au foyer du télescope et l'on équipe chaque orifice d'une fibre optique qui transporte la lumière de chaque objet vers un canal du spectromètre. Même avec ce traitement en parallèle, il a fallu 600 heures d'observation, en 100 nuits, pour enregistrer tous les spectres.

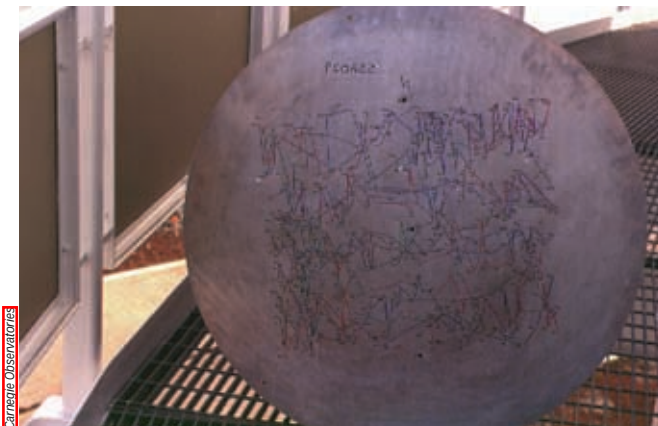
Le sondage de l'Univers

Les cartes obtenues semblent montrer que les galaxies sont regroupées (voir la figure 5). Les impressions sont

de l'Univers

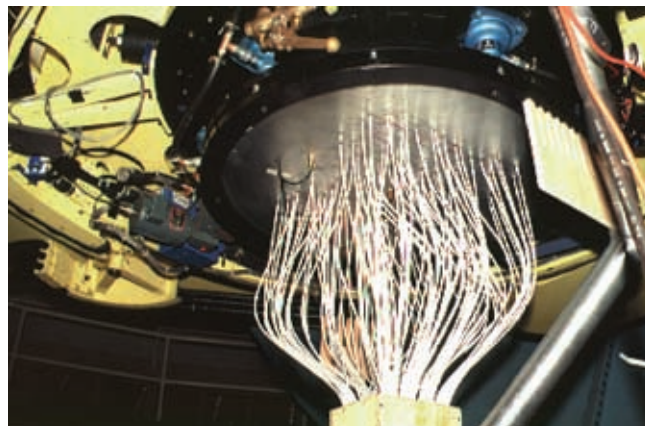
elles par la gravité. Puis les amas sont groupés en superamas et en murailles, séparés par des espaces intergalactiques quasi vides. Jusqu'à une certaine échelle, de l'ordre de 100 millions d'années-lumière, ces structures de plus en plus grandes ont une répartition fractale : on retrouve la même structure à toutes les échelles. Cependant, entre cette échelle et la taille de l'Univers observable, la granulation disparaît.





ASTROLOGIE OBSERVATOIRES

2. AFIN D'ACCELERER LE RECENSEMENT de plus de 26 000 galaxies, Stephen Sheckman a construit un instrument qui mesure simultanément le spectre de 112 galaxies. Dans une plaque métallique (à gauche), il a percé des trous qui correspondent aux positions des



galaxies dans le ciel. Des fibres optiques (à droite) conduisent la lumière de chaque galaxie à un canal particulier d'un spectrographe couplé au télescope de 2,5 mètres de diamètre de l'Observatoire de Las Campanas, au Chili.

Les nouveaux catalogues

À la fin des années 1970, à Princeton, Jim Peebles définit ce qui est devenu l'une des grandes thématiques de la cosmologie de la fin de ce siècle : l'analyse statistique de la répartition à grande échelle de l'Univers. Il applique le formalisme statistique à l'information présente dans les catalogues de galaxies, afin, notamment, de tester les modèles théoriques de formation des galaxies.

Ce type d'approche nécessite toutefois une cartographie systématique de l'Univers. Les premiers relevés des années 1980 ont caractérisé la structure à grande échelle de l'Univers proche. Cependant, la présence de grandes murailles qui s'étendaient sur des distances comparables à la taille des catalogues, a conduit les astronomes à étudier des échelles encore supérieures. Ils ont bénéficié, pour ces études, de la révolution technique qu'a été la spectroscopie multi-objets. À l'ESO, les instruments *Optopus*, puis *MEFOS* ont multiplié par un facteur 30 à 100 le nombre d'objets acquis en une seule pose.

Ainsi ont été établis de nouveaux catalogues, comme celui de Las Campanas, mais aussi l'*ESO Slice Project* («projet de tranche de l'ESO»), qui résulte d'une collaboration de 20 astronomes italiens, français et anglais. Ce relevé de plus de 3 000 galaxies, dirigé entre 1991 et 1998 par Giampaolo Vettolani, de l'Observatoire de Bologne, et par Chantal Balkowski, de l'Observatoire de Paris, a été conçu en minimisant les biais observationnels, au détriment de sa taille (22 degrés carrés). On voulait notamment mesurer avec une grande précision la fonction de luminosité des galaxies, c'est-à-dire la proportion de galaxies à une luminosité donnée (la proportion de galaxies intrinsèquement très faibles était jusqu'alors très mal connue).

On a ainsi découvert que le nombre de ces galaxies très peu lumineuses croît beaucoup plus rapidement que ce qu'on prévoyait en extrapolant la fonction connue pour les galaxies plus brillantes. Ceci est dû en grande partie à des galaxies possédant des raies d'émission, signe d'une formation d'étoiles intense, qui deviennent très nombreuses aux faibles luminosités.

Tous les relevés de type «grand angle» donnent des résultats cohérents. Les relevés les plus larges sur le ciel ont montré que la structuration des galaxies dépend de la luminosité : les galaxies très lumineuses se regroupent plus que les galaxies plus faibles. Les propriétés de regroupement varient avec le type morphologique des objets : les galaxies elliptiques sont plus grégaires que les galaxies spirales. L'analyse de ces catalogues a montré l'existence d'une invariance d'échelle dans l'Univers, caractéristique des modèles «hiérarchiques» de formation des structures dus à Richard Schaeffer, du CEA Saclay.

Le relevé de Las Campanas, qui est aujourd'hui le plus profond de ces relevés, a confirmé que la structure lacunaire, mise en évidence par Valérie de Lapparent, de l'Institut d'astrophysique de Paris, se retrouve aux distances supérieures, et il a également révélé que la taille des structures caractéristiques plafonne à une certaine dimension (avec de grands vides et de grandes murailles mesurant entre 300 et 600 millions d'années-lumière). C'est également ce relevé qui permet de mesurer le spectre de puissance et la fonction de corrélation aux échelles les plus grandes.

Par ailleurs, des catalogues de type «téléobjectif», profonds mais étroits, sondent localement l'Univers lointain. Les astronomes français sont très actifs dans ce domaine avec, notamment, deux sondages profonds : les relevés Canada-France et *ESO-Sculptor*.

Pour savoir comment la structure de l'Univers évolue avec le temps, l'idéal serait d'avoir une vision à la fois large et profonde de l'Univers, mais des études très longues sont nécessaires. Côté européen, l'instrument *VIRMOS* associé au *VLT* permettra, avec un multiplexage de 800 objets par champ, de cataloguer en profondeur environ 150 000 galaxies et de retracer la structure de l'Univers jusqu'à dix pour cent de son âge actuel.

Sophie MAUROGORDATO,
CNRS-CERGA, Observatoire de la Côte d'Azur.

insuffisantes, car le cerveau cherche souvent des formes là où elles n'existent pas. Pourtant, ici, l'analyse statistique confirme l'existence de regroupements.

On quantifie cette notion de regroupement à l'aide de fonctions de corrélations, qui représentent le nombre de paires d'objets en fonction de la distance qui les sépare. Avant d'examiner l'application de ces fonctions, considérons le cas plus simple de cerfs dans une forêt. Si l'on trouve un cerf au hasard dans une forêt, on trouvera plus probablement un autre cerf à quelques mètres de lui plutôt qu'à quelques centaines de mètres. La fonction de corrélation prend, dans ce cas, une grande valeur pour des distances de quelques dizaines de mètres et une faible valeur pour des distances de quelques centaines de mètres. Elle décrit mathématiquement le fait que les cerfs voyagent en petits groupes.

Pour les galaxies, on fait une analyse similaire, mais des difficultés surgissent : si l'analyse fonctionne bien pour des échelles bien inférieures à la taille du sondage, elle échoue lorsque l'échelle devient comparable. En effet, le nombre de galaxies – et, par conséquent, le nombre de paires de galaxies – est limité ; un excès de paires à de petites distances est nécessairement compensé par un déficit de paires à des distances supérieures, puisque le total est fixé. Ce jeu de bilan nul contamine le signal de regroupement aux échelles plus grandes.

Heureusement, une autre technique vient aider les astronomes pour l'analyse des regroupements à grande échelle : l'analyse harmonique, ou analyse du spectre de puissance. L'analyse harmonique, comme son nom l'indique, est étroitement liée à l'étude du son. En fait, l'analyse mathématique de la répartition des galaxies est identique à celle du bruit aléatoire.

On décrit de nombreux phénomènes physiques, telles les vagues à la surface de l'océan ou les fluctuations de la pression de l'air dans une pièce, par leur spectre de puissance. De même, l'oreille humaine analyse le son en analysant le spectre de puissance des fluctuations de pression de l'air. Ces fluctuations peuvent être considérées comme un

mélange d'ondes ayant chacune une fréquence et une intensité spécifiques. Nos oreilles décomposent les fluctuations en leurs fréquences constitutives, envoyant au cerveau des signaux qui décrivent l'intensité (ou l'amplitude) de chaque fréquence.

Le spectre de puissance mesure l'intensité des fluctuations de pression en fonction de la fréquence. C'est ce qu'indique l'égaliseur d'une chaîne haute-fidélité. Les gros instruments de musique, tels la contrebasse ou le tuba, émettent une grande partie de leur puissance à de grandes longueurs d'onde, qui correspondent à des basses fréquences. Inversement, le son d'un verre qui se brise se compose principalement d'ondes de hautes fréquences.

Le bruit aléatoire est particulier, parce qu'il peut être complètement décrit par son spectre de puissance. Considérons deux personnes qui visitent à quelques minutes d'intervalle la même chute d'eau (un phénomène qui émet un bruit aléatoire) et qui enregistrent chacune le son pendant plusieurs minutes. Bien que les enregistrements ne soient pas identiques (le son de la cascade change en permanence), les deux enregistrements peuvent décrire le son caractéristique de la chute : en les analysant, on trouve le même spectre de puissance. Les propriétés statistiques des deux enregistrements sont identiques.

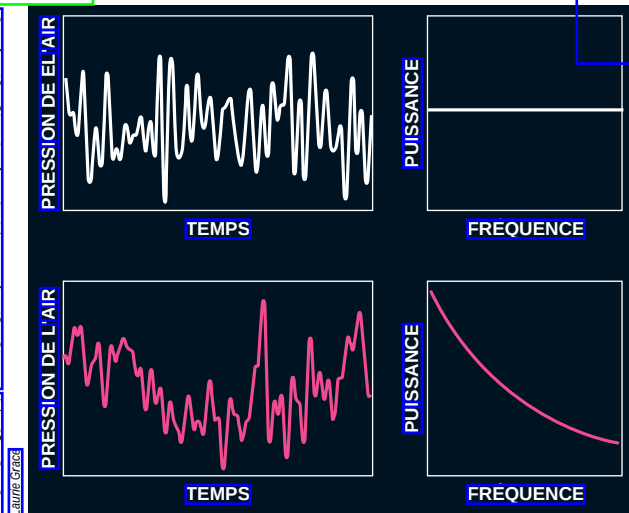
La couleur du son

Un bruit dont le spectre de puissance est plat, ce qui correspond à une puissance identique pour toutes les fréquences, est un bruit blanc. Un tel bruit ressemble à une teinte blanche, car la lumière blanche s'obtient en mélangeant également toutes les couleurs (caractérisées chacune par une longueur d'onde). Le bruit blanc est le grésillement que l'on entend lorsqu'on règle un poste de radio à une fréquence intermédiaire entre celles de deux stations. Ce son est parfaitement aléatoire : à chaque instant, le son est indépendant du son qui l'a précédé (on dit que ces sons sont décorrélés). Un autre spectre de puissance particulier est celui du bruit rose, où chaque octave (entre une fréquence et son double) émet la même puissance (voir la figure 3). Une cascade engendre un bruit rose.

L'analyse harmonique peut réconcilier le principe cosmologique avec l'hétérogénéité des galaxies. Si l'Univers est homogène et isotrope, les observateurs situés dans des galaxies distinctes devraient mesurer les mêmes propriétés de l'Univers aux échelles les plus grandes. Naturellement, ils verraient des répartitions différentes des galaxies, mais, pour un nombre suffisant de sondages, ou pour un sondage de taille suffisante, les deux observateurs mesureraient les mêmes fluctuations statistiques. Ces fluctuations, comme celles du son de la cascade, peuvent être décrites par un spectre de puissance.

Lorsque l'Univers se dilate et évolue, divers mécanismes physiques modifient le spectre de puissance de ses structures à grande échelle. Très peu de temps après le Big Bang, des fluctuations quantiques ont conféré à l'Univers un spectre de puissance. Edward Harrison et Yakov Zel'dovich ont calculé ce spectre primordial vers la fin des années 1960 : c'est une loi de puissance en inverse de la racine cubique de la fréquence, un spectre de bruit rose à trois dimensions.

E. Harrison et Y. Zel'dovich ont obtenu ce résultat en supposant que la plupart des forces naturelles, y compris la gravité, ne possèdent pas d'échelle de longueur intrinsèque ; ce sont des lois



3. NOUS BAIGNONS DANS LES BRUITS BLANCS ET ROSES. Le bruit blanc, analogue aux crépitements d'un récepteur de radio ou à la «neige» d'un téléviseur mal réglé, est complètement aléatoire. Le son fluctue sans cesse, sans régularité (en haut). Le bruit rose, analogue au son d'une cascade ou des vagues qui se brisent sur la plage, est fractal. Cette distinction se retrouve dans les spectres de puissance : le bruit blanc a une puissance égale à toutes les fréquences, tandis que le bruit rose a plus de puissance dans les basses que dans les aigus ; il varie en raison inverse de la fréquence.

de puissance. Dès lors, le spectre de puissance initial devait être une certaine forme de loi de puissance en fonction de la fréquence, de sorte qu'aucune échelle de longueur particulière ne soit privilégiée. Les deux physiciens ont aussi compris le rôle joué par la taille de l'horizon dans l'évolution de l'Univers. Cette taille de l'horizon est la distance qu'un faisceau lumineux a parcourue dans l'Univers depuis le Big Bang. Deux points de l'Univers ne peuvent interagir gravitationnellement que s'ils sont séparés d'une distance inférieure ou égale à la taille de l'horizon, parce que les forces de gravitation se propagent aussi à la vitesse de la lumière. Progressivement, à mesure que le temps passe, l'Univers grossit, et la taille de l'horizon augmente. Ainsi, la taille de l'horizon définit une échelle de longueur naturelle sur laquelle la gravité peut opérer.

Que se serait-il passé si le spectre de puissance initial ne dépendait pas exactement de l'inverse de la racine cubique de la fréquence? Si la loi de puissance avait été plus raide (par exemple, l'inverse de la puissance quatrième de la fréquence), alors les fluctuations aux très petites échelles auraient été supérieures par le passé. En calculant les fluctuations de densité dans la prime histoire de l'Univers, lorsque la taille de l'horizon était petite, les deux physiciens ont trouvé que de nombreuses régions auraient contenu une densité de matière si élevée qu'elles se seraient rapidement effondrées, peuplant l'Univers de trous noirs. Notre existence même prouve que l'hypothèse d'une loi en inverse de la puissance quatrième est exclue. Inversement, si la loi de puissance était plus plate, alors la densité aux grandes échelles fluctuerait considérablement après les débuts de l'Univers. Or, on n'observe pas de telles fluctuations.

Ce raisonnement convaincant justifie le spectre de puissance, mais il ne l'explique pas. En revanche, la théorie de l'inflation cosmologique propose une explication intéressante, en même temps qu'elle conduit à des conséquences vérifiables (voir *L'Univers inflationnaire*, par Alan Guth et Paul Steinhardt, in *Pour la Science*, juillet 1984).

Beaucoup de grandes murailles

Le spectre de puissance de l'Univers actuel est très différent du spectre primordial : la gravité a amplifié les fluctuations initiales et engendré des structures comme les amas de galaxies. Jadis, la croissance des fluctuations à des échelles spécifiques fut amplifiée ou retardée, selon que l'Univers était dominé par la matière ou par le rayonnement et selon que les particules élémentaires étaient légères et rapides, ou massives et lentes. La cosmologie moderne s'efforce de comprendre l'évolution du spectre de puissance. Ces dernières années, les observations, telles celles de la répartition des galaxies et du rayonnement de fond diffus cosmologique, ont fourni assez de données pour que l'on teste enfin les théories.

Le modèle de matière sombre froide est aujourd'hui l'une des hypothèses qui explique le mieux la croissance des structures de l'Univers. Selon cette théorie, la plus grande partie de la masse de l'Univers est sous la forme de particules massives et invisibles (d'où le terme «sombre»). Cette matière est «froide» parce que, en raison de sa masse, elle se meut lentement. La matière sombre froide, qui interagirait avec la matière ordinaire uniquement par des forces de gravité, serait la masse manquante dans les galaxies et dans les amas de galaxies (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

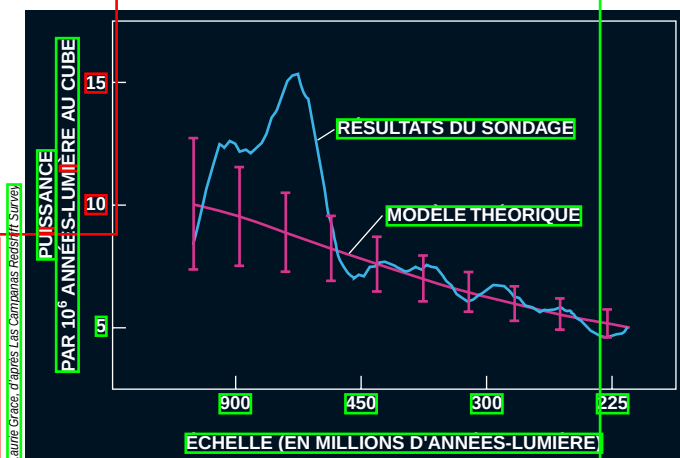
Toutefois, notre sondage montre notamment que la théorie de la matière

sombre froide n'est plus vérifiée aux grandes échelles (600 millions d'années-lumière) (voir la figure 5). Des sondages antérieurs avaient déjà indiqué ce défaut de la théorie, mais nous l'avons confirmé : en considérant l'ampleur de l'écart entre les prévisions du modèle de matière sombre froide et nos observations, ainsi que la taille de l'échantillon de galaxies étudiées, nous évaluons que la probabilité d'observer une telle déviation par pur hasard est de une sur plusieurs milliers.

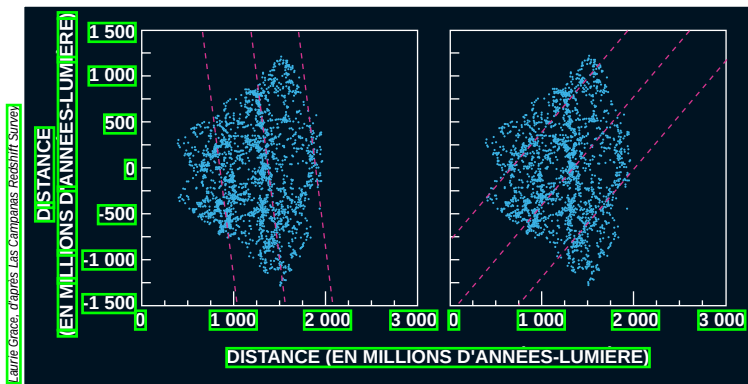
Les gigantesques structures observées dans la répartition des galaxies (voir la figure 5) sont la cause essentielle des différences entre la théorie et les observations. Ces structures sont définies par des frontières nettes, par des filaments et par des vides sur les cartes. La taille des plus grandes structures approche trois milliards d'années-lumière, soit plusieurs fois la dimension de la Grande muraille. La découverte de ces structures et de ses conséquences sur le spectre de puissance est un résultat important du sondage de Las Campanas : aux grandes échelles, la répartition des galaxies n'est plus associée à un bruit aléatoire ; un mécanisme physique doit avoir agi pour donner aux fluctuations de densité cette dimension caractéristique.

Si la formation des structures résultait d'un bruit statistique, quelques murailles et vides apparaîtraient par hasard, mais ils seraient beaucoup plus rares. Ce seraient des fluctuations statistiques plutôt que des structures réelles.

