

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Octobre 1998

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Les débris
dans l'espace

L'irrigation
à l'eau de mer

Les jeux
de Martin Gardner

La machine Z
et la fusion nucléaire

Des ordinateurs à ADN

Le Gondwana,
supercontinent ancien



Canada : \$ 8,75

Les maux de dos



JEU-CONCOURS

Caucher d'ordinateur

par Pierre Tugne

6



BLOC-NOTES

de Didier Nodon

7

TRIBUNE DES LECTEURS

8

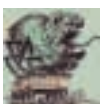


SCIENCE ET ASTRONOMIE

Espèces de truffes

par Hervé Tis

10



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Les pandémies de choléra

12



POINT DE VUE - DOPAGE

Il faut suivre les sportifs

par Jean-Paul Escande

16



Comment soigner les athlètes

17

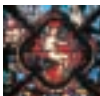


SCIENCE ET ÉCONOMIE

La monnaie?

par Bernard Guerrien et Sophie Jallais

20

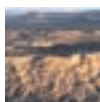


PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

22



■ Des crustacés (p. 22) ■ Vitraux vivants (p. 22) ■ Vieux jeu ■ Dopage bénéfique ■ La plus ancienne tortue marine connue ■ Un virus de cheval ■ Désintégration de cryptons ■ Les manchots

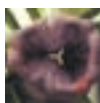


VISIONS MATHÉMATIQUES

Des sculptures en ciment

par Ian Stewart

102



L'IMAGE DU MOIS

Sur la piste du nectar rouge

par Jens Olsen

104



LOGIQUE ET CALCUL

Le rangement de la boîte de cubes

108



SAVOIR TECHNIQUE

Le détenteur

par William Bowden

117



ANALYSES DE LIVRES

118

■ Tazieff, le joueur de feu, de Roger Cans
■ L'esprit en image, de M.I. Posner et M.E. Raichie
■ Chronologie des sciences et des techniques, de Jean Rosmorduc ■ Chronologie d'histoire des sciences

Le mal de dos

38

par Richard Deyo

De très nombreuses personnes souffrent de douleurs du bas du dos dont l'origine est mystérieuse. Divers traitements sont utilisés, mais la stratégie la plus efficace est souvent d'attendre que la douleur disparaisse spontanément.

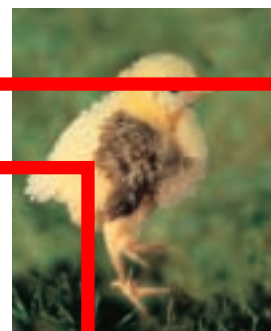


Les chimères de caille et de poulet pour étudier l'embryogenèse

46

par Nicole M. Le Douarin

Les greffes de cellules de caille sur des embryons de poulet ont apporté des informations sur les mécanismes de développement du système nerveux, du système sanguin et immunitaire, et sur la localisation cellulaire de certains comportements innés.



Calculer avec l'ADN

56

par Leonard Adleman

L'utilisation d'ADN pour résoudre des problèmes mathématiques conduit à repenser la notion de calcul.



Le Gondwana

64

par Roland Trompette

Le supercontinent du Gondwana, père de la plupart des continents actuels, a vécu 400 millions d'années. Les géologues retracent l'histoire de son assemblage, de sa fragmentation et reconstituent les climats qui y régnaient.

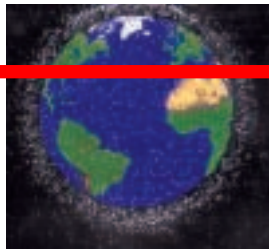


La pollution spatiale

72

par **Nicholas Johnson**

Les nombreux objets mis en orbite autour de la Terre, en même temps que des satellites, menacent aujourd'hui la sécurité des missions spatiales.

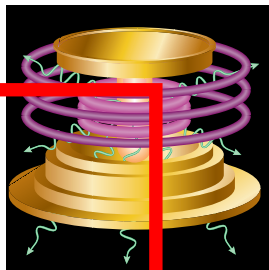


Fusion nucléaire et striction axiale

78

par **Gerold Yonas**

Un dispositif nommé machine à striction axiale déclenchera la fusion nucléaire contrôlée à l'aide de bouffées de rayons X intenses et brèves.



Les jeux mathématiques

86

par **Martin Gardner**

Encore trop méconnus, les jeux mathématiques sont à la fois des moteurs pour l'enseignement et pour la recherche. Certaines de leurs applications sont imprévues.



L'irrigation à l'eau de mer

96

par **Edward A. Stoltz, Jed Brown et James O'Leary**

La culture de plantes résistant au sel permettrait la production d'aliments pour le bétail dans des zones désertiques.

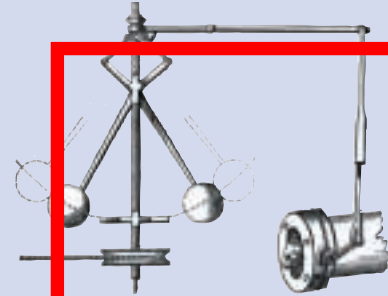


Sur notre site Web (<http://www.pourlascience.com>), vous trouverez des compléments bibliographiques à propos des articles de *Pour la Science*.

ÉDITORIAL

Le génie du vivant, compris et imité

Souvenons-nous de la merveille technique qu'était le régulateur de Watt. Deux masselottes sont reliées, par des tiges articulées, à un arbre tournant ; la force centrifuge écarte les masselottes proportionnellement à la vitesse de rotation de l'arbre, de façon à commander l'ouverture d'une soupape. Quand l'arbre tourne trop vite, la soupape se ferme et la puissance du moteur entraînant l'arbre diminue. Et réciproquement.



Admirable d'ingéniosité, mais d'une efficacité éphémère comparée à la régulation nécessaire à la fabrication de l'embryon. Le devenir de chaque cellule, déterminé potentiellement par son code génétique, est réglé par son environnement (voir *Les chimères de caille et de poulet pour étudier l'embryogenèse* par Nicole le Douarin, page 46) selon des processus biologiques d'une formidable précision. L'inventivité de l'évolution est cent coudées au-dessus de la pensée humaine, logique et binaire.

Aussi pourquoi ne pourrions-nous pas tirer parti des processus biologiques pour résoudre nos difficultés techniques ? Une variante du problème du voyageur de commerce consiste à relier par un chemin un certain nombre de villes sans repasser deux fois par la même ville. Quand le nombre de villes dépasse une centaine, la puissance calculatoire nécessaire est hors de portée des plus puissants ordinateurs classiques.

En codant chaque nom de ville par une séquence de bases de l'ADN, l'«ordinateur à ADN» associe les différentes villes et retrouve, dans la sauce biologique, la suite de séquences correspondant au chemin reliant convenablement toutes les villes (voir *Calculer avec l'ADN*, par Leonard Adleman, page 56).

Sans l'exemple donné par la vie, nous n'aurions pas pensé à concevoir de tels dispositifs. Ils pourraient constituer les ordinateurs du futur qui calculeraient «comme la vie».

Philippe BOULANGER

JEU-CONCOURS N° 52

Cauchemar d'ordinateur

Nous allons examiner une récurrence où la difficulté calculatoire est imprévue. Considérez l'échiquier arithmétique de cinq cases de côté de la figure ci-contre. Les cases, notées $A(m, n)$, sont repérées par leur abscisse et ordonnée entières m et n , comprise entre 0 et 4. On remplit cet échiquier de la façon suivante :

- a) $A(0, n) = n + 1$ pour $n \geq 0$
- b) $A(m, 0) = A(m - 1, 1)$ pour $m \geq 1$
- c) $A(m, n) = A[(m - 1, A(m, n - 1))]$ pour m et $n \geq 1$

On a représenté sur la figure le début du remplissage de l'échiquier. Saurez-vous le compléter ? Un conseil : n'essayez pas de confier cette tâche à votre ordinateur, il risque d'avoir des problèmes de mémoire ! En particulier, combien de chiffres décimaux faudrait-il nécessairement écrire pour donner le nombre de la case $A(4, 4)$?

4		6	11			A(4,4)
3		5	9			
2		4	7	29		
1		3	5	13		
0	1	2	3	5	13	
n						

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, 8, rue Frouin, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'octobre 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 50

Pour amener les trois ouvriers et la caisse d'outils en bas de l'immeuble, il faut au moins deux traversées de système des deux paniers. Si l'on désigne les ouvriers par leurs initiales E, F, G et la caisse d'outils par C, la droite indique ces 11 manœuvres dans les colonnes Montée et Descente. Remarquons d'autre part que l'on peut inverser les manœuvres 3 et 4, 5 et 7, 8 et 9, ce qui conduit à 8 variantes possibles.

Pour résoudre le problème du quatuor, il suffit de faire les deux remarques suivantes :

- 1) Pour faire traverser le quatuor, cinq traversées sont nécessaires dont une durera dix minutes pour faire passer Daniel.
- 2) Sept minutes restent pour les quatre traversées restantes qui ne peuvent se décomposer qu'en $7 = 2 + 2 + 2 + 1$, c'est-à-dire que Claude doit passer avec Daniel. D'où la solution André et Bertrand passent le pont, André revient,

Claude et Daniel passent, Bertrand revient et enfin André et Bertrand passent. Une autre variante consiste à faire revenir Bertrand plutôt qu'André.

	MONTÉE	DESCENTE
1		C
2	C	G
3	E	F
4		C
5	F + C	E
6		C
7	C	G
8	G	F
9		C
10	C	G
11		C

Une science sous influence

Sachez penser par vous-même ! Si l'on n'y prend pas garde, cette jonction passerait pour émancipatrice. Justement, prenons garde ! Elle se lit en grosses lettres sur un bus publicitaire affrété par une secte, la scientologie.