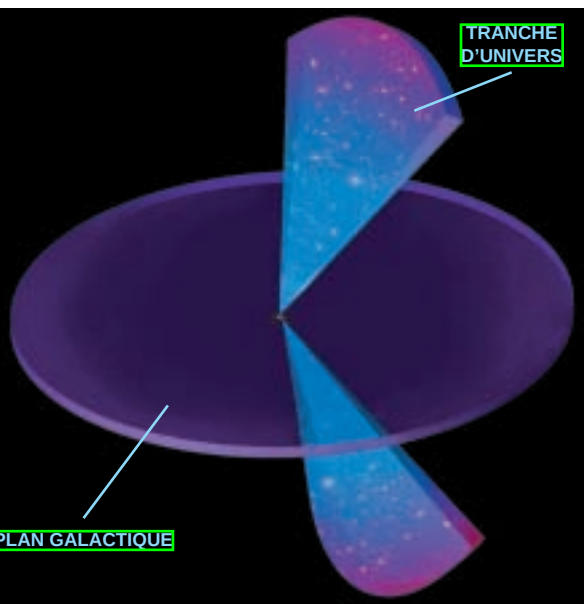
Pourquoi observe-t-on les murailles et les vides? Ont-ils été créés par les forces de gravitation? Peut-être, mais celles-ci déclenchent plus rapidement la formation des petites fluctuations, parce qu'elles mettent moins de temps à attirer la matière aux petites échelles. Si la gravité était en cause, l'agglomération des galaxies aurait dû commencer à petite échelle et s'étendre progressivement aux échelles supérieures. Au cours des 20 dernières années, les cosmologistes ont retenu ce «regroupement hiérarchique» pour expliquer les structures à des échelles inférieures à environ 150 millions d'années-lumière. Toutefois, les analyses de nos sondages montrent que les structures commencent à



4. LE SPECTRE DE PUISSANCE DE L'UNIVERS, mesuré par le sondage de Las Campanas (courbe en bleu), ne correspond pas aux prévisions de la théorie de la matière sombre froide (en rouge). La puissance augmente fortement à des échelles de 600 millions à 900 millions d'années-lumière. Ce désaccord entre modèle et observation signifie que l'Univers est plus structuré à ces échelles que ne l'expliquent les théories actuelles.



5. DEUX TRANCHES D'UNIVERS (à droite) ont été observées lors du sondage de Las Campanas. L'Univers est granuleux aux grandes échelles. Les points, qui représentent les milliers de galaxies contenues dans chaque tranche, ne sont pas répartis uniformément : ils se rassemblent en murailles (*pointillés*), créant des vides dans d'autres régions.



apparaître à des échelles bien supérieures. Le regroupement hiérarchique explique peut-être les petites structures, mais pas les murailles et les vides aux échelles supérieures.

Une nouvelle harmonie des sphères

Aucune des nouvelles hypothèses n'explique la totalité des observations. Certains astronomes ont invoqué un scénario de matière sombre chaude, où l'Univers est dominé par des particules légères, analogues aux neutrinos. L'Univers évoluerait alors de haut en bas, les grandes structures commençant à se former avant les petites. Malheureusement, cette théorie explique mal le regroupement des galaxies à petite échelle.

On a également supposé que l'Univers est moins dense qu'on ne le croyait et qu'il contient peu de matière sombre. Les particules ordinaires, tels les protons et les électrons, auraient constitué un fluide visqueux dans l'Univers primordial. Avant que l'Univers se refroidisse assez pour que protons et électrons se combinent en atomes, des ondes de densité (comme des ondes sonores) se seraient propagées. Après la combinaison des protons et des électrons, ces ondes auraient stimulé l'effondrement gravitationnel à certaines échelles. Curieusement, cette hypothèse résoudrait plusieurs énigmes cosmologiques (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, in *Pour la Science*, mars 1999).

Dans une troisième hypothèse, on note que 600 millions d'années-lumière (l'échelle où l'écart entre les observations et la théorie de la matière sombre froide est le plus grand) est environ la distance de l'horizon au moment où la densité moyenne de matière dans l'Univers est devenue supérieure à la densité d'énergie sous la forme de rayonnement. Un changement aussi important a probablement perturbé le spectre de puissance. Quelle que soit l'explication finale, il se peut que nous détectons ici la plus grande échelle de longueur associée à un mécanisme physique dans la nature.

Même un recensement aussi important que celui de Las Campanas ne donne qu'un petit nombre de mesures indépendantes (50 environ) du spectre de puissance aux grandes échelles. D'autres sondages s'imposent, et plusieurs sont en cours. Un groupe anglo-australien, nommé 2DF, est en train de cartographier plus de 250 000 galaxies, et une collaboration américano-japonaise (*Sloan*) devrait ensuite mesurer les spectres de près d'un million de galaxies, sur la moitié du ciel, échantillonnant un volume 20 fois plus important que celui que nous avons analysé.

Au VI^e siècle avant notre ère, Pythagore a, le premier, appliqué l'analyse musicale au mouvement des astres : il supposait que les corps célestes étaient des trous dans des sphères de cristal et que le mouvement de ces sphères engendrait des sons. Les distances et les vitesses des corps célestes devaient être dans des rapports simples, comme

le sont les notes de la gamme occidentale. Pythagore supposait ainsi l'existence d'une «musique des sphères». Au XVII^e siècle, Johannes Kepler pensait que les orbites des planètes pouvaient être décrites comme des sphères célestes inscrites entre les cinq solides platoniciens (les polyèdres réguliers). Il croyait que les rapports harmoniques en musique pouvaient être déduits de ces solides et il légitimait une relation fondamentale entre les orbites des planètes et ces harmonies. Là encore, une musique des sphères était évoquée.

Aujourd'hui, notre notion de l'analyse harmonique est assez différente. Elle se fonde sur l'analyse des composantes harmoniques de répartitions aléatoires, et le son observé ressemble plus à celui d'une cascade qu'à un chant divin. Bien que l'analyse moderne ne soit pas aussi spirituelle que celle du passé, le concept d'un Univers isotrope associé à une compréhension des champs aléatoires nous permet d'entendre à nouveau la musique des sphères.

Stephen LANDY est astronome au Collège William & Mary, en Virginie.

P.J.E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Stephen A. SHECTMAN et al., *The Las Campanas Redshift Survey*, in *Astrophysical Journal*, vol. 470, pp. 172-188, 10 octobre 1996.

Kelvin K.S. WU, Ofer LAHAV et Martin J. REES, *The Large-Scale Smoothness of the Universe*, vol. 397, pp. 225-230, 21 janvier 1999.

La détection des phéromones

DIDIER TROTIER • KJELL DØVING

Avec leur organe voméronasal, les mammifères analysent les substances biologiques émises par leurs congénères. L'activation de cet organe provoque souvent des réactions physiologiques qui favorisent la reproduction. Dans l'espèce humaine, l'organe voméronasal est peu développé, et il n'est sans doute pas fonctionnel.

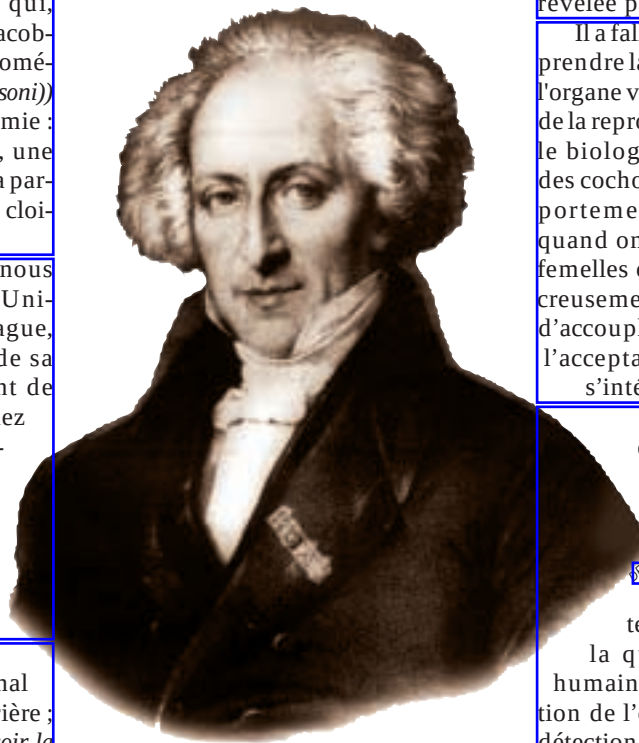
En 1813, l'anatomiste danois Ludvig Jacobson (1783-1843) s'étonne de la présence d'une lamelle cartilagineuse allongée, dans le nez de nombreux mammifères. Il soulève ce cartilage et découvre un organe alors inconnu. Les neurophysiologistes explorent encore aujourd'hui le fonctionnement et les effets de cet organe qui, initialement nommé organe de Jacobson, fut renommé en 1895 organe voméronasal (*organon vomeronasale (Jacobsoni)*) par la Société allemande d'anatomie : l'organe est au contact du vomer, une lamelle osseuse verticale, située à la partie postérieure et inférieure de la cloison des cavités nasales.

Dans son article de 1813, que nous avons récemment retrouvé à l'Université d'agriculture de Copenhague, Jacobson montre l'importance de sa découverte : l'organe est présent de chaque côté de la cloison nasale chez tous les mammifères qu'il a observés (chat, vache, chien, chèvre, cheval, cochon, mouton, tigre, chameau, buffle, daim...) ; sa structure complexe et sa grande taille laissent imaginer un rôle physiologique important.

Chaque organe s'allonge vers l'arrière du nez et comporte un canal interne en cul-de-sac, fermé à l'arrière ; l'ouverture du canal est étroite (voir la figure 2). Chez les rongeurs, l'organe s'ouvre directement dans la partie avancée de la cavité nasale. Chez d'autres animaux, tels le chien, le porc, la chèvre

et le bœuf, l'ouverture communique avec le canal palatin, qui relie la bouche et le nez, derrière les incisives.

Jacobson observe que plusieurs vaisseaux sanguins, dont un très gros, irriguent l'organe. Le canal de l'organe étant rempli de mucus, le physiologiste

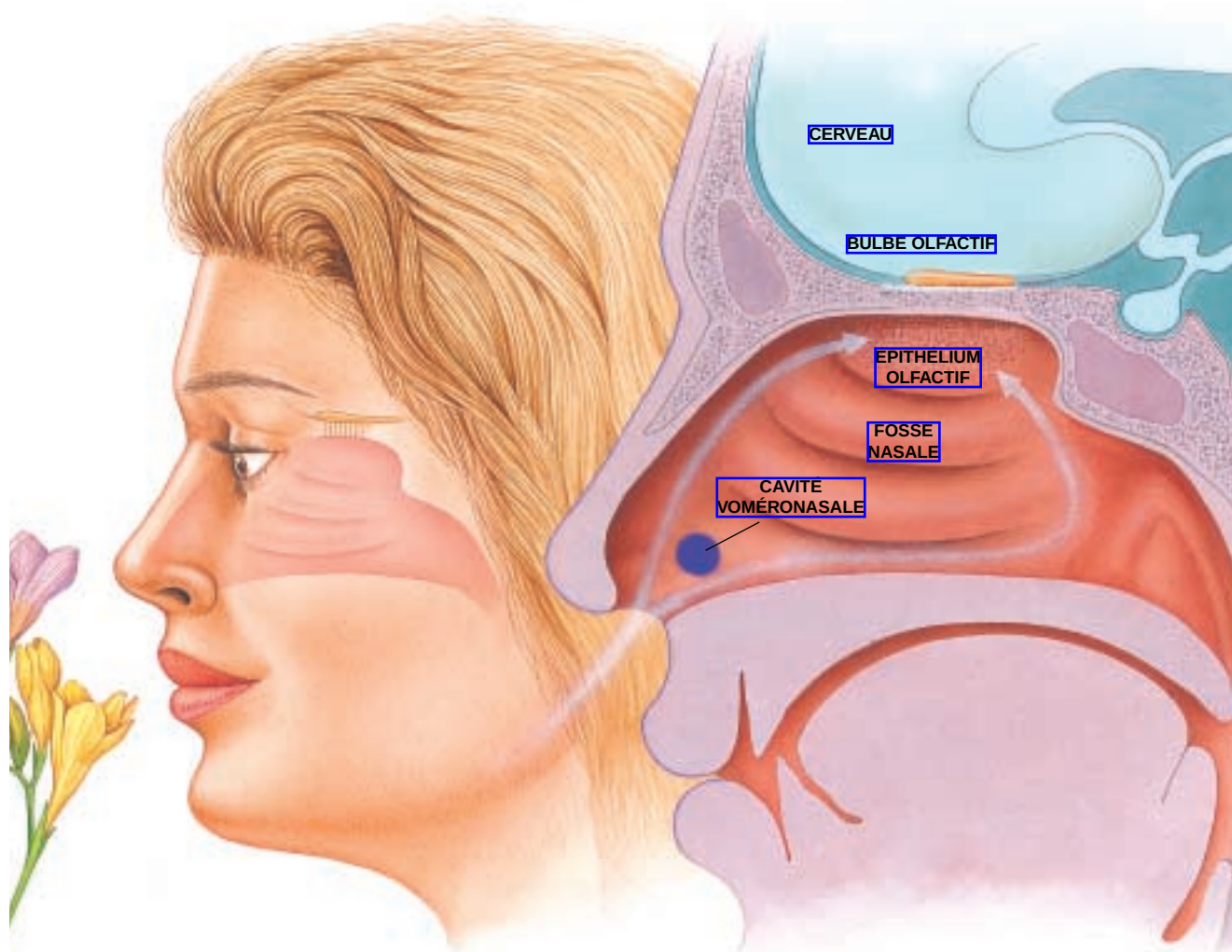
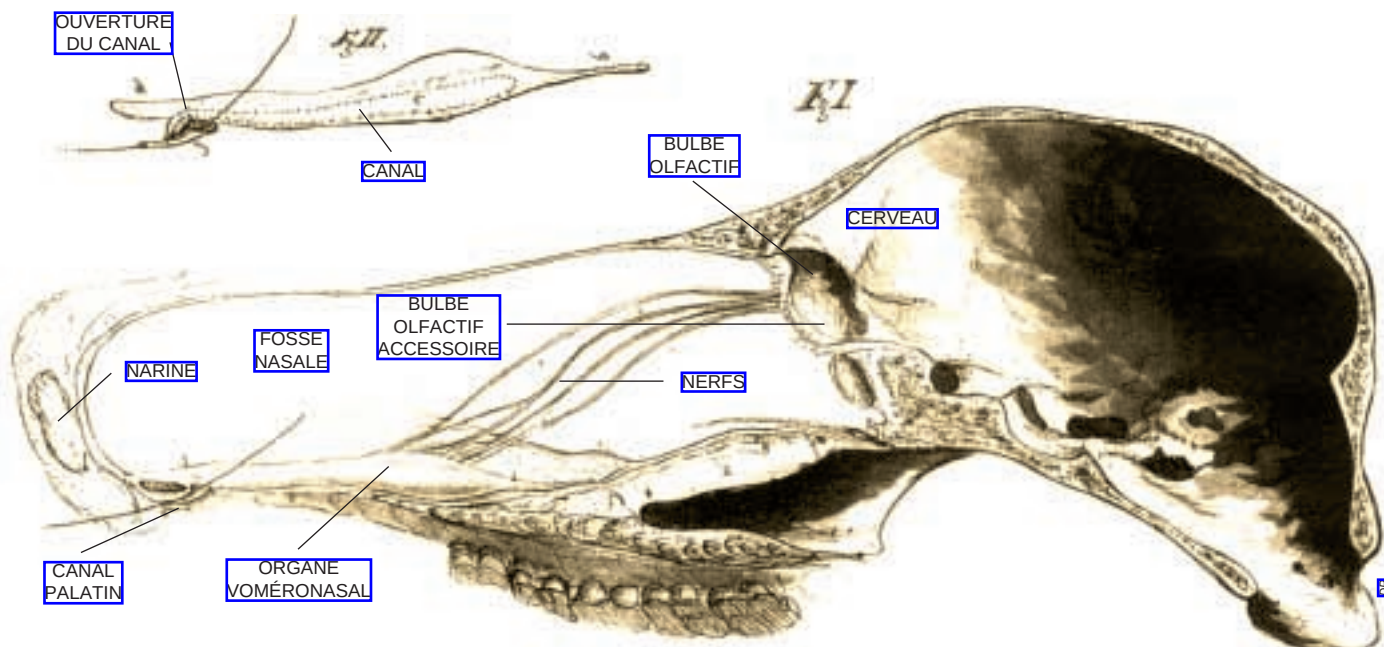


1. LUDVIG JACOBSON découvrit l'organe voméronasal en 1813, à Leipzig. Il notifia sa découverte à Georges Cuvier, qui ne la mentionna pas. L'article original de Jacobson vient d'être retrouvé et traduit.

danois déduit que l'organe pourrait être sécréteur. Cependant, il voit aussi des faisceaux nerveux qui, issus de l'organe, remontent le long de la cloison nasale pour converger sur une petite zone du bulbe olfactif, dans la cavité cérébrale : il suppose que l'organe est plutôt sensoriel. Cette intuition s'est révélée parfaitement exacte.

Il a fallu attendre 140 ans pour comprendre la relation entre l'activation de l'organe voméronasal et certains aspects de la reproduction : en 1953, à Toulouse, le biologiste H. Planel observe que des cochons d'Inde mâles ont un comportement reproducteur amoindri quand on les prive de cet organe. Les femelles opérées ne présentent pas ce creusement des reins, nommé lordose d'accouplement, qui signale aux mâles l'acceptation de la copulation ; elles s'intéressent peu aux mâles.

Plus récemment, les études de la structure et de la fonction de l'organe voméronasal des animaux ont fait mieux connaître le monde des phéromones, ces molécules qui déclenchent des comportements chez les animaux. D'où la question : des phéromones humaines existent-elles ? L'intervention de l'organe voméronasal dans la détection des phéromones animales et sa présence chez l'homme ont fait croire que l'espèce humaine pourrait également être sensible à des molécules stimulant l'organe voméronasal et qui



2. CES DESSINS A LA MAIN DE JACOBSON (*en haut*) montrent la position de l'organe voméronasal dans la cavité nasale du cerf. L'ouverture de l'organe est proche du canal palatin (entre le nez et la bouche), où Jacobson a inséré un fil. Les faisceaux nerveux qui sortent de l'organe voméronasal longent la cloison nasale et se connectent à des cellules du bulbe olfactif accessoire ; de là, l'in-

formation monte vers le cerveau. Dans l'organe isolé montré *en haut* à gauche, Jacobson indique le canal interne de l'organe qui est fermé vers l'arrière (*pointillés*). L'organe voméronasal (*en bas*) est très réduit, voire absent, dans l'espèce humaine. Les neurophysiologistes n'y ont trouvé aucun neurone sensoriel, ni aucune connexion avec une partie olfactive du cerveau.

seraient ces phéromones humaines dont rêvent les fabricants de parfum.

Toutefois, nous le verrons, les études récentes d'anatomie et d'histologie montrent que l'organe voméronasal humain n'est vraisemblablement plus équipé pour la détection de molécules stimulantes. Considérablement réduit, il semble même absent chez certains individus.

D'autre part, si des molécules prélevées dans la sueur ou dans les sécrétions humaines provoquent quelques réactions physiologiques, elles agissent dans des conditions qui n'ont rien à voir avec les conditions d'action des phéromones animales. Aucune découverte d'une phéromone humaine n'ayant été confirmée, l'annonce d'un effet comportemental provoqué par un des composés qui agiraient sur l'organe voméronasal doit être examinée avec beaucoup de circonspection.

Le nez des composés non volatils

Les mammifères communiquent en échangeant de l'information chimique, utilisant des sécrétions (buccales, anales, génitales, cutanées, etc.) qu'ils mêlent à l'urine, à la salive, aux décharges vaginales, aux fèces, etc. La composition des sécrétions dépend de nombreux facteurs, tels que l'espèce, le sexe, la position sociale, la maturité sexuelle, l'état hormonal, l'aptitude à la reproduction...

Ces sécrétions contiennent des molécules volatiles, qui, portées par l'air, parviennent au système olfactif des congénères. Cette communication aérienne à distance joue un rôle clé dans des comportements variés : c'est par l'olfaction que les animaux délimitent leur territoire, repoussent les rivaux potentiels, attirent les partenaires ou envoient des messages d'alerte.

Toutefois l'information volatile n'est qu'une partie de l'information présente dans les sécrétions des congénères. Ces dernières contiennent également de nombreuses molécules trop

peu volatiles pour atteindre l'organe olfactif : stéroïdes (des molécules dérivées du cholestérol et sécrétées par les glandes endocrines), peptides et protéines (des enchaînements d'acides aminés), etc. Ces molécules, qui donnent des indications sur l'état physiologique de l'individu qui les émet, peuvent être captées par l'organe voméronasal d'un congénère. Aujourd'hui, on considère que l'apparition de l'organe voméronasal avec les amphibiens, et sa présence chez tous les serpents et chez les mammifères terrestres, résultent de l'adaptation des organismes à la vie terrestre : les poissons, qui utilisent l'eau comme vecteur de communication chimique, ne possèdent pas d'organe voméronasal, même si leurs cavités nasales assurent une fonction équivalente.