Ce mot d'ordre, «sachez penser par vous-même», a pu être libérateur à l'époque des Lumières. Il s'agissait de secouer l'autorité d'Aristote ou de l'Église. Mais ce même mot d'ordre, les circonstances avant changé, devient aliénant. Chacun de nous doit prendre conscience du fait qu'il est soumis à mille déterminants dont il n'a pas conscience. La lucidité exige de savoir que nul ne peut être totalement lucide sur lui-même. Nous sommes tous, et tout le temps, sous influences. La pire étant de prétendre que nous pouvons atteindre à une parfaite pureté du moi.

Fermer la bouche....

«J'ai une vie privée trop irrégulière pour me permettre d'avoir des opinions politiques.» Ce n'est pas le président Clinton qui dit cela, mais le personnage de Don Juan dans une pièce de Montherlant (*La Mort qui fait le trottoir* II, IV).

Tous autant que nous sommes, nous devrions, me semble-t-il, nous inspirer de cette modestie, et déclarer : «J'ai, sur le monde, des idées trop imprécises et trop contradictoires pour me permettre de me réclamer d'un système conceptuel organisé».

tantité, sa hardiesse révolutionnaire, et cette énergie incommode et sauvage qui caractérise la nature des plus grands génies, appelés toujours à détruire les modes caducs et à jeter les fondements des mondes nouveaux. Il gagne sans doute en politesse en sagesse utilitaire et pratique ce qui perd en puissance de pensée. Il se corrompt, en un mot.»

Les lignes bien argumentées ont de quoi faire honte à ceux, pas moins nombreux parmi les scientifiques qu'ailleurs, qui recherchent les honneurs. C'est tellement vrai, que dit cet auteur !

Eh bien non. Il reste une échappatoire pour balayer son propos et l'écarter sans même avoir à le réfuter. Grâce au Ciel, l'auteur en question a une réputation désastreuse. Il s'agit de Michel Bakounine, théoricien de l'anarchisme (*Dieu et l'État*, Éditions Mille et une nuits, 1996, p. 38-39). Comment un anarchiste pourrait-il dire quoi que ce soit de pertinent ? Vivent les honneurs, donc, et les académies !

Plus ou moins juste

Sollicité pour écrire un article de revue, j'ai relu la précision suivante : «Votre texte peut être égal, inférieur ou supérieur à 10 pages.» Sous son apparente absurdité, la directive est claire : l'article doit faire à peu près dix pages.

Évidemment, si on a l'esprit réglementé, on ne peut que sourire. Un savant Cosinus qui prétendrait formaliser cette injonction parviendrait, au bout de calculs probablement longs, à quelque chose comme : $L < 10$ ou $L = 10$ ou $L > 10$.

Delivrance

Vient un âge où il faut s'y résoudre. Parmi les livres que vous aurez encore l'occasion de lire, plus aucun ne jouera un rôle formateur. Les livres pourront vous intéresser, vous informer, vous distraire — ou vous fâcher. Ils ne pourront plus orienter votre façon de penser. Trop tard. Le pli — votre pli — est pris, et ne changera plus que sur des détails.

Bien sûr cela est triste. Mais pas seulement. On ne peut s'enthousiasmer pour quelque thèse novatrice et iconoclaste que si l'on n'a pas compris que cette thèse, à son tour, se verra forcément accusée, sous peu, de participer d'une vision du monde datée, dépassée. Or, presque à coup sûr, cette accusation sera méritée ! La joie la plus communément employée par les auteurs ambitieux, en effet, est de renier bruyamment les insuffisances de leurs prédécesseurs. Mais cela ne peut se faire qu'au prix d'autres insuffisances. Nos prédécesseurs étaient-ils plus bêtes, moins érudits que nous ? Bien sûr que non. Seulement, contredire est vital ; c'est la meilleure façon d'exister, sinon la seule. Qu'il y ait à soutenir une thèse peu fondée. Quant au lecteur emballé par tel ou tel nouveau mouvement de pensée, c'est celui qui croit que ce qui est conquis l'est pour de bon. Bref, il est jeune.

Alors, il y a peut-être pas que de la sclérose dans l'impossibilité de s'enthousiasmer. Peut-être y a-t-il aussi un peu d'intelligence acquise.

Émouvants géniteurs

Si nous sommes volontiers attirés devant des photos anciennes représentant quelque scène banale de la vie quotidienne, c'est que nous éprouvons une reconnaissance émue envers les hommes et femmes photographiés. Peut-être, pris dans les vents mauvais de l'histoire, ont-ils participé à des horreurs, quelque temps après cette photo où ils ont l'air braves et tranquilles. N'empêche : si agressifs ont-ils pu être, ils n'ont pas tout bousillé, puisque nous sommes là, bien vivants, nous, leurs descendants. En cela, ils ont une innocence que nous ne sommes pas sûrs de partager avec eux, hantés que nous sommes par l'angoisse de causer des désastres (écologiques ou autres) rendant impossible la vie des générations futures.