Grâce à sa position très avancée dans la cavité nasale des mammifères, l'organe voméronasal détecte les molécules de communication par un contact direct avec les liquides biologiques qu'il analyse. Quand on approche un hamster mâle d'une femelle apte à la repro-

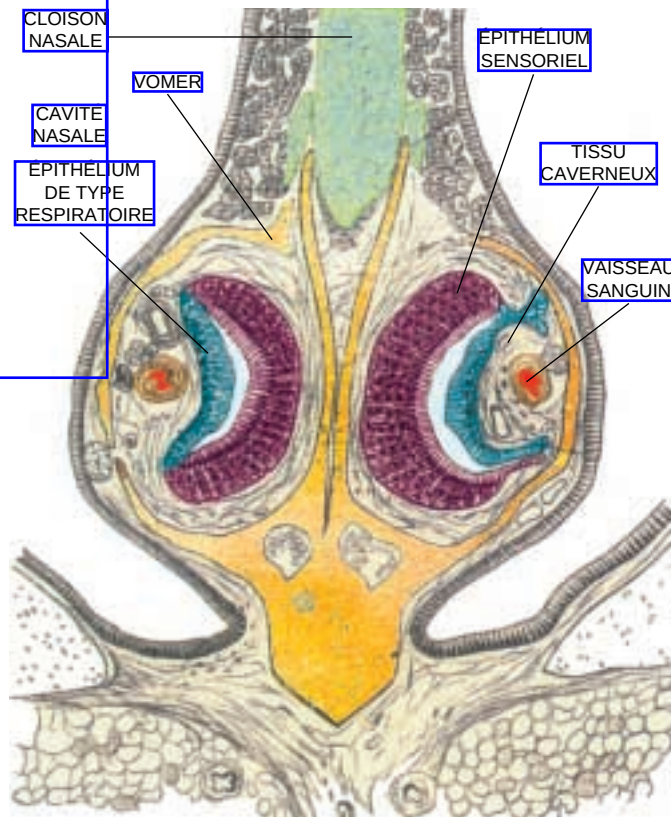
duction, par exemple, celle-ci émet dans ses sécrétions vaginales des composés soufrés volatils, tel le diméthyldisulfure, qui éveillent l'intérêt olfactif du mâle. Celui-ci explore alors la zone génitale de la femelle avec son museau, d'autant plus énergiquement qu'il est jeune et sexuellement inexpérimenté.

Au cours de ces contacts, les sécrétions vaginales atteignent les narines du mâle et, diluées par des sécrétions de glandes localisées dans le vestibule nasal, elles sont transportées jusqu'à l'ouverture des organes voméronasaux. Ceux-ci obtiennent alors une information chimique, et les messages qu'ils envoient au cerveau favorisent le comportement de copulation.

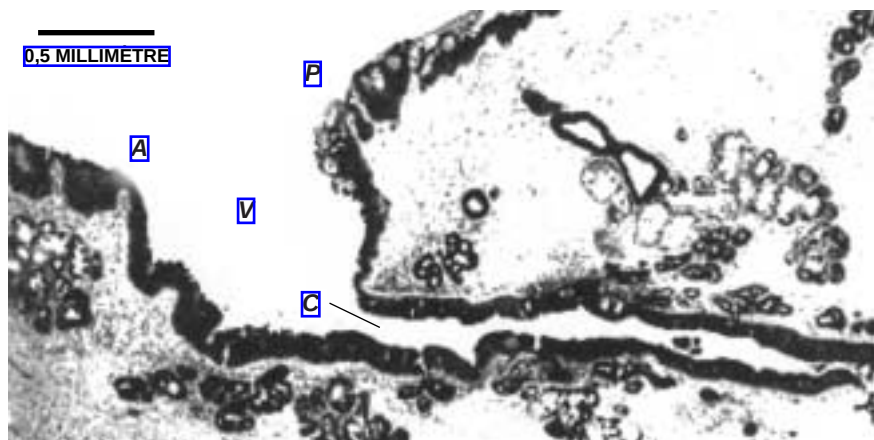
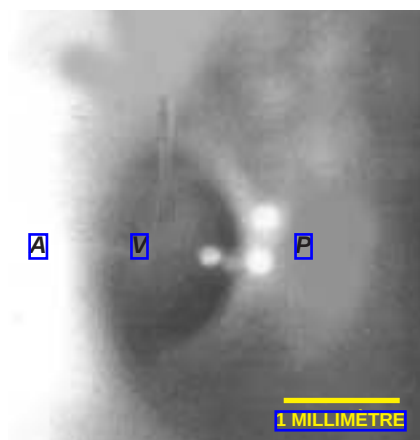
À la fin des années 1980, à l'Institut Monell de Philadelphie, Alan Singer a montré qu'une petite glycoprotéine (une molécule composée d'une partie protéique, enchaînement de 151 acides aminés, et d'un sucre), joliment nommée aphrodisine, est présente dans les sécrétions vaginales des femelles en œstrus et détectée par les organes voméronasaux des mâles.

Cette protéine est synthétisée par le vagin, par la partie basse de l'utérus et par les glandes de Bartholin (les glandes dont les sécrétions lubrifient le vagin). Elle appartient à la famille des lipocalines, c'est-à-dire des protéines qui fixent et transportent de petites molécules. Quelles molécules l'aphrodisine transporte-t-elle ? On l'ignore encore, et l'on a supposé que ces molécules inconnues activeraient les organes voméronasaux, mais A. Singer a observé que la protéine purifiée, probablement sans ligand fixé, active les neurones voméronasaux et provoque l'effet comportemental précédemment décrit.

Les organes voméronasaux permettent ainsi aux animaux d'accéder à l'ensemble des molécules volatiles et non volatiles qui sont présentes dans les sécrétions biologiquement significatives. Chez les rongeurs, ces organes s'ouvrent dans la cavité nasale, en avant du canal palatin antérieur, si bien que les



3. ORGANES VOMERONASaux DE SOURIS. Sur cette coupe transversale, on voit que les organes, situés à la base de la cloison nasale, sont soutenus et entourés par le vomer (l'os du nez qui forme la structure de la cloison nasale). L'épithélium sensoriel occupe la face médiane du canal. L'autre face contient un tissu qui, en gonflant ou en dégonflant, pompe ou refoule le mucus nasal et fait venir des molécules stimulantes au contact des neurones sensoriels.



4. OUVERTURE D'UNE CAVITE VOMERONASALE observée par endoscopie à la surface de la cloison nasale d'un homme adulte (à gauche). Cette ouverture forme une dépression en entonnoir d'environ un millimètre de diamètre. Le bord postérieur (P) et le

bord antérieur (A) du vestibule (V) sont indiqués. La coupe de droite montre que le vestibule se prolonge vers l'arrière par un canal (C) étroit couvert par un épithélium. On n'a pas trouvé de neurones, dans cet épithélium.

molécules stimulantes empruntent la voie nasale pour y arriver. Chez les animaux dont les organes voméronasaux s'ouvrent dans le canal palatin, les molécules stimulantes passent par le nez et aussi par la bouche. Beaucoup de mammifères, tels les chiens léchant l'urine des femelles en chaleur, s'aident de la langue pour se stimuler.

Certains mammifères, notamment les félinés et les ongulés, ont ainsi un comportement typique, lors des rapports socio-sexuels et lors de l'analyse des liquides biologiques émis par les congénères : ils relèvent la tête, plissent le nez, retroussent la lèvre supérieure et cessent momentanément de respirer. Cette grimace, nommée *Flehmen*, facilite l'accès des molécules stimulantes aux organes voméronasaux. Chez le cheval, le *Flehmen* est souvent associé à un hennissement. Chez les ongulés, il accompagne le contact avec l'urine ou avec les sécrétions vaginales. Lors de rencontres hétérosexuelles, seul le chat mâle montre ce comportement après contact du museau avec les sécrétions à analyser. En revanche, les chattes présentent parfois ce comportement lorsqu'elles analysent un objet marqué par un mâle en l'absence de ce dernier. Le comportement de *Flehmen* dépend des espèces, du sexe et du contexte.

Chez les serpents et chez divers reptiles (tels les dragons de Komodo, voir *Pour la Science*, mai 1999), les organes voméronasaux, beaucoup plus développés que les organes olfactifs, semblent utilisés pour la chasse. La langue assure le transport des molécules stimulantes vers l'ouverture des organes, dans la bouche.

L'éléphant est l'animal dont l'organe voméronasal est le plus gros : 25 centimètres de long et 4 centimètres de diamètre. Cet organe joue un rôle prépondérant dans la communication chimique rapprochée de ces animaux : l'éléphant d'Asie mâle trempe sa trompe dans l'urine de femelles en phase pré-ovulatoire, puis il transporte ce liquide vers les ouvertures buccales de ses organes voméronasaux. Son comportement de *Flehmen* répété plusieurs fois précède l'éveil sexuel, l'érection et la copulation.

Un organe actif

Comment l'organe voméronasal fonctionne-t-il ? Les explications anatomiques ont d'abord été complétées par des explorations physiologiques et, plus récemment, par des études de biologie cellulaire. En contact avec la partie postérieure et inférieure de la cloison des cavités nasales, les organes voméronasaux reposent sur ses deux prolongements antérieurs. Une lamelle osseuse ou cartilagineuse enveloppe le côté latéral de l'organe, l'isolant de la cavité nasale et le maintenant dans une capsule rigide.

En coupe transversale (voir la figure 3), le canal de l'organe voméronasal est en forme de croissant. Les neurones sensoriels sont exclusivement dans l'épithélium qui forme la face interne, concave du canal. La face latérale convexe n'est pas sensorielle ; elle est couverte de cellules ciliées, analogues à celles du système respiratoire, qui brassent le mucus.

Le canal est un cul-de-sac fermé vers l'arrière et son ouverture antérieure

est étroite : comment le mucus externe et les molécules stimulantes qu'il contient sont-ils entraînés à l'intérieur du canal ? En 1949, le physiologiste M. Hamlin a découvert un système de pompage, assuré par une variation de la turgescence du tissu caverneux qui se trouve sous l'épithélium non sensoriel du canal. Ce tissu caverneux est traversé par une grosse veine. Comme l'organe est maintenu rigidement sur sa périphérie, la contraction du tissu caverneux dilate le canal interne et aspire les molécules stimulantes pendant plusieurs secondes. Puis, la vasodilatation du tissu comprime le canal et expulse le liquide analysé.

La détection par l'organe voméronasal est donc un mécanisme actif. Selon Michael Meredith, de l'Université de Floride, la pompe s'active, chez des hamsters en captivité, lors de toute situation nouvelle : présence d'un congénère, ouverture de la cage, etc.

Les neurones sensoriels de l'organe voméronasal assurent la double fonction de détection des molécules stimulantes et de transmission de l'information nerveuse au cerveau. Leurs axones (l'axone est le prolongement des neurones, qui établit un contact avec d'autres neurones qui reçoivent l'information), très longs, se regroupent en plusieurs rameaux nerveux, qui courent le long de la cloison nasale. Ils passent la lame criblée, qui sépare la cavité nasale du cerveau, et établissent des contacts synaptiques avec les neurones d'une zone du bulbe olfactif, nommée bulbe olfactif accessoire en raison de sa taille (pas de sa fonction!).

Comme les neurones olfactifs, les neurones voméronasaux proviennent

de la différenciation du tissu olfactif embryonnaire. Comme les neurones olfactifs, encore, les neurones voméronasaux possèdent une longue dendrite (une ramification qui porte les zones recevant l'information), dont l'extrémité sort dans le canal voméronasal, à la surface de l'épithélium (voir la figure 6). Cependant cette extrémité porte de nombreuses microvillosités, tandis que les neurones olfactifs, eux, ont des prolongements ciliaires. Les neurones voméronasaux ont également, à la base de leur dendrite, un réticulum endoplasmique très développé, dont la fonction reste mystérieuse (le réticulum endoplasmique est un réseau de citernes intracellulaires chargé, notamment, d'exporter dans la cellule les protéines nouvellement synthétisées).

La physiologie des deux types de neurones diffère également. Selon les études de biologie moléculaire effectuées depuis une dizaine d'années par plusieurs groupes (tels ceux de Catherine Dulac, Richard Axel et Linda Buck, à Harvard, ou de N. Ryba, à l'Université de Bethesda), les neurones voméronasaux comportent, dans leur membrane, des protéines spécifiques qui semblent être les récepteurs des molécules stimulantes.

Ces protéines réceptrices putatives diffèrent des protéines réceptrices des neurones olfactifs. Elles sont codées par des gènes distincts, moins nombreux que les gènes qui codent les protéines réceptrices olfactives. Les neurones voméronasaux et les neurones olfactifs procèdent donc à des lectures différentes du monde chimique environnant.

Le mécanisme de transduction voméronasale, c'est-à-dire la suite des événements moléculaires et électriques qui mènent de la protéine réceptrice activée à l'émission des impulsions nerveuses, diffère également du mécanisme de transduction olfactive.

Organe hétérogène, activation spécifique

On a longtemps pensé que la population des neurones sensoriels de l'organe voméronasal était homogène. En 1995, Mimi Halpern, de l'Université de Brooklyn, L. Buck et K. Mori, de l'Université d'Osaka, ont montré que cette hypothèse était fautive : une zone apicale de l'épithélium sensoriel (proches du lumen) est composée de neurones

différents de ceux de la zone basale (en profondeur). Les neurones de la zone apicale de l'épithélium, à courte dendrite, contiennent des protéines réceptrices dont le repliement amène sept segments dans la membrane cellulaire (type V1R) et envoient l'information nerveuse vers la partie antérieure du bulbe olfactif accessoire. En revanche, des gènes codant des protéines réceptrices V2R s'expriment surtout dans les neurones de la zone basale, qui transmettent l'information à la partie postérieure du bulbe olfactif accessoire.

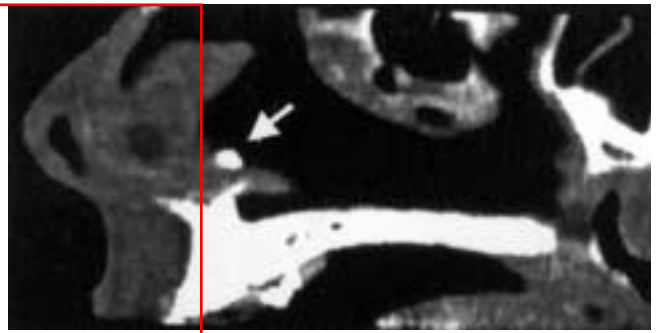
Dans les deux parties de l'organe, les neurones sont d'excellents détecteurs, au moins aussi sensibles que les cellules réceptrices de l'olfaction.

Le système voméronasal se distingue également du système olfactif par les zones cérébrales qui traitent l'information qu'il envoie. La séparation que l'on observe à la périphérie et dans les bulbes olfactifs se poursuit pour les relais cérébraux centraux. Chez le hamster, par exemple, l'information olfactive provenant du bulbe olfactif se dirige non seulement vers les zones sous-corticales, par exemple les régions «olfactives» de l'amygdale, mais également vers le cortex. L'information voméronasale, en provenance du bulbe olfactif accessoire, semble confinée aux zones sous-corticales (il n'existe pas de perception de l'information voméronasale).

Les phéromones de mammifères

Chez de nombreux mammifères, les signaux chimiques émis dans les liquides biologiques se comportent comme des «phéromones», qui déclenchent, favorisent ou modulent certains aspects de la physiologie de la reproduction.

Le terme «phéromone» a été proposé par les biologistes Peter Karlson et Adolphe Butenandt en 1959 : le mot est composé du mot grec *pherein*, transport, et *hormon*, excitation : une phéromone est une substance sécrétée par un individu et qui déclenche chez un congé-



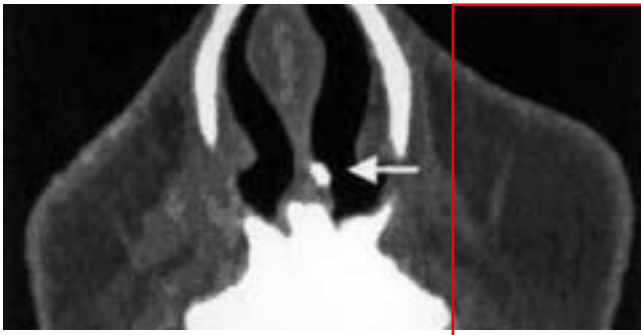
5. ON A CHERCHÉ L'ORGANE VOMERONASAL dans la cloison nasale humaine par tomographie aux rayons X. La cavité voméronasale apparaît comme une tache blanche après injection d'un produit de contraste. Dans l'image de gauche, le plan d'observation frôle la cloison nasale, et la narine est visible à gauche. La structure blanche allongée sous

nère une réaction spécifique, tels un comportement, un processus de développement, une sécrétion hormonale ou une autre réaction physiologique.

Ainsi l'activation de l'organe voméronasal par les stimulus naturels augmente la libération dans le sang de l'hormone lutéotrope LH (libérée par l'hypothalamus) et de la testostérone. L'augmentation de la concentration sanguine en LH fait probablement intervenir les cellules de l'hypothalamus sécrétrices de l'hormone LHRH (encore nommée GnRH), car cette hormone, libérée par l'hypothalamus, agit sur l'hypophyse pour régler la sécrétion des hormones hypophysaires gonadotropes qui sont primordiales pour le bon développement des gonades (les glandes sexuelles) et la sécrétion d'hormones stéroïdiennes.

Cependant, l'information qui passe par l'organe voméronasal ne provoque pas d'effet par tout ou rien. Par exemple, l'ablation de l'organe chez les hamsters n'abolit pas complètement le comportement reproducteur. Ce sont les jeunes animaux sans expérience sexuelle préalable qui sont les plus affectés.

Chez la souris, l'organe voméronasal assure clairement une détection remarquablement précise des phéromones de la reproduction : en 1959, M. Bruce observa un blocage de la gestation chez une souris mise, dans les quatre jours qui suivirent la copulation, en présence des phéromones d'un mâle adulte autre que le mâle qui l'avait fécondée. Particulièrement étudié par le groupe de Barry Keverne, à l'Université de Cambridge, ce phénomène résulterait d'une modification de l'activité des cellules «mitrales» du bulbe olfactif accessoire (les cellules mitrales sont les cellules auxquelles sont connectées les neurones voméronasaux).



cette cavité correspond au palais. A droite, le plan d'observation est perpendiculaire à la cloison nasale, dont toute la hauteur est visible; la cavité voméronasale se situe près du plancher de la cavité nasale. Ces images ont été réalisées en collaboration avec Corinne Eloit, Jean-Lou Bensimon et Michel Wassef, de l'Hôpital Lariboisière, à Paris.

Avant la copulation, les cellules mitrales activées par les phéromones du mâle transmettent l'information à l'amygdale voméronasale (une structure dans le cerveau). Puis, au moment de la copulation et pendant les heures qui suivent, une molécule neuromédiateur (la noradrénaline) libérée dans le bulbe olfactif accessoire augmente l'activité des cellules inhibitrices des cellules mitrales.

Ainsi les cellules mitrales qui ont déjà été activées par les phéromones du mâle géniteur ne transmettent plus l'information aux centres cérébraux : le message provenant des substances de ce mâle est bloqué localement. Dans certaines conditions expérimentales, cette empreinte provoquée dans le réseau de neurones du bulbe olfactif accessoire par l'information phéromonale du mâle persiste une trentaine de jours.

En revanche, quand un mâle d'une autre lignée apparaît, ses phéromones sont différentes. Elles stimulent certaines cellules mitrales qui n'ont pas été inhibées, de sorte que ces dernières activent des neurones de l'hypothalamus qui libèrent un autre neuromédiateur, la dopamine. Cette dernière agit sur l'hypophyse pour réduire sa sécrétion de prolactine, ce qui réduit la sécrétion de progestérone par le corps jaune ovarien et provoque l'arrêt de la gestation.

Cette description montre que l'activité du système voméronasal déclenche parfois des bouleversements neuroendocriniens; elle montre aussi que ce système sensoriel permet une analyse fine de l'information individuelle au sein d'une espèce. La nature et la diversité des phéromones permettant une telle distinction restent inconnues.

Les phéromones agissent également sur le développement des animaux. Par

exemple, on a découvert en 1969 et réexploré ces dernières années comment des phéromones de souris qui sont libérées par des mâles reproducteurs accélèrent la puberté des jeunes de l'espèce. On a finalement identifié que le phénomène est dû à la présence, dans l'urine des mâles, de protéines qui appartiennent au «complexe protéique urinaire majeur» et qui sont synthétisées dans le foie. Sécrétées en grande quantité (plusieurs milligrammes par jour) dans l'urine des mâles, ces «protéines MUP» se fixent à des molécules plus petites qui peuvent activer certains neurones de l'organe voméronasal de la souris.

Cependant, comme l'a montré récemment Carla Mucignat-Caretta, de l'Université de Parme, l'addition de ces petites molécules à de l'urine de jeunes mâles impubères (qui contient peu de protéines MUP) ne provoque pas l'effet phéromonal attendu. Il ne provoque notamment pas d'accroissement rapide de la masse de l'utérus chez les jeunes femelles. En revanche, l'addition dans cette urine juvénile de protéines MUP sans ligands fixés ou, mieux encore, d'un hexapeptide (une molécule formée par l'enchaînement de six acides aminés) très semblable à une extrémité des protéines MUP restaure l'activité phéromonale.

La détermination des molécules stimulant l'organe voméronasal commence seulement, mais il est intéressant de constater que, dans tous les exemples connus, des protéines porteuses de petites molécules jouent un rôle clé. L'avenir nous dira quelle est la part d'information portée par les protéines et par les petits ligands. Leur association peut être fortuite comme elle peut être nécessaire pour déclencher l'effet biologique.

Signalons également que, dans certaines circonstances, l'organe voméronasal n'est pas nécessaire pour détecter des phéromones. Par exemple, le ver rat sexuellement actif émet dans sa salive une grande quantité d'une molécule nommée androsténone. La truie en œstrus est attirée par cette phéromone

qui facilite une posture réceptive en réaction à une pression sur le dos. À l'Université Tufts, en 1995, Katherine Dories a découvert que l'obturation des organes voméronasaux de la truie n'avait pas d'effet sur ce comportement : autrement dit, l'organe voméronasal n'est pas l'unique système de détection des phéromones. L'organe olfactif lui-même pourrait assurer ce rôle, ou bien l'organe septal que l'on trouve dans la cavité nasale de beaucoup de mammifères (cet organe, découvert en 1943 par le biologiste italien Rodolfo Masera, est un petit îlot de neurones localisé sur la partie basse de la cloison nasale ; à part le fait que ces neurones ressemblent morphologiquement aux neurones olfactifs, on ne sait à peu près rien de leur physiologie).

Un vestige humain

On sait aujourd'hui que les organes voméronasaux apparaissent chez les individus de notre espèce pendant le développement embryonnaire. Ils sont clairement visibles comme deux organes tubulaires, à la base de la cloison nasale, entre 12 et 23 semaines de gestation. Selon N. Boehm et B. Gasser, de l'Université de médecine de Strasbourg, ils contiennent alors des neurones. De surcroît, à 22 semaines, les fibres du nerf voméronasal sont connectées au bulbe olfactif accessoire.

Comme chez les autres mammifères, le contact du nerf voméronasal avec le cerveau en formation est important pour la migration des cellules sécrétrices de l'hormone LHRH. Ces cellules apparaissent dans l'organe voméronasal après 8 à 12 semaines de gestation ; on les trouve jusqu'à 19 semaines le long du nerf voméronasal et du nerf terminal : elles empruntent ce trajet pour atteindre diverses régions du cerveau, principalement l'hypothalamus. Puis, à partir de l'hypothalamus, ces cellules émettent la LHRH dans un circuit sanguin qui amène l'hormone à l'hypophyse ; l'action de l'hormone règle la sécrétion, par l'hypophyse, de l'hormone LH et de l'hormone folliculo-stimulante (FSH), qui déterminent le développement des organes sexuels et leur fonctionnement. L'absence de migration des cellules sécrétrices de LHRH perturbe le développement du système reproducteur et, dans l'espèce humaine, détermine le syndrome de Kallmann- De Morsier, souvent associé à un défaut de perception olfactive. Le

développement du système voméronasal semble donc crucial, chez les embryons de tous les mammifères, même les embryons humains, pour la mise en place des fonctions neuroendocriniennes.

Cependant, chez l'homme, l'organe voméronasal semble régresser après avoir rempli ce rôle. Cette idée, déjà proposée par Jacobson en 1813, puis par M. Humphrey en 1940, semble bien établie, mais, depuis les avancées de la physiologie de l'olfaction, dans les années 1990, certains biologistes ont prétendu que l'organe voméronasal était fonctionnel chez l'homme adulte. On doit donc réexaminer précisément la question : que reste-t-il de l'organe voméronasal chez l'homme adulte ?

Les cavités voméronasales sont visibles : elles avaient d'ailleurs été observées par le médecin hollandais Frederic Ruysch en 1703, avant d'être décrites en 1809 par Samuel Thomas von Soemmerring sur des cadavres. En 1877, le médecin allemand Anton Kölliker indique très précisément où trouver ces cavités sur un cadavre : de 6 à 13 millimètres au-dessus du plancher de la cavité nasale, environ 21 à 29 millimètres

en arrière des narines. Le diamètre de l'ouverture, sur la cloison nasale est d'environ un millimètre, et la longueur de la cavité est comprise entre deux et sept millimètres. En 1891, le physiologiste français M. Potiquet signale la présence de l'ouverture à la surface de la cloison nasale dans environ un quart des cavités nasales, chez des individus vivants.

Les observations actuelles avec un endoscope n'augmentent guère cette proportion : selon Corinne Eloït, de l'Hôpital Lariboisière, l'ouverture est facile à observer (*voir la figure 5*) dans 25 à 30 pour cent des cavités nasales seulement. Chez certaines personnes, elle n'est visible que d'un côté de la cloison. Chez d'autres, rien n'est visible de part et d'autre, mais on ignore encore si cette inexistence apparente résulte ou non d'une absence des cavités voméronasales.

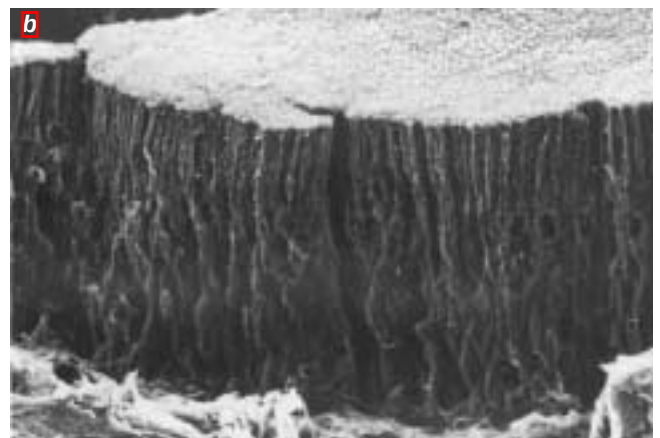
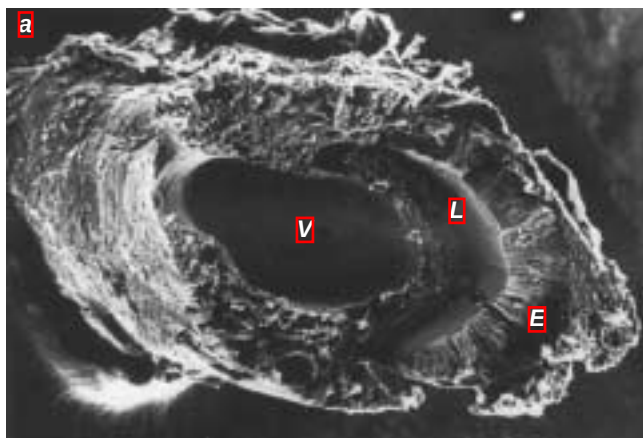
Lorsqu'un produit opacifiant est injecté dans une ouverture visible, un scanner des cavités nasales permet une localisation précise dans la cloison nasale. Autrement dit, on ne doute pas que les cavités voméronasales existent, au moins chez certains adultes. Sont-elles toutefois fonctionnelles ?

La simplicité de l'organe chez l'homme adulte est flagrante : par exemple, aucun cartilage n'entoure la face latérale de l'organe, et aucun gros vaisseau sanguin ni aucun tissu érectile n'entoure le canal. L'organe voméronasal de l'homme adulte ne comporte pas l'équipement de pompage du mucus externe vers le canal. Comment détecterait-il alors des molécules stimulantes, si elles existent ?

D'autre part, nous avons vu que, chez tous les mammifères, l'organe voméronasal se comporte comme un analyseur qui détecte des molécules stimulantes et transmet l'information au cerveau. La perception se fonde sur la présence de neurones dans l'épithélium voméronasal. Ces neurones existent-ils chez l'homme adulte ?

Beaucoup d'études ont répondu négativement à cette question, et une seule équipe avait peut-être observé de tels neurones, mais en nombre si faible, et avec une technique utilisée si ambiguë, qu'il était bien difficile de leur supposer un rôle sensoriel.

En 1996, avec notre collègue Michel Wassef, de l'Hôpital Lariboisière, nous avons réexaminé cette question à l'aide



6. L'ORGANE VOMERONASAL DU RAT est observé en microscopie électronique à balayage. Sur la coupe transversale de l'organe (a), on voit l'ouverture du canal, nommée lumen (L), l'épithélium sensoriel (E) et un gros vaisseau sanguin (V) de 0,1 millimètre de diamètre environ. Un agrandissement de l'épithélium sensoriel

(b) fait apparaître les neurones récepteurs. Chaque neurone (c) comporte un long axone (A), qui monte vers le bulbe olfactif accessoire et une dendrite (D) terminée par une vésicule (V). Celle-ci (d) porte de nombreuses microvillosités, qui portent des molécules réceptrices des phéromones.

d'anticorps, c'est-à-dire de molécules immunitaires qui se lient à des molécules spécifiques. Nos cibles étaient des protéines exprimées par les neurones voméronasaux de divers mammifères et des protéines exprimées par les neurones olfactifs de mammifères, y compris l'homme. Aucune cible n'a été trouvée dans l'épithélium voméronasal de l'homme adulte. De surcroît, quand nous avons cherché les cellules gliales (des cellules de soutien des neurones), sous l'épithélium voméronasal, nous n'avons trouvé aucun faisceau nerveux.

Ces études confortent celles de N. Boehm et B. Gasser qui avaient observé que les neurones disparaissent de l'organe voméronasal de nourrisson dès la 36^e semaine de gestation. Elles corroborent aussi celles de I. Kjaer et B. Fischer-Hansen, à Copenhague, qui ont signalé une nette régression de l'organe voméronasal et une disparition du bulbe olfactif accessoire vers la fin de la vie utérine. Rien ne semble donc indiquer l'existence de la structure sur laquelle converge l'information voméronasale chez tous les autres mammifères. Enfin, Esmail Meisami et Junwar Bahtnagar, à l'Université de l'Illinois, ont observé que l'organe voméronasal et le bulbe olfactif accessoire sont absents chez les grands singes et les singes adultes de l'Ancien Monde, tandis qu'ils sont présents chez les singes adultes du Nouveau Monde.

Des phéromones humaines ?

Malgré tous ces résultats négatifs, bien des biologistes non spécialistes de l'organe voméronasal écrivent encore que l'organe de l'homme adulte est fonctionnel. La plupart se réfèrent aux résultats d'une équipe de recherche qui avait enregistré un signal électrique à la surface de l'ouverture de la cavité, en lui appliquant des stéroïdes. Ces stimulations n'engendrent pas de perception particulière chez les sujets, mais les physiologistes qui ont fait les expériences ont détecté des changements de la résistance électrique cutanée ou de la température, ainsi que des changements de la concentration sanguine en hormone LH, lors de très longues stimulations (plusieurs heures). On ignore les mécanismes par lesquels les stéroïdes exercent ces effets, mais le signal électrique, notamment, ne semble pas correspondre à la transmission d'une information au cerveau.

Serpent de mer resurgissant périodiquement, l'existence de phéromones humaines est souvent associée à l'organe voméronasal, et des associations hâtives de la sexualité aux phéromones sont abusivement utilisées à des fins commerciales. Pourtant très peu d'informations confortent cette association. Dans les années 1970, par exemple, on a demandé à des hommes et à des femmes d'estimer l'intensité odorante et le plaisir ressenti quand on leur faisait sentir des échantillons de sécrétions vaginales de quatre femmes prélevés durant 15 cycles. L'odeur des sécrétions vaginales varie considérablement selon les femmes et, aussi, selon les cycles successifs, pour une même donneuse, et aucun attrait pour ces odeurs n'a été observé.

Dans les années 1980, une autre équipe a étudié l'effet de l'androsténol, un composé que l'on trouve sous les aisselles masculines et qui est une phéromone sexuelle du porc. Le produit fut appliqué sur la lèvre supérieure de femmes volontaires, dont on étudiait le comportement : celui des femmes mises au contact du composé ne fut pas différent de celui de femmes qui n'avaient pas été exposées au produit ; notamment, les applications ne provoquèrent aucun éveil sexuel. En revanche, des hommes semblèrent éviter des fauteuils imprégnés de ce composé. Les mêmes conclusions ont été tirées d'expériences avec des acides gras à courtes chaînes (ces molécules sont des hydrocarbures portant un groupe acide carboxylique -COOH) que l'on trouve dans les sécrétions vaginales et qui attirent sexuellement les mâles des singes rhésus.

Toutefois, en 1971, la biologiste américaine Martha McClintock a signalé que l'application d'extraits axillaires de femmes, sous le nez d'autres femmes, entraînait une légère synchronisation des cycles menstruels (les extraits étaient déposés sur des tampons qui étaient appliqués pendant plusieurs heures). Comme le protocole expérimental avait été critiqué et que d'autres études, notamment avec des basketteuses, n'avaient pas retrouvé les résultats annoncés, M. McClintock et sa collègue K. Stern ont repris cette étude en 1998 : cette fois, les physiologistes ont observé que des composés sans odeur, présents sous les aisselles de femmes en fin de phase folliculaire (avant l'ovulation), avancent le pic de LH chez les femmes exposées (ce pic correspond à l'ovula-

tion) et raccourcissent leurs cycles menstruels. Quand les sécrétions axillaires sont prélevées au moment de l'ovulation, l'effet est inverse : le pic de LH est retardé, et le cycle des femmes stimulées est allongé. Notons que ces études n'invoquent aucun rôle de l'organe voméronasal et que le mode d'action de ces substances, qui sont appliquées sur la peau pendant de longues périodes, n'est pas connu. Il n'est pas impossible qu'un effet phéromonal fasse intervenir le système olfactif, le nerf terminal (qui innerve la cavité nasale de tous les mammifères et dont ignore complètement la physiologie) ou encore l'organe septal de Maséra (un petit îlot de récepteurs olfactifs, en position avancée dans le nez), s'il existe chez l'homme. Enfin, de nombreux facteurs physiologiques régulent le comportement sexuel et social de l'espèce humaine. Penser aujourd'hui que l'on pourrait trouver un « Viagra » olfactif relève plus des fantasmes et de la pensée magique que de la réalité scientifique.

En découvrant l'organe voméronasal, Jacobson a commencé un travail que les neurophysiologistes n'ont pas achevé, loin s'en faut. Si cet organe détecte effectivement des composés sécrétés par des congénères, son activation déclenche des effets encore très mal connus. L'information voméronasale semble, chez les rongeurs, particulièrement importante dans les premières relations sexuelles. En est-il de même pour les autres mammifères, chez qui on ne sait à peu près rien sur le rôle physiologique de cet organe ?

Didier TROTIER est chercheur au Laboratoire de neurobiologie sensorielle, à l'ENSIA (Massy), et au Laboratoire de physiologie oro-faciale de l'Université Paris 7. Kjell DØVING est professeur de physiologie au Département de biologie de l'Université d'Oslo.

D. TROTIER et K.B. DØVING, *Anatomical Description of a New Organ in the Nose of Domesticated Animals*, by Ludvig Jacobson (1813), in *Chemical Senses*, vol. 23, pp. 743-754, 1998.

K.B. DØVING et D. TROTIER, *Structure and Function of the Vomeronasal Organ*, in *The Journal of Experimental Biology*, vol. 201, pp. 2913-2925, 1998.

Symposium on Pheromone Communication and Interaction with Hormones. Olfaction and Taste XII, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 855, pp. 333-392, 1998.



L'homme-oiseau

ROLAND LEHOUCQ

L'homme est trop lourd pour voler facilement : seuls les sportifs de haut niveau équipés d'appareils ultralégers y parviennent.

Dédale et son fils Icare ont voulu voler, sans grand succès. Dédale voulait s'échapper du labyrinthe du roi Minos en se fabriquant des ailes avec des plumes collées à la cire. Le vol d'Icare finit tragiquement : Icare s'étant trop approché du Soleil, la cire fondit, Icare s'abîma en mer et se noya. Léonard de Vinci imagina également de fabuleuses, mais inefficaces, machines à voler. Il est bien difficile de voler : le rêve d'Icare et de Léonard de Vinci est-il réalisable ?

Le vol comporte deux étapes : le décollage et la sustentation en vol. Pour décoller, il faut que la force ascensionnelle soit supérieure au poids ; pour le maintien en l'air, il faut, en plus, vaincre les frottements qui diminuent la vitesse, donc la force de sustentation. Nous verrons comment ces contraintes imposent une masse limite aux oiseaux, puis à quelles conditions un être humain peut voler, mû par sa seule force musculaire.

VAINCRE LE POIDS

Chacun a déjà fait l'expérience de tendre une main par la fenêtre d'une voiture roulant à vive allure. La main est repoussée par une force d'autant plus grande que la main est redressée : horizontale, elle n'est presque pas repoussée, tandis que, verticale, la main subit le vent de plein fouet, et la force vers l'arrière est considérable. Plus la voiture roule rapidement, plus le vent relatif, et la force sur la main, sont importants.

Sur une aile, la force, proportionnelle à la surface, est encore supérieure. Cette

force est aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Pourquoi ? Parce que la force exercée par les molécules qui rebondissent sur l'aile est proportionnelle à leur vitesse et au nombre de molécules frappant la surface. Ce nombre est, lui aussi, proportionnel à la vitesse ; donc, au total, la force «de portance» dépend du carré de la vitesse relative de l'air.

Dernier point, la force dépend du coefficient de portance, déterminé par la forme de l'aile et par l'angle d'attaque : sa valeur typique est de l'ordre de 0,3.

Il est ainsi plus facile de décoller face au vent : à la vitesse de l'avion s'ajoute la vitesse du vent, et la force résultant du vent relatif sur les ailes est plus forte. Pour le vol à altitude constante, il suffit que le déplacement soit suffisamment rapide par rapport à l'air pour que la portance compense le poids.

Nous avons tous vu, sur les films des premiers essais de vol, les sauts de puce des hommes-oiseaux qui battaient des ailes. Ils n'avaient pas saisi que, si le mouvement descendant des ailes les soulevait, le mouvement ascendant des ailes les plaquait au sol. Les oiseaux volent parce qu'ils donnent aux ailes un mouvement de vrille : l'angle, lors de la montée de l'aile, n'est pas équivalent à celui de la descente. Subtil.

La surface des ailes d'un oiseau est approximativement proportionnelle au carré de sa taille, alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de sa taille. Tous calculs (simples) faits, la vitesse pour laquelle la portance est égale au poids est proportionnelle à la

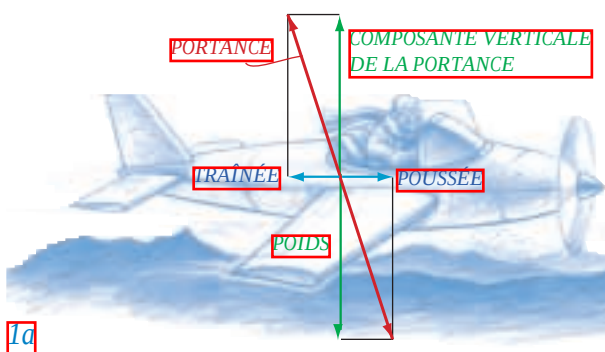
racine carrée de la taille. Les grands oiseaux doivent voler plus vite que les petits pour se maintenir en l'air et doivent aussi courir plus vite pour décoller. De très grands oiseaux, tel l'albatros, dont l'envergure est de 2,5 mètres pour une masse de dix kilogrammes, ne peuvent décoller du sol et doivent se lancer d'une hauteur.

Finalement, un avion n'est rien d'autre qu'une voiture rapide à laquelle on a adjoint de grandes ailes légèrement inclinées ; encore faut-il penser à la propulsion après le décollage...

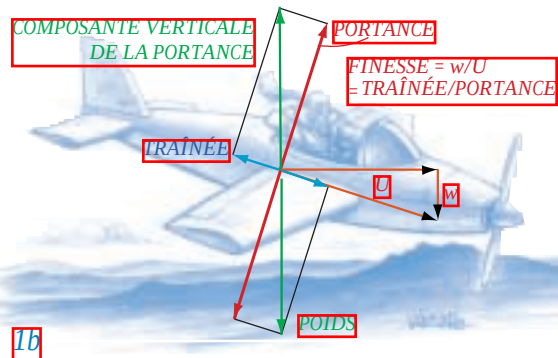
LE VOL HORIZONTAL

Après avoir vaincu le poids, l'objet volant s'élève, mais peut-il pour autant se maintenir en vol ? En ajustant l'angle de son aile par rapport au vent relatif, il peut monter ou descendre, à condition que sa vitesse ne diminue pas trop. Le vol horizontal nécessite de vaincre les frottements aérodynamiques, ou traînée, de manière à conserver la vitesse, donc la portance (voir la figure 1a). Comme la force de portance, la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse relative de l'air. La puissance nécessaire à la sustentation, égale au produit de la traînée par la vitesse, varie donc comme le cube de cette vitesse. Le vol rapide est donc énergétiquement coûteux.