Ex nihilist

«Le plus grand génie scientifique, au moment où il devient un académicien, un savant officiel, patenté, baisse inévitablement et s'endort. Il perd sa spon-

rien, qu'un résultat pareil donne peu de renseignements sur la quantité L.

La formalisation est incompatible avec les maladresses d'expression. C'est pour cela que son champ d'application aux affaires humaines est tellement limité.

Du nouveau sous le soleil?

Quand il pleut, faut-il courir pour se mouiller moins ? La question est souvent posée, parfois même résolue. Maniaques du bronzage, nous ne posons jamais, que je sache, une question complémentaire. Pourtant, j'en suis sûr, elle mènerait à des développements théoriques non moins instructifs.

Vous êtes dans une ville écrasée de chaleur, vous êtes à l'ombre, mais voilà que vous devez traverser une immense place dénudée sur laquelle le soleil frappe de toutes ses forces. Dilemme ! Si vous courez, vous avez plus chaud ; si vous marchez, l'exposition au soleil dure plus longtemps. Quelle est la solution idéale pour minimiser les risques d'attraper un coup de chaleur ?

Échos du bang

J'ai été très intéressé par l'article *Le bang sonique* de François Coulouvrat (voir *Pour la Science*, août 1998), mais quelle est, finalement, la raison pour laquelle on perçoit un «bang»?

Pierre FAESSEL, Meudon-la-Forêt

L'article de F. Coulouvrat explique qu'il n'existe pas de «mur du son». J'ai pourtant entendu des pionniers des vols supersoniques raconter les vibrations subies par l'avion à l'approche de la vitesse supersonique, et la difficulté d'atteindre celle-ci.

Hypolite BAECKER, Thann

Réponse de François COULOUVRAT

Contrairement à l'opinion courante, le phénomène du bang sonique ne se produit pas uniquement lorsque l'avion vole exactement à la vitesse du son (lorsqu'il franchit le «mur du son»), mais continuellement pendant toute la phase de vol supersonique. Comme il est expliqué dans l'article, en vol supersonique, le son émis par l'avion est contenu à l'intérieur du cône de Mach. Un observateur fixe, au sol par exemple, suit, lorsqu'il passe à travers le bord du cône de Mach, une brusque variation de pression, appelée «onde de choc», qui produit la sensation auditive de «bang» sonique, la plus gênante du point de vue de la perception auditive. Pour un avion de forme compliquée, il se produit plusieurs ondes de chocs successives, mais, comme je l'ai expliqué dans l'article, elles se propagent à des vitesses légèrement différentes et ont tendance à fusionner.

À l'intérieur du cône de Mach, derrière l'onde de choc, le son total résulte d'un processus d'interaction complexe entre les bruits émis par tous les points de l'avion à différents instants. Si l'on se place suffisamment loin de l'avion (à quelques fois sa longueur ou son envergure), seules les contributions se propageant dans les directions normales au cône de Mach interfèrent de manière constructive. Ceci fait que l'ensemble du bruit significatif se propage le long des mêmes rayons normaux au cône de Mach que les ondes de chocs.

Quel rapport alors entre le bang sonique et les déboires des premiers avions qui ont tenté de franchir le mur du son? Lorsqu'un avion vole un peu au-dessous de Mach 1 (la valeur précise dépend de la géométrie particulière de l'avion), même si globalement l'écoulement est subsonique, localement il peut devenir supersonique, par exemple sur le profil supérieur de l'aile, où l'air est accéléré. Il existe alors une petite zone d'écoulement supersonique autour de l'aile, avec un choc local. On dit que l'écoulement est

transonique. Lorsque l'avion accélère et se rapproche de Mach 1, cette zone augmente en taille et se déplace, jusqu'à former le cône de Mach.

Cette modification rapide de l'écoulement autour de l'avion modifie la portance et la traînée, et donc l'équilibre de l'avion. Lors des premières tentatives de franchissement du mur du son, ces phénomènes étaient inconnus. Les avions n'étaient pas conçus, et les pilotes pas préparés pour y faire face, ce qui a conduit à des accidents parfois dramatiques. Aujourd'hui, heureusement, ils sont parfaitement maîtrisés, et même les avions de ligne usuels volent en régime transonique (environ Mach 0,8) sans dommage. En raison de la stratification de la température atmosphérique, les rayons sonores sont déviés vers le haut : le bang émis à vitesse faiblement supersonique est renvoyé vers la haute atmosphère avant de toucher le sol. On n'entend donc pas encore franchir le «mur du son»! En revanche, si un avion (de chasse) vole en régime transonique à faible altitude, la zone locale d'écoulement supersonique peut toucher le sol. C'est le seul cas où le bang correspond vraiment au cas d'un avion atteignant la vitesse du son.

Autodidactes et créativité

Philippe Boulanger s'interroge sur les relations entre les autodidactes et les scientifiques professionnels (voir *Comment apprécier les autodidactes?*, *Pour la Science*, septembre 1998). Les autodidactes qui réussissent, tel Foucault, me semblent avant tout doués d'une grande créativité, comme les grands «scientifiques professionnels». Sans doute le système éducatif devrait-il favoriser l'émergence de cette créativité autant que développer les capacités à emmagasiner et à restituer de vastes étendues de connaissances.

Albert ARNAUD, Brives

Dangers contraceptifs

Sophie Christin-Maître et Philippe Boulanger (voir *La contraception masculine*, *Pour la Science*, juillet 1998) mentionnent, parmi les méthodes non hormonales potentiellement intéressantes pour bloquer la mobilité des spermatozoïdes et leur maturation, le traitement par le gossypol : en Inde, quelques équipes étudieraient la toxicité du gossypol et la cause de son effet irréversible. Le gossypol est une molécule que les biologistes cellulaires utilisent pour bloquer la communication intercellulaire portée par les membres d'une famille de protéines appelée connexines. Ces protéines

s'assemblent sous forme de plaques jonctionnelles formées de canaux intercellulaires. Ces structures, appelées «jonctions gap», permettent aux cellules d'échanger très rapidement, sans passer par le milieu extracellulaire, des métabolites de petite taille (sucre, pyruvate, ATP, peptides...), des ions et les seconds messagers hormonaux (AMP cyclique, phosphonutrites, calcium). La fonctionnalité de ces réseaux dynamiques de jonctions intercellulaires est physiologiquement essentielle dans l'embryon au cours du développement et dans un très grand nombre d'organes, y compris dans les cellules testiculaires. La circulation du muscle cardiaque est ainsi constituée par un réseau complexe de jonctions gap formées par plusieurs types de connexines. Le gossypol ne semble pas spécifique d'une connexine particulière au testicule. Ceci est gênant, joint à son mécanisme d'action toxique, entre autre, pourquoi cette molécule est toxique, et pourquoi elle n'est plus à l'essai en tant que contraceptif masculin.

Danièle SALTARELLI, Villejuif

Foucault et l'électricité

J'ai lu, comme l'article de William Tobin, l'éloge de Foucault (voir *Pour la Science*, septembre 1998) ne mentionne pas les travaux de celui-ci sur l'électricité. Tous les électriciens connaissent les «courants de Foucault», à l'origine de pertes d'énergie dans les machines tournantes et parfois mis à profit pour produire de la chaleur ou pour freiner un rotor.

François GALLET, Orsay

Réponse de William Tobin

Le rôle de Foucault dans la découverte de «ses» courants est à nuancer. Faraday a découvert les courants d'induction vers 1831 en cherchant à expliquer une observation d'Arago, de 1824 : les mouvements de l'aiguille d'une boussole sont freinés par la proximité d'une plaque de cuivre. En 1855, alors que les idées sur la conservation de l'énergie et sur l'équivalence mécanique de la chaleur se répandaient en France, Foucault s'est rendu compte que le travail nécessaire pour maintenir un conducteur en rotation contre les pôles d'un aimant contre la résistance produite par les courants d'induction devrait «suivre les nouvelles doctrines... se retrouver en valeur... Il a démontré l'effet en utilisant le tore en bronze de son gyroscope et «un fort électro-aimant», obtenait une chaleur «sensible à la main». Toutefois, Joule avait déjà publié une expérience équivalente en 1843, et avait même obtenu une valeur numérique pour l'équivalence mécanique de la chaleur.

D.R.



Espèces de truffes

HERVÉ THIS

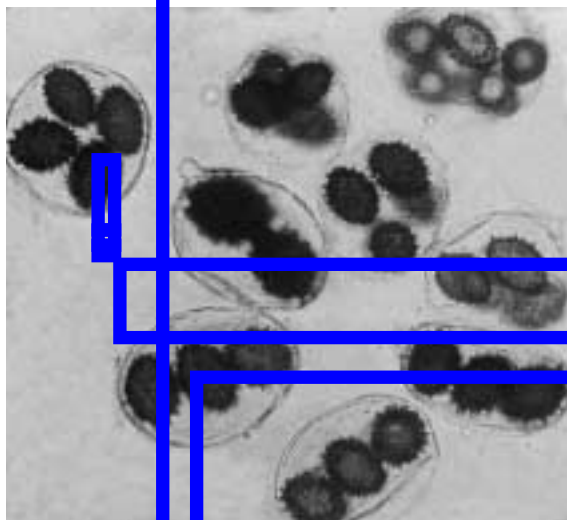
Les truffes noires sont toutes de la même espèce. La génétique montre que les truffes chinoises sont bien différentes.