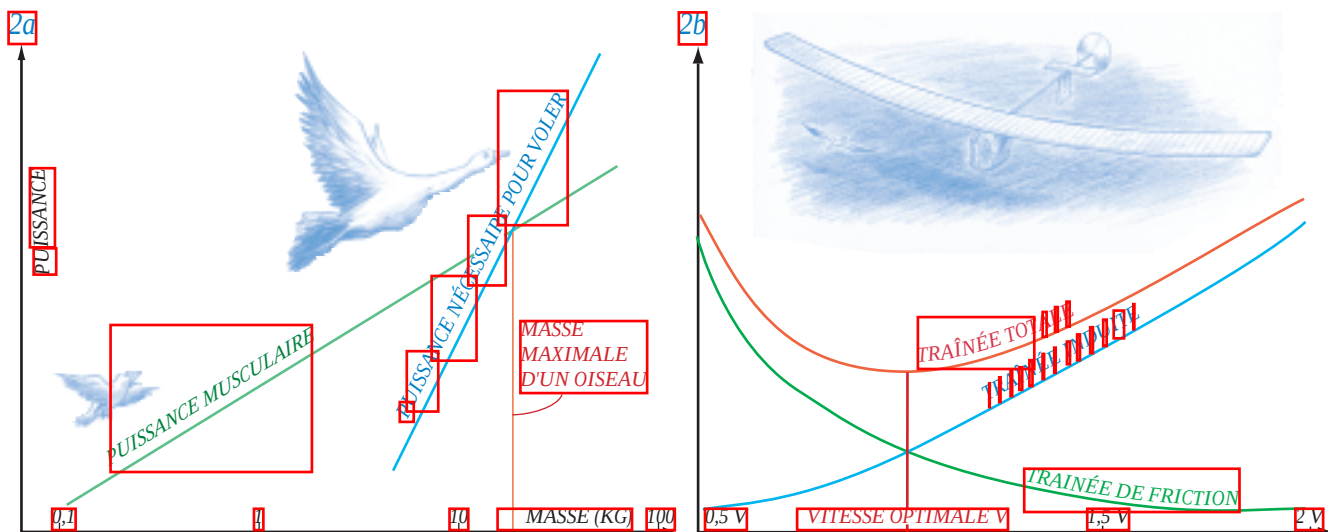
Revenons à l'oiseau. La surface de ses ailes variant comme le carré de sa taille, sa vitesse comme la racine carrée de la taille et la masse comme le cube de la taille, la puissance à dépenser pour contrebalancer l'effet des frottements



1a



1b



varie comme la masse à la puissance 7/6. Cette puissance doit être fournie par les muscles de l'oiseau ; or cette puissance musculaire varie comme la masse à la puissance 3/4, plus lentement que la puissance à dépenser.

Un oiseau aura donc une taille maximale, déterminée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol (voir la figure 2a). Les oiseaux ont effectivement une masse limite (environ 15 kilogrammes), et les gros oiseaux, tels le condor et l'albatros, sont contraints d'économiser leur énergie et préfèrent planer, alors que pigeons et moineaux n'hésitent pas à battre des ailes.

La traînée totale, qui freine la progression, est la somme de deux termes : d'une part, les frottements aérodynamiques, dus au contact de l'air visqueux sur la surface de l'aile, et, d'autre part, la traînée induite par le mouvement, qui résulte de la modification de la quantité de mouvement de l'air qui rencontre l'aile. La traînée induite est la composante horizontale de la portance, alors que sa composante verticale doit compenser le poids (la portance est toujours perpendiculaire à l'aile).

Lorsque l'on augmente la vitesse de l'avion, la portance totale augmente. Sans action sur l'inclinaison ou la forme de l'aile, qui modifie le coefficient de portance, l'avion monterait. Afin de se maintenir en vol horizontal, le pilote agit sur les ailes, de manière que la portance totale diminue. Comme la composante verticale de la portance doit être constante (sinon l'avion monterait ou descendrait), la portance totale se rapproche de la verticale et sa composante horizontale, donc la traînée induite, diminue. Proportionnelle à l'inverse du carré de la vitesse par rapport à l'air, la traînée induite croît démesurément à basse vitesse, rendant prohibitif le coût énergétique du vol lent. Ainsi, tout oiseau et toute machine volante ont

une vitesse de vol énergétiquement optimale (voir la figure 2b). La traînée induite peut être diminuée en utilisant des ailes très effilées, c'est-à-dire dont le rapport d'aspect, le quotient de la longueur de l'aile sur sa largeur, est grand.

VOLER EN PLANANT

Si l'énergie nécessaire à la propulsion n'est pas fournie, elle sera prélevée à l'énergie potentielle gravitationnelle et, comme pour un cycliste en roue libre dans une descente, l'altitude diminuera : un avion dont le moteur s'arrête descend inéluctablement. Pour planer longtemps, les grands oiseaux doivent tirer parti des mouvements atmosphériques ascendants qui prennent naissance près des crêtes des montagnes ou qui résultent des montées d'air chaud dues à la poussée d'Archimède.

Le rapport de la portance et de la traînée est la finesse, qui détermine la qualité d'un planeur : les ailes de grande finesse sont les plus économes énergétiquement. Une finesse de dix, typique de celle d'un oiseau de taille moyenne, signifie qu'il peut parcourir dix kilomètres en planant en partant d'un kilomètre d'altitude. Cela signifie aussi que la traînée est égale au 1/10 de la force de portance. La finesse d'une aile est donc une caractéristique aérodynamique (voir la figure 1b). Quel est son lien avec les autres caractéristiques des ailes ? En pratique, il faut des ailes lisses, pour minimiser les frottements, et très effilées, pour minimiser la traînée induite.

LE VOL HUMAIN

Le bilan n'est pas favorable au vol humain autonome. L'homme pèserait trop lourd (sans même compter le poids des ailes et du dispositif de propulsion) au regard de la puissance qu'il est capable de fournir pour se maintenir en l'air. Essayons pourtant de jouer avec les chiffres. Une

masse totale homme-machine de 100 kilogrammes (un pilote de 65 kilogrammes, 25 kilogrammes d'ailes et de cockpit, et 10 kilogrammes de mécanisme de propulsion) avec une finesse de 20, celle d'un albatros, donne une force de traînée équivalente à cinq kilogrammes. Un cycliste entraîné peut fournir une puissance de 250 watts pendant plusieurs minutes. Cette puissance dépasse la résistance de la force de traînée si la vitesse de l'engin est inférieure à cinq mètres par seconde.

Faire voler une masse de 100 kilogrammes à cette vitesse requiert des ailes très grandes, de plus de 100 mètres carrés chacune ! Pour minimiser la traînée induite, il faut aussi qu'elles soient très effilées et très lisses. Un rapport d'aspect de 12 (donc des ailes 12 fois plus longues que larges), analogue à celui de l'albatros, impose une longueur d'environ 33 mètres. Toute la difficulté de l'entreprise est là : construire des ailes suffisamment résistantes, pesant 25 kilogrammes et faisant 66 mètres d'envergure. En 1977 décolla pour la première fois une machine volante propulsée par un être humain, toute en mylar, kevlar et fibres de carbone. Le rêve d'Icare et de Dédale fut enfin réalisé en 1988, quand un avion propulsé par la seule force musculaire humaine parvint à franchir en quatre heures les 120 kilomètres qui séparent le Nord de la Crète et l'île de Santorin.

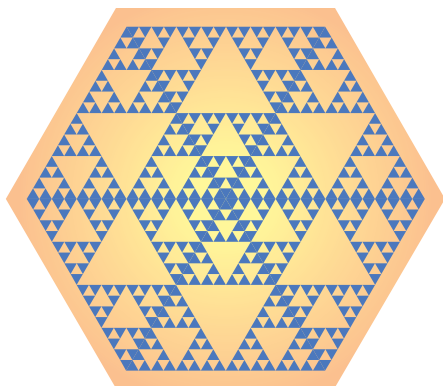
Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

H. LIN, *Fundamentals of zoological scaling*, in *American Journal of Physics*, vol. 50, p. 72, 1982.

S. VOGEL, *Life in Moving Fluids*, Princeton University Press, 1994.

H. TENNEKES, *The Simple Science of Flight*, MIT Press, 1997.

M. DRELA et J. LANGFORD, *Le vol humain propulsé*, in *Pour la Science*, janv. 1986.



Le triangle omniprésent

IAN STEWART

Une même forme fractale se rencontre dans les tours d'Hanoi et dans le triangle de Pascal.

Les mathématiques fascinent par l'étrangeté de certains nombres, de certaines figures et, plus encore, par des relations étonnantes entre des sujets apparemment indépendants. J'ai ainsi beaucoup de plaisir à retrouver le triangle de Sierpinski (voir la figure 1) là où je ne l'attends pas. Cette forme triangulaire est une fractale : les parties sont des versions réduites du tout. Elle apparaît dans les problèmes d'auto-intersection de courbes, dans le triangle de Pascal, dans le problème des tours d'Hanoi, et elle est liée au curieux nombre rationnel 466/885 (environ 0,52655). Nous verrons que ce nombre mériterait d'être inscrit sur la liste des «nombres qui ont plus d'intérêt qu'il n'y paraît», à côté de π , e , le nombre d'or...

Le mathématicien polonais Waclaw Sierpinski conçoit son triangle en 1915 : partant d'un triangle équilatéral, il supprime le triangle qui joint les milieux des côtés, puis répète le même type de suppression pour les trois triangles restants, et ainsi de suite. La répétition indéfinie de cette opération conduit à une courbe qui se recoupe en chacun de ses points... ou presque. Les courbes possédant cette étrange propriété géométrique semblaient naguère «pathologiques». Le triangle de Sierpinski ne se recoupe pas aux trois sommets du triangle initial, mais Sierpinski proposa de corriger cette imperfection en assemblant six exemplaires de son triangle en hexagone (voir la figure en haut à gauche) ; chaque point de la courbe obtenue est une ramification. Nathan Cohen, astronome à l'Université de Boston, a récemment construit des antennes aux formes proches du triangle de Sierpinski, afin de mieux récupérer les ondes radio.

En 1890, le mathématicien français Edouard Lucas a trouvé une relation entre le triangle de Sierpinski et le triangle de Pascal, où chaque nom-

bre est la somme des deux nombres situés au-dessus de lui (voir la figure 2). Ces nombres sont aussi les «coefficients du binôme» (les coefficients du polynôme $(a + b)^n$). Le k -ième nombre de la n -ième ligne (les indexations commencent à 0) est aussi le nombre de combinaisons de k objets parmi n objets distincts. Lucas a montré que les coefficients du binôme impairs forment une version discrète du triangle de Sierpinski, c'est-à-dire un stade intermédiaire de sa construction.

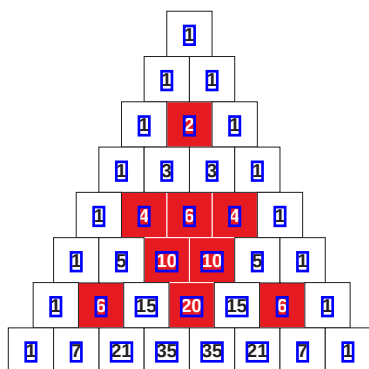
Autrement dit, la plupart des coefficients du binôme sont pairs, puisque ceux-ci occupent toute la surface du triangle initial, tandis que les coefficients impairs sont les points de la courbe. Le quotient du nombre de coefficients impairs par le nombre de coefficients pairs tend vers zéro lorsque le nombre n de lignes augmente. Par ailleurs, David Singmaster, à Londres, a montré que, pour tout entier m , presque tous les coefficients binomiaux sont divisibles par m .

Lucas semble avoir été hanté par le triangle de Sierpinski. En 1883, sous le pseudonyme de M. Claus (une anagramme de Lucas), il fabriqua et vendit le jeu des tours d'Hanoi : sur un socle portant trois tiges, huit disques (ou moins) sont enfilés par ordre décroissant de rayons (voir la figure 3). Le jeu consiste à déplacer les disques un à un, de tige en tige, sans qu'aucun disque repose jamais sur un disque de rayon inférieur ; on doit finalement retrouver les huit disques dans le même ordre sur une autre tige.

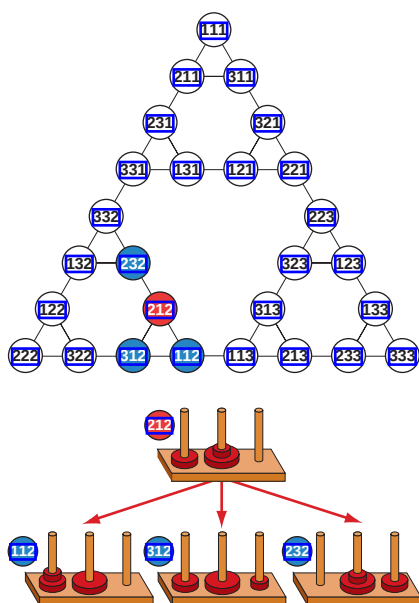
La solution a une structure récurrente : la solution du jeu à $(n + 1)$ disques se déduit de celle du jeu à n disques. Par exemple, pour un jeu à quatre disques, ignorez le grand disque de base et déplacez les trois disques sur une tige libre ; il vous restera alors à déplacer le grand disque sur la tige libre et à déplacer à nouveau les trois disques sur lui.

Illustration de Bryan Chispe

1. Le triangle de Sierpinski s'obtient quand on élimine des triangles équilatéraux d'un triangle initial.



2. Les nombres impairs du triangle de Pascal dessinent une structure similaire au triangle de Sierpinski.



3. Le graphe des tours d'Hanoï (à gauche) montre tous les mouvements autorisés entre les positions permises de ce jeu. De la position 212 (en rouge), seules les positions 112, 312 et 232 sont accessibles (en bleu). Les mouvements réels sont représentés ci-dessus.

La relation avec le triangle de Sierpinski apparaît lorsque l'on interprète géométriquement cette structure récurrente. Tout problème général avec des objets mobiles et un nombre fini de positions se traduit par un graphe, c'est-à-dire un ensemble de points (sommets) reliés par des segments (arêtes). Le graphe des tours d'Hanoï a pour sommets les positions autorisées des disques, et pour arêtes les mouvements permis entre ces positions. Le graphe d'un jeu à n disques est noté H_n . À quoi ressemble-t-il ? Considérons H_3 (voir la figure 3) et notons les disques 1, 2 et 3, par ordre croissant de taille, et les tiges de gauche à droite par 1, 2 et 3 également. Supposons le disque 1 sur la tige 2, le disque 2 sur la tige 1, et le disque 3 sur la tige 2, donc sous le disque 1. Cette position est représentée par la séquence 212, qui

indique dans l'ordre des disques les tiges qui les portent. À chaque position du jeu correspond une séquence de trois chiffres. Il existe $3^3 = 27$ positions, car chaque disque peut être sur l'une quelconque des tiges, quelles que soient les places des deux autres.

À partir de la position 212, quels sont les mouvements autorisés ? Sur chaque tige, le disque le plus petit est en haut. Par exemple, le disque 2 de la tige 1 ne peut se déplacer sur la tige 2, car il serait au-dessus du disque 1 plus petit : les seuls mouvements possibles sont ceux vers les positions 112, 312 et 232. Le graphe H_3 représente tous les mouvements autorisés à partir des 27 positions permises. Il est composé de trois exemplaires du graphe H_2 (à une rotation près), liés par des arêtes disposées en triangle.

Chaque graphe H_2 est également composé de trois graphes H_1 , où un seul disque est sur l'une des trois tiges. Les arêtes joignant les trois graphes H_2 correspondent aux mouvements du disque le plus grand, tandis qu'à l'intérieur de chacun seuls les deux petits disques se déplacent. Chaque exemplaire du graphe H_2 correspond à une position du grand disque. Plus généralement, un graphe H_n est formé de trois graphes H_{n-1} reliés en triangle. Lorsque n croît, le graphe se rapproche du triangle de Sierpinski.

Le graphe H_n est connexe, c'est-à-dire d'un seul tenant : on en conclut qu'on peut déplacer les disques d'une position à n'importe quelle autre. Un des chemins minimaux de la position initiale (un des sommets du triangle) vers une position finale (un des deux autres sommets) suit un des côtés du graphe et comporte $2^n - 1$ arêtes : le problème des tours d'Hanoï se résout ainsi en, au minimum, $2^n - 1$ mouvements.

À la fin des années 1980, le mathématicien allemand Andreas Hinz a utilisé les tours d'Hanoï pour calculer la distance moyenne entre deux points d'un triangle de Sierpinski. Il a prouvé que, pour un jeu à n disques, le nombre moyen de mouvements entre deux positions tend vers $(466/855)2^n$ lorsque n croît. Avec un triangle dont le côté est égal à une unité, la distance entre deux points est de $466/885$, puisque le produit du nombre moyen de mouvements par la longueur de chaque arête $1/(2^n - 1)$ tend vers $466/885$ quand n tend vers l'infini. A. Hinz a également prouvé que la variance (une grandeur statistique qui mesure la dispersion des données) de la distance entre deux points choisis au hasard dans un triangle de Sierpinski de côté un est précisément $904808318/14448151575$. Vous pouvez aussi ajouter ce nombre à votre liste «des nombres plus intéressants qu'il n'y paraît».



L'intelligence humaine à nouveau dominée?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Une nouvelle catégorie de jeux où la machine «psychologue» apprend à prévoir le comportement des joueurs humains.

Une lettre volée d'Edgar Poe décrit le jeu le plus simple du monde, le jeu du *Pair ou impair* : «L'un des deux joueurs tient dans sa main un certain nombre de billes et demande à l'autre : pair ou impair ? Si celui-ci devine, il gagne une bille, sinon il en perd une.»

Dans une variante du jeu, l'un des joueurs place secrètement un objet dans sa main, droite ou gauche, et l'autre joueur tente de deviner dans quelle main est l'objet. Poe nous explique les rudiments tactiques de ce jeu d'anticipation psychologique : «J'ai connu un enfant de huit ans qui, au jeu de *Pair ou impair*, faisait l'admiration universelle. [...] L'enfant dont je parle gagnait toutes les billes de l'école. Naturellement, il avait un mode de divination, lequel consistait dans la simple observation et dans l'appréciation de la finesse de ses adversaires. Supposons que son adversaire soit un parfait nigaud, et, levant sa main fermée, lui demande : pair ou impair ? Notre écolier répond : impair, et il a perdu. Mais à la seconde épreuve, il gagne, car il se dit à lui-même : le niais avait mis pair la première fois, et toute sa ruse ne va consister qu'à lui faire mettre impair à la seconde ; je dirai donc impair.

«Il dit impair, et il gagne. Maintenant, avec un adversaire un peu moins simple, il aurait raisonné ainsi : ce garçon voit que, dans le premier cas, j'ai dit impair, et, dans le second, il se proposera, c'est la première idée qui se présentera à lui, une simple variation de pair à impair comme a fait le premier bête ; mais une seconde réflexion lui dira que c'est là un changement trop simple, et finalement il se décidera à mettre pair comme la première fois. Je dirai donc pair.»

«Il dit pair, et gagne.»
Plus loin, le petit garçon explique sa méthode pour gagner : «Quand je veux savoir jusqu'à quel point quelqu'un est circospect ou stupide, jusqu'à quel point il est bon ou méchant, ou quelles sont actuellement ses pensées, je compose mon

visage d'après le sien, aussi exactement que possible, et j'attends alors pour savoir quels pensées ou sentiments naîtront dans mon esprit ou dans mon cœur.»

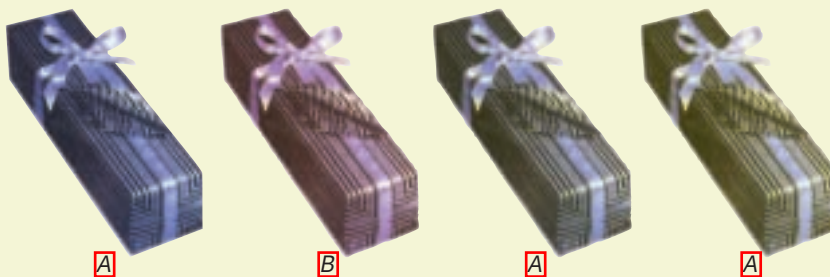
Bien sûr, nul garçon, petit ou grand, ne gagne à tout coup en utilisant cette méthode d'empathie. Il n'empêche qu'à ce jeu, certains obtiennent de bien meilleurs résultats que d'autres. Et les machines ? La capacité de prédire le comportement d'un adversaire peut-elle être insérée dans un programme ?

LES JEUX DE NIM

La question présente un grand intérêt, car elle pose des problèmes peu examinés par les informaticiens et les mathématiciens. Dans les jeux de Nim (Échecs, Dames, Othello, Go, Morpion, etc.), l'information sur la situation est, à chaque instant, entièrement disponible. On sait que, pour chacun de ces jeux, il existe une stratégie optimale pure (c'est-à-dire ne faisant pas intervenir le hasard) ; cette stratégie est calculable lorsque le

1. LA PSYCHOLOGIE HUMAINE DEVOILÉE

Un ami vous présente quatre boîtes marquées A, B, A, A, et vous dit : dans l'une d'elles, j'ai mis un billet de 100 F. Je ne souhaite pas que tu le trouves, mais si tu ouvres la bonne boîte, il sera à toi.



Laquelle ouvrez-vous ? Vous avez cinq secondes pour choisir.

Si vous avez choisi la troisième boîte, votre comportement est très humain ! Cette expérience, proposée par A. Rubinstein, A. Tversky et D. Haider en 1996, a été testée avec des étudiants par A. Rubinstein. Les résultats sont, dans l'ordre, 16 pour cent, 19 pour cent, 54 pour cent, 11 pour cent. Le biais très fort en faveur de la troisième boîte peut s'analyser de diverses façons, mais sans doute suffit-il de dire que cette troisième boîte apparaît comme «la plus banale», car elle n'est ni sur les bords, ni la seule marquée d'un B ; comme le billet doit être à l'endroit «le plus banal», elle semble la mieux susceptible de convenir. Pourtant, avec les informations disponibles, aucune boîte n'était vraiment favorisée, et l'on aurait dû obtenir une répartition 25 pour cent, 25 pour cent, 25 pour cent. Cette prévisibilité partielle rend difficile à un joueur d'engendrer du hasard quand cela lui serait utile. Les programmes évoqués dans cet article tirent profit de cette faiblesse. Une autre expérience illustre notre difficulté avec le hasard : lorsqu'on demande à une personne un nombre au hasard entre 1 et 9, près de 20 pour cent des gens répondent 7.

jeu est suffisamment simple (tel le Morpion, résolu il y a six ans), ou, au contraire, inaccessible en pratique, car nécessitant des puissances de calculs que les ordinateurs n'ont pas : c'est le cas des Échecs et de tous les jeux intéressants. Quand la stratégie optimale d'un jeu de Nim est de calcul trop complexe, on programme les ordinateurs selon une méthode dénommée *minimax*, qui consiste à énumérer jusqu'à une certaine profondeur les échanges de coups possibles en exploitant au mieux l'information obtenue.

Le *minimax* et ses variantes conduisent à de bons programmes qui battent la plupart des humains. G. Kasparov, le champion du monde d'Échecs en titre, en a fait les frais il y a trois ans, perdant contre un ordinateur. Toutefois, au jeu de Go, le niveau des programmes fondés sur le *minimax* est celui d'un débutant moyen, ce qui est décevant... ou réconfortant selon le point de vue.

L'obstacle, pour le jeu *Pair ou impair*, n'est pas celui du calcul et le *minimax* ne donne rien, car les coups sont simultanés (ou, ce qui revient au même, vous ignorez le choix de votre adversaire quand vous jouez). Chaque joueur doit s'inter-

roger sur ce qui, en fonction des coups passés, rend plus probable tel comportement de l'adversaire ou tel autre. Il ne peut jamais être certain d'avoir raison. Bien jouer à ce jeu signifie gagner plus de 50 pour cent des parties lors de séries de quelques centaines de coups.

La théorie mathématique des jeux appliquée à *Pair ou impair* donne l'indication suivante : en jouant au hasard avec une probabilité 1/2 pour pair, 1/2 pour impair (la stratégie *Mathématique*), vous assurez un minimum moyen de succès (égal à 50 pour cent), mais vous ne gagnez pas plus. Contre un adversaire qui joue tout le temps pair, *Mathématique* gagne une fois sur deux, alors que vous pourriez facilement gagner 100 pour cent des parties. De même, face à un joueur qui alternerait pair et impair, la stratégie *Mathématique* est peu judicieuse.

La stratégie *Mathématique* est parfois dénommée (à tort) *Stratégie optimale*, car c'est la meilleure des stratégies qui ne tienne pas compte du passé des échanges (ce qui n'est pas conforme à l'esprit du jeu et lui enlève tout intérêt). Comparée à d'autres, *Mathématique* est médiocre.

L'âme humaine étant rétive à toute réduction, et à toute «mise en règles»,

beaucoup de gens croient impossible que l'on réussisse à programmer un ordinateur pour qu'il gagne à *Pair ou impair*. Ils se trompent. Une série de travaux récents ont conduit Christophe Meyer à réaliser un programme, dénommé *Sagace*, qui applique les conseils du petit garçon de la nouvelle d'Edgar Poe : se mettre dans la peau de son adversaire pour sentir ce qu'il va faire et l'exploiter à ses dépens.

UNE VIEILLE MACHINE PAS SI BÊTE

Au début des années 1950, D. Hagelbarger inventa une machine pour jouer à *Pair ou impair* : elle remporta 53 pour cent des 10 000 parties engagées contre des humains. Claude Shannon, célèbre pour ses travaux sur la théorie de l'information, présenta sa propre machine en 1953, qui atteint 57 pour cent de succès (résultats moyens obtenus avec des étudiants pour des parties de 500 coups). Cette machine était réalisée par des moyens mécaniques et électriques ; aujourd'hui, on la simule par programme. La machine de Shannon, que nous dénommerons *Shannon*, est indiquée sur la figure 3. Il faut environ 40 coups pour que *Shannon* commence à jouer autre chose que des coups au hasard. Lors d'une série suffisamment longue face à un humain (200 coups ou plus), *Shannon* gagne en moyenne 57 pour cent des coups, bien qu'ayant recours au hasard dans 55 pour cent des cas. Bien sûr, si l'humain qui joue contre *Shannon* connaît la méthode de jeu, il peut gagner. Shannon (le mathématicien !) a élaboré une façon optimale de jouer contre *Shannon* (la machine !) avec laquelle on gagne, à la longue, trois coups sur quatre.

Gagner 57 pour cent en moyenne est remarquable pour un mécanisme de jeu élémentaire. Nous reviendrons plus loin sur l'explication de cette prévisibilité (partielle) du comportement humain.

LE PROGRAMME SAGACE

Le programme *Sagace* (acronyme de *Solution algorithmique génétique pour l'anticipation de comportements évolutifs*) mis au point par Ch. Meyer (de l'équipe d'Intelligence artificielle de l'Université de Paris 6, dirigé par J.-G. Ganascia), fonctionne sur une méthode beaucoup plus complexe que *Shannon*. *Sagace* s'applique à toutes sortes d'autres jeux et problèmes. Les lecteurs qui veulent essayer *Sagace* pour le jeu *Pair ou impair* peuvent le télécharger à :

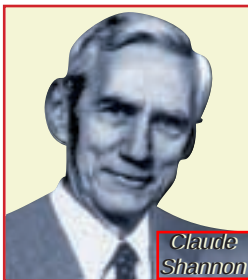
www.animaths.com/smartopponent.htm
Le programme *Sagace* s'organise autour de deux modules : le module *Compréhension de l'adversaire* et le module

2. RÉSULTATS D'UN TOURNOI DE SIX ALGORITHMES DE PAIR OU IMPAIR

	MATHÉMATIQUE	30% - 70%	SHANNON	SAGACE	PÉRIODIQUE	AUTOMATE	REUSSITES
MATHÉMATIQUE		50	50	50	50	50	50
30% - 70%	50		45	42	42	50	45,8
SHANNON	50	55		48	50	57	52
SAGACE	50	58	52		76	61	59,4
PÉRIODIQUE	50	58	50	24		49	46,2
AUTOMATE	50	50	43	39	51		46,6

Dans ce tableau, on a indiqué le pourcentage de réussites de six stratégies de jeu confrontées deux à deux.

- *Mathématique* joue au hasard avec une probabilité de 50 pour cent pour pair, 50 pour impair.
- *30 pour cent-70 pour cent* joue au hasard avec une probabilité de 30 pour cent pour pair et 70 pour cent pour impair.
- La stratégie *Shannon* est décrite à la figure 3.
- *Périodique* joue périodiquement la séquence complexe pair, pair, impair, au hasard, pair, pair, pair, au hasard, impair, impair, pair, au hasard, impair, impair.
- *Automate* est une stratégie qui joue selon un principe un peu plus compliqué encore.
- *Sagace* remporte le tournoi avec une moyenne de 59,4 pour cent contre 52 à *Shannon* qui arrive en second. La *Stratégie mathématique*, troisième, assure 50 pour cent (comme prévu par la théorie), mais elle est battue, car contrairement à *Shannon* et à *Sagace* elle ne sait pas exploiter les stratégies ayant une certaine régularité de comportement (pourtant ici aucune régularité n'est évidente). Notons que *Sagace* et *Shannon* sont conçus pour jouer contre des humains et non contre d'autres algorithmes.



3. LE PROGRAMME DE SHANNON

Claude Shannon, en 1953, a défini un joueur électromécanique pour le jeu *Pair ou impair*.

Son programme, sur une longue série de parties, gagne environ 57% des coups contre des joueurs humains.

La machine *Shannon* envisage huit situations possibles pour un joueur qui considère ses deux derniers coups :

S1 : j'ai gagné, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai encore gagné.

S2 : j'ai gagné, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai alors perdu.

S3 : j'ai gagné, puis j'ai changé mon jeu et j'ai encore gagné.

S4 : j'ai gagné, puis j'ai changé mon jeu et j'ai alors perdu.

S5 : j'ai perdu, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai alors gagné.

S6 : j'ai perdu, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai encore perdu.

S7 : j'ai perdu, puis j'ai changé mon jeu et j'ai alors gagné.

S8 : j'ai perdu, puis j'ai changé mon jeu et j'ai encore perdu.

• Pour chacune des huit situations, *Shannon* mémorise :

– si le joueur a au coup suivant rejoué comme à son dernier coup,

– ou au contraire a changé de choix.

• La machine mémorise encore si ce choix est le même que celui fait lors de la précédente rencontre de la situation.

• Le jeu de Shannon consiste à parier que le joueur qui s'est montré constant vis-à-vis d'une situation le restera encore à la prochaine rencontre de la situation.

• Si le joueur a changé d'attitude confronté à une situation donnée, *Shannon* choisit au hasard son coup, de même qu'en début de série lorsque les informations disponibles sont insuffisantes.

en plus, à chaque étape du jeu, de nouvelles règles sont créées par ce qu'on dénomme la méthode des algorithmes génétiques : on exerce une légère modification sur l'une des règles qui possède un bon coefficient de validité (méthode des mutations), ou on mélange deux bonnes règles entre elles. Un programme simplifie plusieurs règles ayant une zone commune pour n'en garder qu'une.

Des règles nouvelles sont aussi ajoutées par application de ce que Ch. Meyer appelle la méthode du regret : après un coup où il vient de perdre, *Sagace* ajoute une règle indiquant ce qu'il aurait dû faire pour gagner. Le tout déclenche une assez grande quantité de calculs à chaque coup, mais, avec les machines d'aujourd'hui, agit instantanément. Ainsi, appliquant l'idée d'Edgar Poe de se mettre dans la tête de l'adversaire, le programme *Sagace* essaie à la fois de deviner ce qu'il va jouer et s'adapte à ses résultats passés pour tenter de jouer au mieux.

UNE DOMINATION LÉGÈRE, MAIS IMPLACABLE

Opposé à un humain, en début de partie (les 30 premiers coups), *Sagace* ne fait pas mieux que le hasard. Ensuite, *Sagace* remporte environ 62 pour cent des parties, ce qui est sensiblement supérieur au score de *Shannon*. Avec certains joueurs, *Sagace* gagne moins, mais il est bien rare de le battre lors d'une partie de 200 coups.

Il est particulièrement agaçant de jouer contre *Sagace* (mais c'est déjà vrai contre *Shannon*), car malgré les efforts faits pour être imprévisible et pour changer de stratégie, et malgré les ruses mises en œuvre pour piéger votre adversaire de silicium, celui-ci prend de l'avance. Petit à petit, il profite de vos périodes de lassitude où inconsciemment vous vous comportez trop simplement ou adoptez à nouveau un comportement que vous aviez déjà eu (ce qu'il exploite à son profit). Il grignote des points ou regagne l'avance que vous aviez constituée en début de partie, et, dans la grande majorité des cas, il finit par remporter la série de coups.

On constate en particulier que tout comportement périodique de période inférieure à 10 est identifié et utilisé contre vous, amenant vite un gain de 100 pour cent en faveur de *Sagace*. Évidemment, vous pouvez battre *Sagace* en tirant à pile ou face votre coup (pile pour pair, face pour impair) et jouer alors la stratégie *Mathématique*, qui remporte un coup sur deux en moyenne. Cependant, jouer de cette façon est une forme de tricherie, puisque *Sagace* a été conçu pour jouer contre un adversaire humain qui doit simuler le hasard mentalement.

Choix du coup. Dans le module *Compréhension de l'adversaire*, *Sagace* élabore des règles de comportement. Nous en indiquons une, avec une notation où le premier joueur est l'adversaire humain de *Sagace*, et le second joueur (dont le coup est noté en rouge), est *Sagace* :

Si les coups précédents ont été (impair, pair) (pair, impair) (impair, impair), alors jouer impair.

De nombreuses règles de ce type sont créées et comparées au jeu de l'adversaire humain. Le module attribue aux règles qui décrivent correctement le comportement de l'adversaire un coefficient de validité plus fort qu'à celles qui le décrivent mal. Une gestion de ces règles et de leurs coefficients de validité est mise en œuvre à chaque fois qu'un nouveau coup est joué, ce qui, petit à petit, définit «un profil comportemental» de l'adversaire humain. Ce profil, qui évolue au fur et à mesure du jeu, permet, après un certain nombre de coups, de faire une prédiction du type : l'adversaire va jouer pair au prochain coup.

Dans la version actuelle de *Sagace* pour *Pair ou impair*, le nombre de coups passés susceptibles d'intervenir dans une règle est 16. Les derniers coups ont plus d'importance que les plus anciens, qui à la longue sont oubliés.

Le second module, *Choix du coup*, est fondé sur un système de trois règles :

– si, d'après le module *Compréhension de l'adversaire*, il est prévu qu'il va jouer pair, alors jouer pair ;

– si, d'après le module *Compréhension de l'adversaire*, il est prévu qu'il va jouer impair, alors jouer impair ;

– si le module *Compréhension de l'adversaire* ne prédit rien, alors *Sagace* choisit au hasard.

Dans le cas de jeux un peu plus compliqués comme Pierre/Ciseau/Papier, ou nettement plus difficiles comme *Alésia* (voir la figure 4), le second système de règles est plus complexe et fonctionne comme celui du module *Compréhension de l'adversaire*, avec des coefficients de validité évoluant au cours de la partie.

Lorsqu'une règle a été appliquée avec succès, le programme en augmente le coefficient de validité, ce qui rendra plus probable son application future. Quand la règle a conduit à un échec, son coefficient de validité est diminué. Lorsque plusieurs règles sont utilisables simultanément, le programme applique celle dont le coefficient de validité est le plus grand, mais selon un principe probabiliste qui a pour effet de rendre non déterministe le comportement de *Sagace* : face à une même série de coups, *Sagace* ne réagit pas toujours de la même manière.

Un jeu de règles initiales est présent dans le système en début de partie (il a été mis au point soigneusement à la suite de longues séries de tests), mais,

On peut dire que *Shannon* et encore plus *Sagace* lisent dans nos pensées, non pas au point de nous écraser à chaque rencontre (ce qui serait de la magie), mais suffisamment pour gagner la plupart des longues séries jouées sans tricher.

TOURNOI DES MACHINES

Conçue pour jouer contre des adversaires humains, *Sagace* a cependant été testée contre un ensemble d'adversaires algorithmiques. Les résultats obtenus sont riches d'enseignements.

Contre la stratégie *Mathématique* (au hasard 50 pour cent de pair, 50 pour cent d'impair), *Sagace*, nous le savons, gagne 50 pour cent des coups, et donc 50 pour cent des parties.

Lorsque *Sagace* joue contre *Shannon*, il gagne 52 pour cent des coups, ce qui est bien, mais loin des résultats de la stratégie spécialement adaptée que *Cl. Shannon* avait imaginée et qui, elle, réussit à 75 pour cent contre *Shannon* ; *Sagace* ne converge pas vers le meilleur jeu possible face à *Shannon*, ce qu'on aurait pu espérer, et cette imperfection ouvre la porte à de futurs perfectionnements.

Contre une stratégie qui joue au hasard pair ou impair dans des proportions 30 pour cent-70 pour cent, *Sagace* gagne 58 pour cent des parties. Là encore, on est en dessous de ce que donnerait le jeu le mieux adapté (qui consisterait à jouer toujours pair et ferait gagner 70 pour cent des coups). La stratégie mathématique contre la stratégie 30 pour cent-70 pour cent ne gagne que 50 pour cent des coups, ce qui est moins bien que *Sagace*.

Contre la stratégie appelée *Périodique* qui joue cycliquement : pair, pair, impair, au hasard, pair, pair, pair, au hasard, impair, impair, pair, au hasard, impair, impair (ce qui n'est pas très facile à deviner, vous en conviendrez !), *Sagace* fait un score de 76 pour cent.

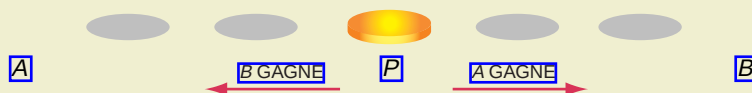
Contre une stratégie algorithmique réactive baptisée *Automate*, la stratégie *Sagace* réussit à 61 pour cent, ce qui ne signifie pas que *Sagace* réussirait aussi bien contre toute stratégie algorithmique réactive.

Au total, en imaginant que chacune des six stratégies (*Shannon*, *Sagace*, *Stratégie mathématique*, *Hasard 30 pour cent-70 pour cent*, *Périodique*, *Automate*) affronte chacune des cinq autres et qu'on compare leurs résultats globaux, *Sagace* est première, suivie de *Shannon* (voir la figure 2).

GÉNÉRALISATION

Les idées mises en œuvre dans *Sagace* peuvent être appliquées à d'autres jeux du même type comme le fameux

4. LE JEU D'ALEZIA



Un pion est placé au départ en *P*, et chaque joueur dispose d'une cagnotte de 50 points. À chaque coup, les joueurs choisissent secrètement un certain nombre de points qui sont soustraits à leur cagnotte. Ce choix fait, les joueurs dévoilent leurs mises. Celui qui a proposé le plus avance le pion d'un cran vers le camp de son adversaire. Lorsqu'un joueur arrive dans le camp adverse, il a gagné.

EXEMPLE DE PARTIE



A mise 10 (il lui reste 40), B mise 7 (il lui reste 43)
A gagne, et donc le pion avance d'une case vers B :



A mise 1 (il lui reste 39), B mise 15 (il lui reste 28)
B gagne, et donc le pion avance vers A :



A mise 16 (il lui reste 23), B mise 10 (il lui reste 18)
A gagne, et donc le pion avance vers B :



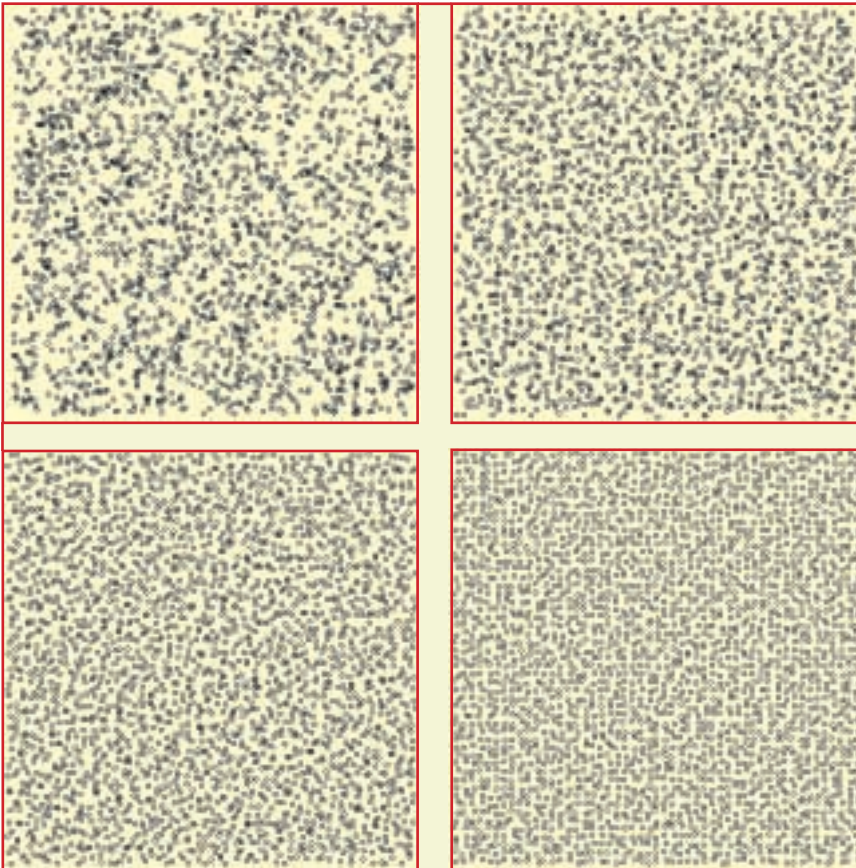
A mise 11 (il lui reste 12), B mise 10 (il lui reste 8)
A gagne, et donc le pion avance vers B :



A mise 12 (il lui reste 0), B mise 8 (il lui reste 0)
A gagne, et donc le pion avance vers B, ce qui fait gagner A :



La partie peut être nulle, auquel cas nul ne marque de point. Le programme *Sagace* a appris à jouer à ce jeu, ce qui lui a conféré une connaissance tactique (la théorie du jeu est maintenant classique). Plus original, lors d'une série de parties que vous jouez contre lui, *Sagace* élabore votre profil psychologique, qu'il exploite ensuite contre vous. Même le concepteur de *Sagace* ne réussit plus aujourd'hui à battre son propre programme.



Dans ces quatre répartitions de points, l'une d'elles a été obtenue en choisissant 900 fois de suite un point quelconque dans le carré sans favoriser aucune partie de la surface, chaque point étant déterminé indépendamment des autres. Les trois autres répartitions sont biaisées, soit de façon à éviter que les points ne se rapprochent trop, soit au contraire de façon que les points s'agglomèrent plus qu'ils ne le font lors de choix indépendants. Quelle est la répartition uniforme?