Le diamant noir! Que d'encre élogieuse n'a-t-il pas fait couler! Pas un chroniqueur gastronomique ne l'omies, et pas un restaurateur ne le méprise quand il vise des étoiles. Depuis des siècles, on discute ses mérites : la truffe noire du Périgord est bien différente de la truffe de Bourgogne, et les truffes françaises seraient naturellement bien supérieures à celles d'Espagne ou d'Italie... La science objectivera-t-elle de tels jugements? À Montpellier, une équipe de biologistes a examiné la génétique de la truffe noire : les différences de goût proviennent plus de l'environnement que de différences génétiques.

Il existe en Europe dix espèces de truffes, c'est-à-dire de champignons du genre *Tuber*. La truffe noire, encore nommée truffe du Périgord, *Tuber melanosporum*, se récolte principalement en Espagne, en France et en Italie, mais ses qualités gastronomiques diffèrent selon les régions. Afin d'expliquer ces différences, Michel Raymond et ses collègues du CNRS, de l'INRA et de l'ORS-TOM, à Montpellier, ont cherché si elles avaient un fondement génétique. Plus de 200 échantillons provenant de diverses régions de France et d'Italie ont été analysés : dans l'ADN, les biologistes étudiaient des séquences dites satellites, qui diffèrent beaucoup selon les espèces d'un même genre. Aucune variabilité génétique n'a été observée parmi les échantillons de truffe noire. Les généticiens ont également comparé les truffes noires à des truffes d'été et à des truffes de Bourgogne : des différences notables sont apparues entre la truffe noire et la truffe d'été, ce qui était attendu, mais les limites d'espèces entre truffes d'été et truffes de Bourgogne sont floues ; les études génétiques confirment qu'on doit considérer ces deux types comme deux variétés, ce que les biologistes nomment un complexe d'espèces.

Comment expliquer l'homogénéité génétique de l'espèce *Tuber melano-*

sporum? Les biologistes montpellierains supposent que la dernière glaciation a coincé une petite population de truffes noires contre la Méditerranée, en même temps que les arbres sur lesquels elle se développe (le champignon forme un réseau souterrain, associé aux racines, et la truffe n'est que l'organe reproducteur). Comme la truffe noire mûrit en hiver, de novembre à février, sa population a été confinée aux zones les plus méridionales. Lors du réchauffement climatique ultérieur, la truffe noire aurait recolonisé les régions où ses arbres de prédilection se développaient, quand le climat s'y prêtait : en 10 000 ans, la colonisation de l'Europe méridionale se sera effectuée sans que l'espèce ait le temps d'évoluer.



Ces spores des truffes chinoises sont groupés par deux à six, contrairement aux spores des truffes noires, qui vont par paire.

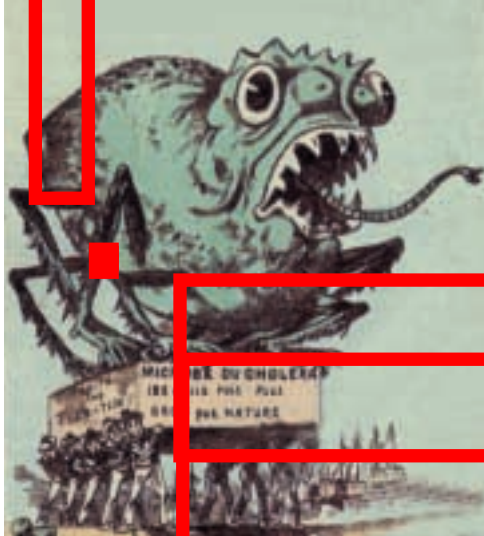
En revanche, lors de la dernière glaciation, les truffes d'été et de Bourgogne, qui mûrissent respectivement au printemps et en automne, auraient conservé une aire de répartition plus septentrionale : leur observation dans des pays plus au Nord et plus à l'Est que la France montre que ces deux truffes tolèrent des climats plus froids. Ainsi s'explique leur diversité génétique actuelle : les truffes actuelles seraient issues d'une population nombreuse et variée.

Les études de génétiques ont complété ces résultats en éclairant le problème des truffes chinoises, que des fraudeurs cherchent chaque année à faire passer pour des truffes françaises. Il y a deux ans, Marie-Claude Janex-Favre et ses collègues de l'Université Paris VI avaient étudié la truffe chinoise, que l'on avait initialement considérée comme une espèce distincte, *Tuber himalayense*, *Tuber indicum* et *Tuber sinense*. Ces truffes proviennent des contreforts de l'Himalaya, où elles sont récoltées à environ 2 000 mètres d'altitude, à moins d'une dizaine de centimètres sous la surface du sol. On les confond facilement avec la truffe française et leur prix de revient est bien inférieur.

Les truffes chinoises ont une forme variable, très irrégulière ou fortement bosselée. Leur diamètre atteint sept centimètres, et elles sont couvertes d'écaillies basses, en forme de pyramides inversées à base carrée. Cet aspect général est quasi identique à celui d'une des truffes du Périgord : le type à grandes écaillies planes, dépourvu d'aspérités marquées. Au microscope, toutefois, on voit que les spores sont différentes pour les deux types de truffes. Ces différences sont-elles dues à des conditions de croissance différentes plutôt qu'à une différence d'espèces? Les études génétiques effectuées par Delphine Gangebeuf et ses collègues de Clermont-Ferrand ont démontré que les espèces sont différentes et le faible goût des truffes chinoises n'est pas dû aux conditions de développement, mais à l'espèce.

Revenons à la truffe noire : si l'environnement est responsable des différences de qualités gastronomiques, la science ne nous a pas encore dit comment le terrain s'exprime. Les biologistes sont au travail...

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



Les pandémies de choléra

Elles sont apparues au début du XIX^e siècle, en raison d'une augmentation de la population mondiale ; l'amélioration des communications a favorisé la diffusion de la maladie.

Des textes sanscrits datant de 2 500 ans environ mentionnent des foyers de choléra. De l'Antiquité au XIX^e siècle, le choléra est resté confiné aux frontières de l'Inde, sans doute parce qu'il s'agit d'une maladie contagieuse strictement humaine : contrairement à la peste, à la fièvre jaune ou au paludisme, dont la diffusion dépend des populations de rongeurs ou d'insectes, les pandémies de choléra suivent les déplacements des populations humaines, car le micro-organisme pathogène n'est pas transmis par un animal. Au cours des pandémies, les zones touchées par la maladie se sont étendues. Aujourd'hui, l'agent infectieux reste présent, plus ou moins latent, dans diverses régions du monde. Les pandémies se sont également rapprochées dans le temps et l'on s'interroge : saura-t-on empêcher la huitième pandémie ?

Les premières épidémies de choléra empruntent les voies d'échange au rythme des caravanes. Ce rythme est si lent et les distances parcourues si longues que la caravane est parfois anéantie avant d'avoir atteint sa destination. Plus le nombre des personnes en mouvement est élevé et plus les contacts avec les populations sont fréquents, plus la maladie se propage. La modification des moyens de transport, l'augmentation des distances parcourues, de la rapidité des moyens de communication et du nombre des personnes transportées ont favorisé l'apparition des pandémies.

Pendant plusieurs siècles, la maladie est confinée au sous-continent indien. En 1503, un officier de Vasco de Gama est le premier Européen à décrire une épidémie de diarrhées cataclysmiques, mortelles en moins de dix heures

et ayant provoqué la mort de 20 000 personnes à Mozambique, en Inde. En 1817 se déclare la première pandémie qui frappera l'Asie, l'Europe et même l'Afrique. En 1814-1815, les armées anglaises combattent au Népal, puis dans le Deccan. Toute l'Inde est envahie. Les malades infectieux vers l'Ouest sont assurés par les liaisons commerciales qui se multiplient, par des troupes anglaises dans les émirats, puis, vers le Nord, par des troupes persanes et turques. Cette flambée s'étend aux confins de l'Empire russe. Pourtant la maladie continue à progresser à bas bruit et, en 1829, le choléra touche les rives de la mer Caspienne, suit les grandes voies de communication intérieures, pour atteindre les ports de la mer Baltique.

Un conflit russo-polonais achemine de nombreuses troupes contaminées vers les pays d'Europe occidentale. L'en-

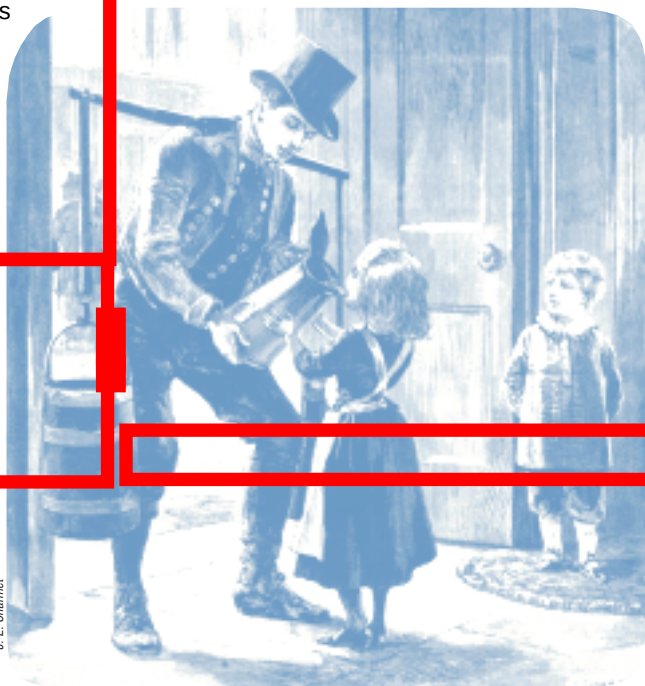
semble de l'Europe est parcouru, l'Atlantique Nord traversé, le continent américain touché. Simultanément, une nouvelle flambée se déclenche au Bengale. La Grande-Bretagne est atteinte, puis la France : la mortalité est élevée dans le Pas-de-Calais, dont la population entretient un commerce de contrebande avec l'Angleterre. Des médecins s'étant rendus en Pologne contribuent vraisemblablement aussi à la dissémination de la maladie à Paris. La deuxième pandémie aurait tué 100 000 Français.