C'est la première. Rares sont ceux qui la désignent, car elle semble contenir trop de groupes agglomérés. Nous avons une mauvaise intuition du hasard, que nous ne savons ni reconnaître, ni produire. Cette perception inexacte du hasard est une insuffisance de l'intelligence qu'exploitent Shannon et Sagace.

Pierre/Ciseau/Papier ou Alésia. On y obtient des résultats comparables, avec, dans le cas d'Alésia, une propriété supplémentaire qui ne pouvait pas apparaître avant : certains coups sont mauvais dans l'absolu (car stratégiquement inadaptés, ce qui n'existe pas à *Pair ou impair*, ni dans Pierre/Ciseaux/Papier) et *Sagace* finit à la longue par le découvrir. Il fait alors évoluer son jeu de règles pour prendre en compte les connaissances acquises par l'expérimentation (un humain attentif peut découvrir ces règles par analyse logique et mathématique et les bons joueurs d'Alésia, bien sûr, les connaissent).

Sur une série de 50 parties au jeu d'Alésia, les bons joueurs aussi se font battre par *Sagace*, même son créateur, Ch. Meyer! La raison en est que *Sagace* associe un bon jeu logique (certains coups doivent être évités, d'autres sont préfé-

rables dans une certaine proportion de cas, et *Sagace* le sait par sa base de règles) et un bon jeu psychologique : il exploite les faiblesses particulières des joueurs humains qu'il repère en cours de partie. L'expérience tirée d'Alésia suggère d'ailleurs que, dans un programme de jeu d'Échecs, l'introduction de techniques analogues à celles de *Sagace* pourrait conduire à des programmes adaptatifs plus pédagogiques et donc plus susceptibles de faire progresser un joueur humain.

PRÉVISIBILITÉ HUMAINE

De même, les techniques utilisées dans *Sagace* devraient servir à la conception d'interfaces intelligentes qui rendraient plus agréable l'utilisation des futurs ordinateurs : un tel système serait capable d'analyser nos habitudes, de façon à

rendre plus attrayant le commerce avec les cervelles de silicium. C'est l'un des objectifs de Ch. Meyer.

S'il se révélait que la Bourse ou les marchés financiers se prêtaient à une approche psychologique analogue à celle utilisée pour les jeux d'anticipation, le léger biais en faveur de celui qui applique la technique *Sagace* pourrait peut-être lui rapporter des fortunes. Les succès des stratégies *Shannon* et *Sagace* proviennent en fait de ce que l'être humain – contrairement à ce qu'il croit de lui-même – est partiellement prévisible et n'est donc pas adapté à de tels jeux. Cela est la conséquence de plusieurs facteurs :

- il a de faibles capacités de mémoire (et, par exemple, confronté à une stratégie périodique de période assez longue, le plus souvent il ne le voit pas) ;

- il est incapable d'engendrer un authentique hasard et, quand il croit le faire, il se trompe, reproduisant les mêmes séries ou, en tout cas, ne faisant pas varier son comportement uniformément comme un tirage au sort le ferait ;

- il tend à se comporter identiquement dans des circonstances proches, et cela même s'il essaie de lutter contre cette tendance pour tromper un ennemi par lequel il se sait épié ;

- il manque d'imagination et n'utilise pas toutes les possibilités combinatoires que le jeu autorise.

Malgré la haute idée qu'il a de lui-même, l'être humain ne possède que de bien faibles capacités dans le traitement de l'information ; ces insuffisances limitent ses performances dans des situations où il fallait, pensait-on, de l'intelligence (mot vague). Heureusement (pour notre vanité), l'Intelligence artificielle se heurte à d'autres obstacles qu'elle ne franchira vraisemblablement pas de si tôt : compréhension du langage naturel, traduction automatique, analyse d'images, robots autonomes, imagination, créativité, et bien d'autres...

C. Meyer SAGACE, Applications aux jeux à informations complètes et imparfaites. Thèse soutenue le 29 juin 1999 à l'Université de Paris 6.

B. GUERRIEN, La théorie des jeux, Economica, Paris, 1995.

J.-P. DELAHAYE et Ph. MATHIEU, Des surprises dans le monde de la coopération, Dossier Pour la science : Les mathématiques sociales, 1999.

C. MEYER, J.-G. GANASCIA et J.-D. ZUCKER, Learning Strategies In Games by Anticipation. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1997, Morgan Kaufman Ed.
C.E. SHANNON, A Mind-Reading (?) Machine, Bell Lab., March 1953.

DU TEMPS DES DINOSAURES AU TEMPS DES OISEAUX ET DES MAMMIFÈRES...

– à quelque chose malheur est bon! –

Journée scientifique au Palais de la découverte avec le parrainage de la Société géologique de France,
en collaboration avec la revue Pour la Science

Mercredi 24 novembre 1999

AU TEMPS DES DINOSAURES

9h Visite de l'exposition "Dinosaures" du Palais de la découverte (reconstitutions animées, fossiles illustrant leurs modes de vie, leur métabolisme, jeux et ... volière!)

9h50 Accueil par Jean Audouze, Directeur du Palais de la découverte

10h Jean Le Lœuff, Conservateur du Musée des dinosaures d'Esperaza

"La diversité des derniers dinosaures"

10h30 Jean-Michel Mazin, Directeur de recherche au CNRS

"Les reptiles volants au temps des dinosaures"

11h Eric Buffetaut, Directeur de recherche au CNRS

"Dinosaures à plumes et oiseaux du Crétacé"

11h30 Discussion

MAUVAIS TEMPS POUR LES DINOSAURES ET LES AUTRES!

14h Robert Rocchia, physicien au CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
"Quand une météorite géante s'écrase sur la Terre"

14h30 Claude Babin, professeur honoraire de l'Université de Lyon

"Cinq extinctions majeures : Terre et vie, une même histoire"

BEAU TEMPS POUR LES OISEAUX ET LES MAMMIFÈRES!

16h Armand de Ricqlès, professeur au Collège de France

"L'origine dinosaurienne des oiseaux : hérésie ou quasi-certitude?"

16h30 Cécile Mourer-Chauviré, Directeur de recherche CNRS

"Après les dinosaures, la radiation explosive des oiseaux modernes"

17h Jean-Louis Hartenberger, Directeur de recherche CNRS

"De l'ère des reptiles à l'explosion des mammifères"

17h30 Discussion

18h Apéritif - spectacle

Quelques saynètes des *1001 nuits de la science*,
dites par Daniel Raichwarg, avec chant et accordéon

**Entrée gratuite après inscription
obligatoire auprès
de Christiane Sabouraud
(01 40 74 80 52, répondeur)**





Le vélum du Colisée

PHILIPPE FLEURY

Le montage virtuel précise la reconstitution de la machinerie.

Et *uella erunt* : «et il y aura des voiles». Ainsi se termine une inscription «publicitaire» peinte qui annonce un combat de gladiateurs sur un mur de Pompei. Ces voiles (*uella*, pluriel de *uella* qui a donné «vélum» en français) sont des toiles de protection, qui étaient tendues au-dessus de l'amphithéâtre pour protéger les spectateurs du soleil. L'équipe pluridisciplinaire de la Maison de la recherche en sciences humaines de l'Université de Caen, qui reconstitue virtuellement la Rome antique, a, pour modéliser complètement le Colisée, simulé sur ordinateur le montage de son vélum. Cette simulation précise la disposition et le fonctionnement de la machinerie de treuils, de poulies et de câbles qui y était associée.

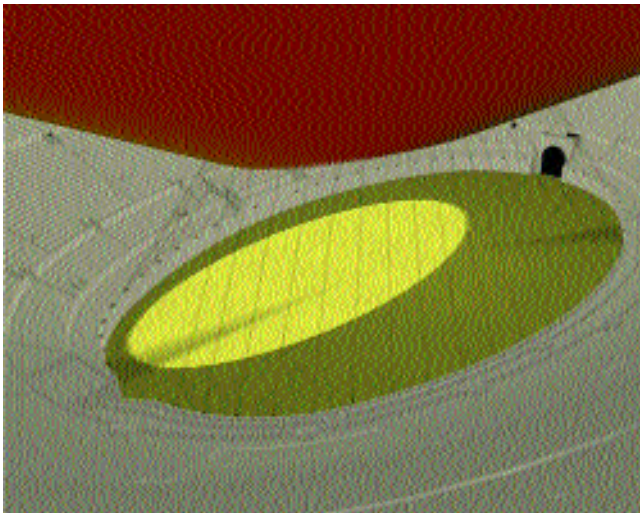
Plusieurs textes latins mentionnent des vélums, et des amphithéâtres et des théâtres portent encore des traces des systèmes de montage, mais nous ne disposons d'aucune description précise de ces appareils. Des hypothèses avaient été dessinées, mais jamais nous n'avions eu de vue d'ensemble du système et, surtout, jamais le fonctionnement n'avait été testé en «grandeur réelle» : la reconstitution et la mise en mouvement informatiques d'un système obligeant, comme pour un système réel, à ne négliger aucun détail.

Notre reconstitution est fondée sur les restes du Colisée et sur les techniques disponibles au 1^{er} siècle de notre ère (pour ce qui concerne les poulies, les cordes et les toiles). Nous avons conservé l'hypothèse, déjà émise avant nous, d'une décomposition du vélum en bandes trapézoïdales, déroulées entre des

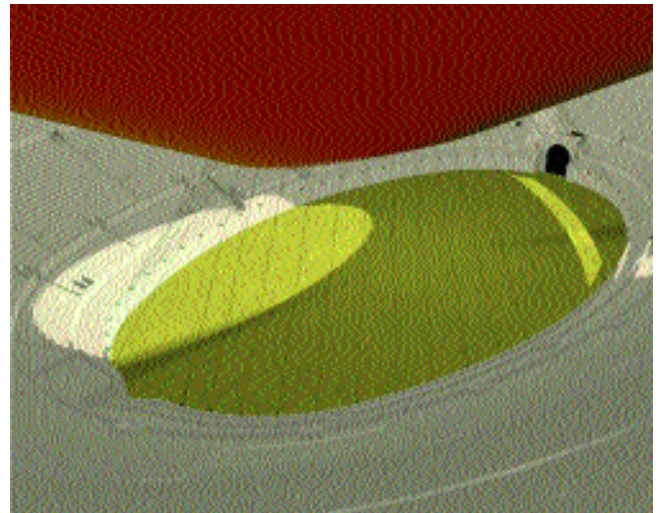
mâts plantés sur la corniche supérieure de la façade et un grand anneau central. Ce découpage de la toile facilitait sa manœuvre (la surface totale du vélum est d'environ 22 000 mètres carrés, soit un poids total de l'ordre de 12 tonnes à sec). Les trous encore visibles, ou dont nous pouvons reconstituer l'emplacement, indiquent qu'il y avait 240 mâts, d'une section de 45 centimètres sur 55 centimètres ; les calculs de résistance et de force de levage nous font proposer une hauteur de 23 mètres pour ces mâts.

Pour déployer le vélum, on levait d'abord l'anneau central, à l'aide de cordes tendues par des treuils et passant sur des poulies (de 80 centimètres de long) reliées aux mâts (*cordes a*). Une fois tendues et tournées autour de l'axe du treuil, les cordes remontaient jusqu'en haut des mâts, afin de diminuer le couple exercé sur ceux-ci par les cordes de l'intérieur : la modélisation a montré que l'ensemble des cordages (qui pèsent environ 68 tonnes) et du vélum exerçait une forte traction vers l'intérieur de l'amphithéâtre. L'anneau central était hissé jusqu'à ce que les cordes qui le reliaient aux premiers rangs des gradins (*cordes d*) soient tendues. Les cordes que nous avons utilisées ont un diamètre de cinq centimètres, ce qui assure une résistance à la traction d'au moins 1 000 kilogrammes.

Les 240 pans du vélum étaient alors déroulés à l'aide de 240 cordages, fixés aux mâts (*cordes b*). Ils étaient soutenus par un quatrième réseau de cordes (*cordes c*), qui maintenaient aussi la forme elliptique de l'anneau central.

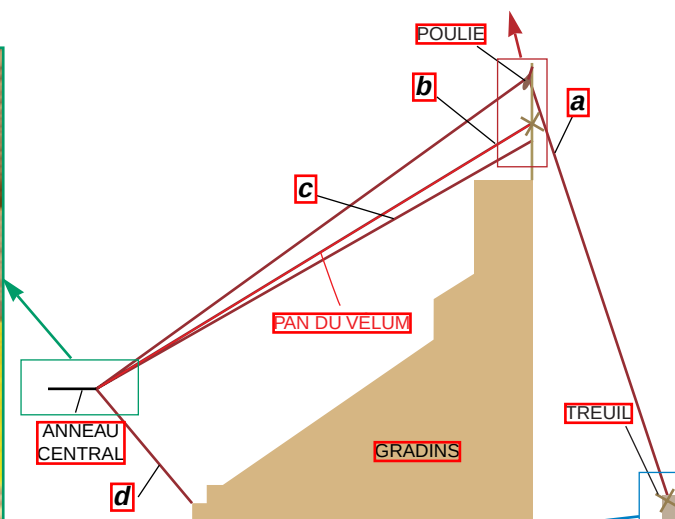
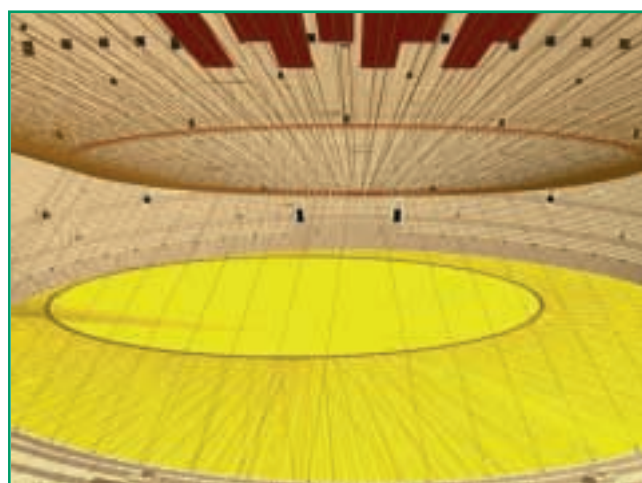
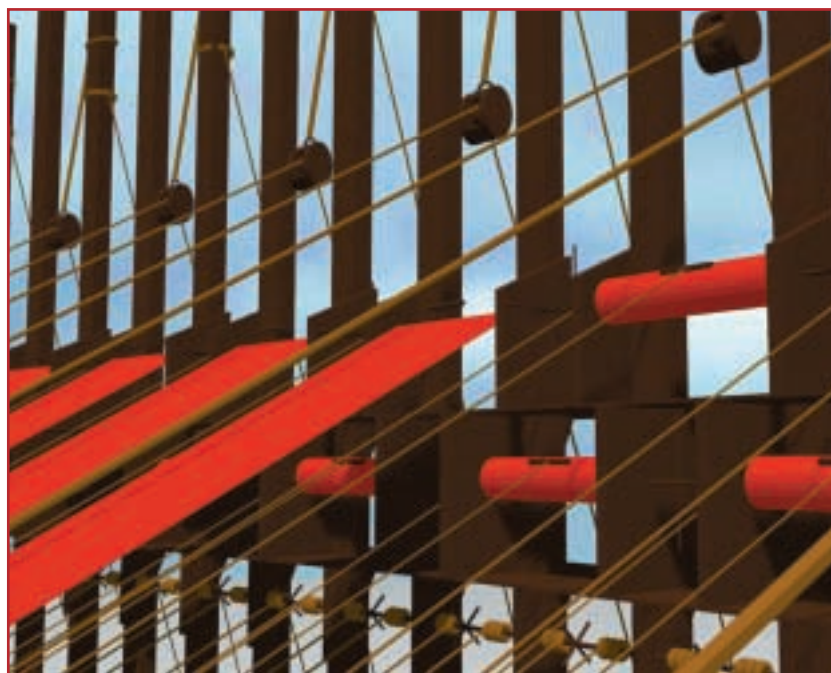
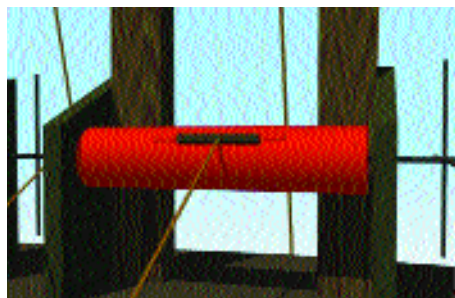


L'anneau central est à 18 mètres au-dessus de l'arène : les toiles descendent le plus bas possible, pour une protection maximale contre le soleil, sans gêner la vision des spectateurs placés tout en haut des gradins (à gauche). La simulation de la course du soleil en dif-



férentes dates à la latitude de Rome indique que les conditions de protection les moins favorables sont évidemment celles où le soleil est le plus bas, c'est-à-dire en hiver, et le matin ou le soir (à droite), mais ce sont aussi les moments où le soleil est le moins gênant.

Les mâts soutenaient les mécanismes d'enroulement des toiles. Pour des raisons d'encombrement nous avons décalé ces mécanismes en hauteur une fois sur deux (à droite). Seules les toiles de gauche sont ici déroulées, à l'aide de cordes analogues à celles que l'on voit s'attacher aux rouleaux de toile encore enroulés. Nous avons modélisé, entre les mâts, des plates-formes (ci-dessous) nécessaires aux opérateurs, des soldats de la marine romaine habitués à manier des cordages. Personne auparavant n'avait pensé à représenter ces plates-formes, dont la nécessité ne nous est apparue qu'au moment de faire fonctionner les treuils permettant d'enrouler et de dérouler les toiles.



Les treuils qui servaient à tendre les cordes a (à gauche) étaient portés par 160 bornes situées à l'extérieur de l'édifice ; seulement cinq sont conservées. Les trous portés par celles-ci indiquent comment étaient fixés les treuils (à droite).



Philippe FLEURY, professeur de latin, est directeur adjoint de la Maison de la recherche en sciences humaines de l'Université de Caen.

Histoire des sciences

Un naturaliste à Paris en 1834

Alfred Moquin-Tandon. Édition présentée par Jean-Louis Fischer. Éditions Sciences en situation, collection Sens, 1999.

Un savant provincial du XIX^e siècle, Alfred Moquin-Tandon (1801-1863), effectue son premier voyage à Paris en 1834. Durant son séjour (du 8 septembre au 24 octobre), il rédige son journal. C'est ce dernier qu'il nous est donné de lire aujourd'hui. Avec quel plaisir !

A 33 ans, l'homme a de nombreuses cordes à son arc : il est botaniste, zoologiste et médecin. Né à Montpellier, il cumule à Toulouse les fonctions de professeur d'histoire naturelle (botanique, zoologie et géologie) et de directeur du jardin botanique. Accablé de tâches professorales et administratives, il vient plaider un allègement auprès de son ministre de tutelle. Il a bien du mal à rencontrer le ministre de l'Instruction publique de Louis-Philippe (François Guizot, 1787-1874), son chef de cabinet (Jean Antoine Auguste Génie, 1796-1870) ou le vice-président du Conseil royal du ministère (le baron-conseiller Louis Jacques Thenard, 1777-1857), et les résultats des entrevues se révèlent incertains : ces hauts personnages sont débordés, inaccessibles ; ils oublient les solliciteurs et reviennent sur leurs décisions. Cependant l'intérêt du document autobiographique que nous présente Jean-Louis Fischer ne se résume pas à l'attente dans les antichambres des puissants ; Moquin-Tandon est surtout un scientifique compétent, reconnu, qui a promu les théories les plus audacieuses de son époque.

En tant que botaniste, Moquin-Tandon s'inscrit dans la lignée d'Augustin Pyrame de Candolle (1778-1841), adepte de la classification naturelle des plantes, qui s'oppose à celle de Linné, plus hiérarchique et aux caractères plus limités. C'est un spécialiste de la famille des chénopodiacées, qui comprend aujourd'hui 120 genres et 1 300 espèces de milieux arides, dont les bettes, les épinards et autres arroches. Cependant, il ne se contente pas de la phytographie

végétale, c'est-à-dire de la description des plantes ; il se préoccupe aussi de géographie botanique (répartition des plantes selon les milieux) et de tératologie (science des anomalies ou des monstruosités), qu'il se refuse à lier à la tératologie animale. Dans la capitale, Moquin-Tandon rencontre des botanistes connus, tel Adolphe Brongniart (1801-1876), professeur au Muséum national d'histoire naturelle, ou d'autres qui sont ses amis et dont il examine les herbiers.

Moquin-Tandon zoologiste est proche du célèbre Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), qui s'intéresse à sa monographie sur les hirudinées (les sangsues), composées, selon lui, d'individus élémentaires, ou «zoonites», en partie fondues ensemble ; les sangsues occuperaient une place dans le règne animal, entre des animaux multiples, composés d'individus, les polypiers, et des animaux unitaires, ou vertébrés, dont on ne voit plus l'agrégation. Les deux savants partagent les mêmes conceptions sur l'unité des êtres vivants et la marche progressive de la nature, avec la complexité croissante des animaux. Leurs nombreuses rencontres nous valent un portrait de l'illustre Geoffroy Saint-Hilaire qui, à 62 ans, est toujours impétueux, fougueux, ayant la manie de «composer des mémoires du soir au lendemain» et commençant, semble-t-il, à lasser les honorables auditeurs de l'Institut : «L'activité intellectuelle de M. Geoffroy est étonnante, mais son aptitude à l'observation diminue de jour en jour ; il a le feu de la jeunesse, mais non pas la réserve de l'âge mûr. Son fils s'aperçoit des bizarreries paternelles ; il en souffre. Dernièrement, à l'Institut, il sortit de la salle quand son père commença sa longue et

assommante homélie sur les milieux et leur vertu modifiante. [...] L'ardeur du vieux Geoffroy ne connaît pas de bornes.» Moquin-Tandon se prend à souhaiter plus de calme et de réflexion chez son collègue, et plus de génie chez le fils Isidore (1805-1861), qui se borne «à présenter les idées des autres».

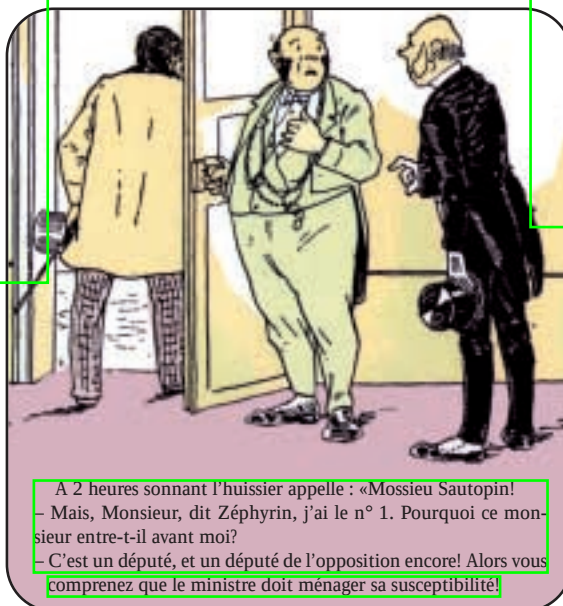
L'écrasant Georges Cuvier (1769-1832) est mort depuis deux ans, mais, depuis le terrible affrontement de 1830 à l'Académie des sciences, la querelle des analogues (il y a entre les organes des différents animaux des analogies évidentes, d'autres qui le sont moins, mais tous les matériaux organiques sont présents d'une famille à l'autre), la rancœur de Geoffroy Saint-Hilaire est toujours aussi tenace : «Chaque jour enlève une pierre de l'édifice de gloire de Cuvier. Ses grands aphorismes, présentés comme des vérités immuables, se détruisent les uns après les autres. Son *Règne animal* est un mauvais livre, surtout la dernière édition.»

L'influence de Cuvier est encore terriblement présente, et Moquin-Tandon écrit : «Le grand homme dormait dans la tombe et son ombre donnait encore des places à ses protégés.» Il est certain que si Étienne Renaud Augustin Serres (1786-1868), disciple de Geoffroy Saint-Hilaire, s'était rallié à Cuvier, son poste de professeur au Muséum aurait été assuré.

Désenchanté, le narrateur juge les maîtres de la science : «La connaissance des savans de Paris a bien diminué en moi le respect que je portais à tous les hommes qui ont pénétré dans le sanctuaire de la Science ; j'ai remarqué d'abord que beaucoup de ces messieurs étaient fort au-dessous de leur réputation. L'usurpation de gloire est à Paris assez commune, [...] beaucoup d'hommes arrivent au sein de l'Institut ou dans les facultés, appuyés non pas sur des livres, sur des titres réels, mais sur des parents et des amis ; on m'a rapporté des exemples de fraudes académiques ou professorales qui ont bien surpris mon innocence de province.»

Ce livre est un vrai bonheur pour l'historien des sciences, qui a l'impression de retrouver de vieux amis dépeints avec la finesse d'un observateur lettré. La promenade dans Paris est charmante. En dehors de ses rendez-vous scientifiques, Moquin-Tandon flâne, pratique le «bouquinage», visite les monuments et les expositions, ne rate pas une représentation de théâtre, dîne en ville et ne déteste pas profiter quelque propos parisien.

Les savants sont aujourd'hui devenus des chercheurs. Ils se sont spécialisés à l'extrême, ont rangé



A 2 heures sonnait l'huissier appelle : «Mossieu Sautopin !
- Mais, Monsieur, dit Zéphyrin, j'ai le n° 1. Pourquoi ce monsieur entre-t-il avant moi ?
- C'est un député, et un député de l'opposition encore ! Alors vous comprenez que le ministre doit ménager sa susceptibilité !

Comme le savant Cosinus, Alfred Moquin-Tandon obtint difficilement un rendez-vous avec son ministre de tutelle.

l'histoire naturelle au rayon de l'obsolescence, mais ils intriguent toujours pour faire carrière. Y aura-t-il un cyberdianariste pour nous le raconter ?

Michèle FEBVRE

Océanographie

Le livre de la mer

Éditions Larousse, 1998.

Qui dit Larousse pense dictionnaire ; cette métonymie est homologuée. Le titre du *Livre de la mer* annonce aussi, sans ambiguïté, un ouvrage de référence. Or, si la mer demeure, fort heureusement, infinie et insondable pour l'âme humaine, elle ne l'est plus pour les professionnels, que ceux-ci soient biologistes, chimistes, physiciens, géologues, navigateurs, exploitants pétroliers, juristes, politiques ou militaires... Sous tous ces aspects, on sait maintenant beaucoup de choses sur la mer (on en trouve aussi de nouvelles chaque jour) ; on sait qu'elle ne fait pas n'importe quoi, et que l'homme non plus ne peut pas en faire n'importe quoi. Curieusement, deux mots, océanographie ou océanologie, coexistent pour englober l'ensemble des recherches de toutes catégories qui se consacrent au milieu marin, lequel couvre 71 pour cent de la superficie de la planète. Comme s'il existait une «continentologie» pour les sciences et les techniques qui se pratiquent sur les 29 pour cent restants !

Alors, avant d'ouvrir *Le livre de la mer*, on sait que l'on n'y trouvera pas tous les sujets, même en 360 pages, 700 photographies et 15 cartes. Et l'on doit bien s'attendre à ce que chacun des sujets traités ne le soit que sommairement.

À qui l'ouvrage est-il alors destiné ? Le premier réflexe est un coup d'œil au verso de la couverture. Mauvais début : «Pour tous les amoureux de la mer, un livre illustré et animé par des récits de champions, d'aventuriers et d'écrivains. Un panorama complet de la mer et de ses richesses.» Une telle description se veut évidemment accrocheuse, mais elle n'accrochera pas tout le monde. Les scientifiques, notamment, vont tiquer. Relevant de cette espèce, je cède à un second réflexe, celui de voir si je connais l'auteur : ils sont au nombre de 17, et je n'en connais aucun de près ni de loin. Échange d'amabilités : eux non plus ne me connaissent pas, mais cette imperméabilité entre deux communautés est troublante. Notons qu'une équipe éditoriale et des services

techniques, à concurrence de 23 personnes, ont géré le travail des 17 auteurs.

Il est temps d'ouvrir le livre. En voici le contenu, par centres d'intérêt regroupés ici de manière toute personnelle : histoire de la géographie maritime (13 pages), tourisme, sports nautiques, plongée, courses et régates (75 pages), pêche et autres ressources (37 pages), navigation marchande et militaire (19 pages), peuplements animaux et végétaux (55 pages), mesures de protection biologique (13 pages), atlas (33 pages). Larousse oblige, le livre se termine par un dictionnaire de 2 000 mots en 93 pages.

Il faut dire du bien de cet ouvrage, parce qu'il est attrayant, assez insolite, informatif. Les cartes sont remarquables, à commencer par les 12 cartes du chapitre «Atlas», avec leur découpage et leur présentation inédites : ce découpage est géopolitique autant qu'océanographique, et il est bon de disposer en 1998 de représentations de l'Atlantique du Nord-Est, de la mer de Chine ou encore du Pacifique entre la Polynésie française et l'Australie. On trouve, entre deux pages, des encadrés excellents, tels ceux sur la météorologie, les îles, la plongée, la pêche, les ressources autres que vivantes, le balisage. Les photographies ne sont pas seulement belles, mais didactiques, malgré des légendes souvent naïves, comme s'il fallait bien mettre quelque chose. Existait-il une liste des musées maritimes et des aquariums de France ? On trouvera ici 73 adresses (auxquelles on ajoutera, au moins, celle de l'Observatoire océanologique de Banyuls). Plus douteux est l'intérêt d'une énumération des organismes français ou internationaux en charge de la gestion et de la connaissance des océans, car les omissions y sont criantes : deux institutions françaises y figurent, mais pas le CNRS, ni les universités, ni les grands établissements, qui, pourtant, rassemblent le gros des troupes de l'océanographie française, avec un peu plus de 1 000 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens. Parmi les organismes internationaux sont omis le Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM, à Copenhague) et la Commission internationale pour l'exploration scientifique de la mer Méditerranée (CIESM, à Monaco).

Deux options caractérisent ce livre.

D'une part, et l'on ne peut lui en faire grief, puisque c'est délibéré, son côté «littéraire». Les citations ou extraits, empruntés aux meilleurs auteurs océanophiles des deux derniers siècles, totalisent 35 pages. Soit, mais le lyrisme a tendance à déteindre sur tout le volume. Tel est le cas de tout le chapitre biologique, qui n'échappe pas à l'anthropomorphisme et aux simplismes ; ses deux pages sur le plancton, avec clichés ringards et vraies

bourdes, sont à refaire, même pour le grand public.

L'autre option est le privilège donné à la mer en tant qu'usage et objet de consommation, de préférence à la mer comme objet de connaissance. On apprendra ici peu de choses, ou rien, sur la composition de l'eau de mer, sur les courants, sur les océans anciens, sur l'instrumentation en milieu marin (bouées, sondes, satellites), sur les omniprésentes bactéries. Certains sujets, étant donné leur actualité, voire leur attrait médiatique, sont malheureusement occultés. Ainsi il n'est question ni des dorsales océaniques, ni de volcanisme et chimiosynthèse associée, ni de la découverte du picoplancton (les micro-organismes marins de moins de deux micromètres de diamètre), ni de régulation globale du système océan-atmosphère, ni de l'élévation générale du niveau marin, ni des oscillations thermiques pluriannuelles ; enfin le droit de la mer et les zones économiques sont omis.

Un *Livre de la mer* est aujourd'hui une gageure. Conclure cette analyse en serait une autre ; on voudra bien m'en dispenser. Une suggestion, seulement, dans l'éventualité d'une nouvelle édition ou d'un projet similaire : constituer un petit comité comprenant des scientifiques ou, du moins, consulter ceux-ci. Après tout, mes semblables et moi-même répondons tous les jours à des appels téléphoniques du grand public ou des journalistes. Les échanges peuvent se révéler oiseux ou décevants, mais il faut toujours essayer !

Alain SOURNIA

Psychiatrie

Psychothérapies

Tobie Nathan, avec Alain Blanchet, Serban Ionescu, Nathalie Zajde. Éditions Odile Jacob, 1998.

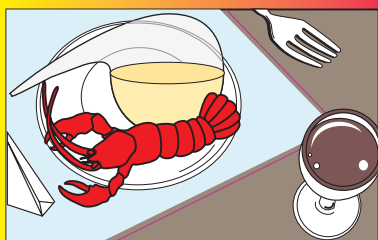
Tobie Nathan trouve trop restrictive la description actuelle de la psychothérapie, «thérapeutique de l'esprit par l'esprit», par opposition à la thérapeutique par les médicaments. Elle est pourtant déjà très large ! La psychanalyse a introduit l'idée qu'il existe des interactions d'inconscients. T. Nathan veut aller plus loin, considérant que l'idée d'une séparation corps/esprit est déjà une prise de position théorique, voire philosophique. Il refuse une localisation de l'inconscient dans l'individu, mais admet un inconscient culturel dont les composants seraient chaque individu participant à l'inconscient

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 30 septembre 1999.

FRANCE

info

collectif. Il propose donc une définition plus vaste, englobant dans la psychothérapie «toutes les procédures d'influence destinées à modifier radicalement, durablement, une personne ou une situation».

Une véritable psychopathologie scientifique doit, selon lui, partir de la description des thérapeutes et de leurs techniques, et non du classement des symptômes, comme nous le faisons. Il veut prendre en compte les éléments magiques qui nous entourent et qui peuvent aussi servir à influencer l'être humain. C'est ainsi que, dans le premier chapitre, il évoque les magiciens d'Afrique, qui, pour lui, sont d'authentiques psychothérapeutes. Il présente des exemples cliniques précis, qu'il a observés, de modifications du comportement et de l'état d'esprit de personnes sous l'action de procédés que nous nommerions magiques.

L'auteur du chapitre suivant, A. Blanchet, fait un parallèle entre les différentes psychothérapies, dont il étudie les grandes constantes. Il existe plus de 400 psychothérapies ou types de psychothérapies, nous explique-t-il, et l'ouvrage évoque les trois plus importantes : la psychanalyse, la psychothérapie systémique, la psychothérapie cognitive. Selon lui, les psychothérapies occidentales sont toutes valables, mais elles théorisent différemment.

Malheureusement, faute de définitions en langage clair, le non-spécialiste ne s'y retrouvera pas. Il pourra en revanche connaître enfin les raisons du silence du thérapeute : le silence évite que la cure ne devienne une discussion conviviale et permet la mise en exergue de déclarations importantes du patient, leur réinterprétation et leur réécoute par le patient lui-même, qui le font évoluer dans sa réflexion.

S. Ionescu aborde ensuite le problème difficile et controversé de l'évaluation des psychothérapies. La difficulté est considérable, parce que le but de l'évaluation est de rendre objectif ce qui est subjectif : comment alors trouver des critères objectifs à une psychothérapie ? De surcroît, le caractère technique de certaines explications les fait réserver plutôt à des spécialistes.

Enfin, l'ouvrage comporte un intéressant chapitre sur le traumatisme, dû à Nathalie Zajde. Celle-ci définit le traumatisme comme un «événement de vie laissant traces». Elle fait un parallèle entre le monde occidental, qui préconise l'absence de traumatismes dans l'éducation des enfants, et le monde traditionnel qui, au contraire, revendique une certaine forme de traumatisme comme essentiel à la transmission de l'existence. Cette espèce de codification des traumatismes dans le monde traditionnel n'existe pas chez nous. Nous pensons que grandir est une matu-

ration spontanée, par l'éducation, mais pas par des codes ou des événements codifiés. C'est une façon de considérer autrement le traumatisme. Nous autres Occidentaux le considérons toujours comme négatif, qu'il surgisse accidentellement ou qu'il fasse partie d'un rituel.

L'auteur évoque aussi le traumatisme de la torture. C'est une forme de torture que d'anéantir l'esprit et les pensées de quelqu'un parce qu'il est déviant. L'auteur avance que la torture induit un traumatisme de non-sens : elle a plus souvent pour but, non pas tant de faire souffrir physiquement (pour obtenir des renseignements, par exemple), mais de faire souffrir pour rien. On cherche à détruire la personne totalement, pour qu'elle ne puisse même plus se revendiquer d'une raison à cette torture. Il y a donc traumatisme par le non-sens. N. Zajde développe des explications intéressantes sur l'utilisation du traumatisme dans la torture, qui aboutit à une dépersonnalisation de l'individu et qui constitue en quelque sorte une psychothérapie négative.

Au total, cet ouvrage se situe au-delà des débats habituels des ouvrages de psychothérapie qui essayaient plutôt de montrer que telle psychothérapie était meilleure que telle autre. On trouve plus rarement des ouvrages parlant, comme ici, des psychothérapies dans leur globalité, mais, contrairement à ce qui est annoncé sur la quatrième de couverture («comment guérit-on de troubles psychiques ? quelle psychothérapie nous donne le plus de chances de guérir ? (...) à lire avant de consulter...»), il est réservé essentiellement aux spécialistes.

Elisabeth HOFFMANN
et Elisabeth BACON

Médecine

La nutriprévention

Michel Massol. Presses universitaires de France, 1997.

La nutrithérapie

Michel Massol. Presses universitaires de France, 1998.

Ce n'est plus le salut de notre âme qui nous préoccupe, mais bien plutôt notre santé ici-bas, à laquelle nous consacrons dix à quinze pour cent du produit intérieur brut, dans les pays industrialisés. Les acteurs et les groupes de pression de cet énorme

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

Tél : 01-55-42-84-00

<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Séverine Merviel et Marie Hubert. Direction financière : Anne GUSDORF. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Bénéteau. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Thierry Alletau, Leïla Bellon, Michel Brune, Paul Decaix, Évelyne Host-Platret, Christian Jeanmougin, Marie-Thérèse Landousy, Valérie Martin-Rolland, Sophie Maurogordato, Marie-Louise Michel, Claude Olivier, Bernard Pantin, Guy Paulus, Daniel Vignaud.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman : John Hanley. Co-Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Marie Hubert.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être 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.

marché s'ingénient à entretenir et à exalter cette obsession en maintenant une offre massive et toujours renouvelée. La médecine classique ayant épuisé les capacités du financement social collectif, d'autres offres apparaissent, misant sur l'attrait de démarches nouvelles, pour lesquelles le public accepterait le non-remboursement.

L'alimentation et la nutrition sont de ces nouveautés qui jouissent d'une faveur grandissante. Sans doute parce que l'argument de la santé fait vendre aussi dans ce secteur, mais de plus en plus parce que le public a le légitime souci d'approches thérapeutiques originales et pertinentes, auxquelles les médecins ne restent plus indifférents.

Les petits livres de Michel Massol, chimiste et médecin à Toulouse, examinent cette question. D'abord rompu à la chimie et à la biochimie, il peut prétendre exercer ses compétences de médecin dans un cadre conceptuel élargi : par exemple, une fois reconnue, vers 1970, la nocivité des superoxydes produits dans les cellules, il a conçu une stratégie de lutte contre les agents oxydants, à l'aide de l'alimentation.

Le premier volume, *La nutripénétration*, est une approche globale du maintien de la santé et de la prévention des maladies liées au vieillissement par une attention éclairée portée à l'alimentation et à la nutrition ; l'auteur n'exclut pas la variation des plaisirs gustatifs et la convivialité.

Il est établi que certaines populations sont protégées contre l'infarctus et contre des formes de cancer alors qu'elles ne diffèrent que par leurs habitudes alimentaires. C'est la preuve que la démarche est pertinente... et que la méthodologie reste à trouver. La transposition à l'individu de tendances observées dans les populations est difficile. Certes, nous avons de bonnes raisons de persévérer dans notre fameux «régime français», qui se corréle si bien avec une faible prévalence des maladies cardiovasculaires, mais des études devront encore en identifier les caractéristiques.

Le passage à une nutrithérapie, objet du second volume, est encore plus délicat. Il est incontestable que les aliments sont familiers à notre organisme, qui en utilise activement une partie (les «nutriments») pour son métabolisme et ses multiples régulations. Ces nutriments y sont donc bien acceptés dans une large gamme de situations, voire bienvenus quand il y a carence. La médication chimique, elle, est à la fois plus efficace et plus dangereuse : une molécule active perturbe – c'est d'ailleurs le but qu'on vise en l'administrant – le milieu intérieur, dans un sens que le médecin espère favorable,

mais l'action s'accompagne souvent d'effets nocifs qualifiés de «secondaires»...

Sans rejeter la médecine classique, M. Massol montre sur de multiples exemples comment et pourquoi le médecin ne peut plus avoir le réflexe de la prescription exclusivement médicamenteuse, qu'il doit accompagner de conseils diététiques précis, et faire suivre d'un bilan nutritionnel approfondi, incluant éventuellement une complémentation ou une supplémentation en certains éléments. Parti, en bon chimiste, d'une médecine «orthomoléculaire» telle que l'envisageait le chimiste américain Linus Pauling, sa stratégie est aujourd'hui systémiste : il propose de corriger et d'agir partout en même temps, en pensant au plus grand nombre d'interactions et de rétroactions possibles.

La voie qu'il propose s'appuie sur une information nuancée (il pose souvent des questions plutôt que des affirmations), mais aussi complète que possible, menée de façon active auprès du public, des patients, des médecins. Il prône plus de responsabilité dans les choix alimentaires et, même, dans l'hygiène de vie, mettant notamment en garde contre ce qu'il nomme les «oani», objets alimentaires non identifiés, dont on nous inonde.

On sait aujourd'hui que ce sont des carences alimentaires, et non des excès, qui constituent le principal facteur nutritionnel de l'hypertension artérielle, mais le modèle de la carence a certainement ses limites. D'abord, on est parfois conduit à se demander si elle est une cause ou une conséquence : ainsi l'anémie vient plus souvent d'un état inflammatoire que d'une carence en fer. Ensuite la supplémentation ou l'enrichissement au-delà de ce qui est reconnu comme nécessaire présente des risques, et l'on connaît encore bien mal les effets de ces actions. Ces questions auraient mérité d'être évoquées dans les deux livres de M. Massol. On regrette aussi que les effets attendus des suppléments n'aient pas été comparés.

Si le rôle du médecin prescripteur est de «mettre en scène, d'organiser une rencontre entre des molécules et un organisme vivant et pensant», l'innocuité peut être plus importante que l'efficacité strictement biologique. De ce point de vue, la nutrithérapie est bien placée pour déboucher sur une nutrithérapie, thème que l'auteur propose dans un troisième volume à paraître.

Maurice PASDELOUP

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>