Les itinéraires de la troisième pandémie se multiplient à mesure que les moyens de transport terrestres ou maritimes s'améliorent. La main-d'œuvre recrutée pour le percement du canal de Suez, en 1869, favorise la diffusion de la maladie, de la mer Rouge vers le bassin méditerranéen. Le canal facilite les relations commerciales entre l'Inde et le bassin méditerranéen et raccourcit la durée des voyages : au cours de la quatrième pandémie, le continent américain est, lui aussi, envahi.

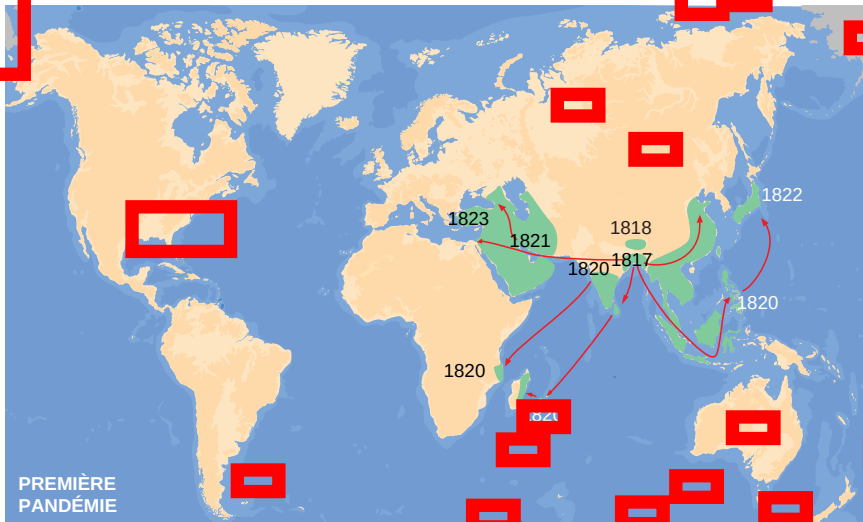
L'ISOLEMENT DU BACILLE

En 1855, l'anesthésiste anglais John Snow est intrigué par la forte mortalité, dans un quartier très conscript de la capitale britannique. En examinant un plan détaillé de la ville, il découvre que toutes les familles touchées tirent leur eau à la même fontaine publique.

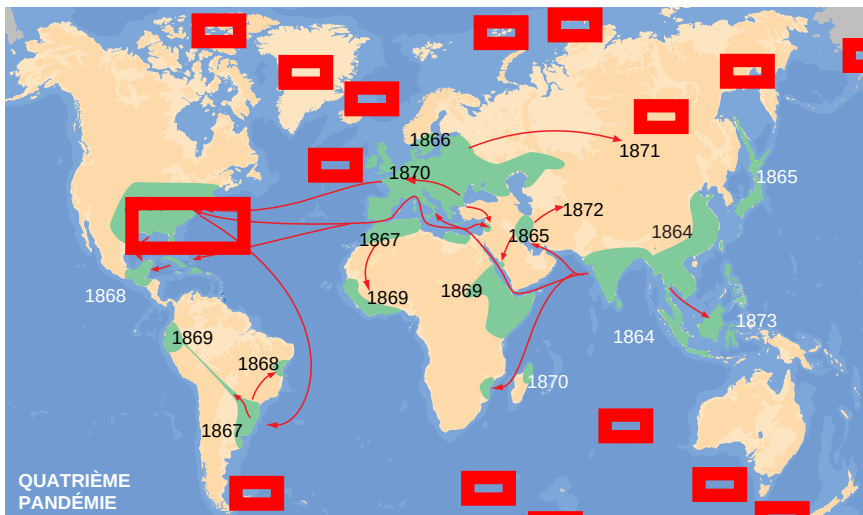
Le médecin fait enlever la poignée de la fontaine : l'épidémie diminue de façon spectaculaire (l'eau contaminée n'est plus consommée et l'autre véhicule de l'agent pathogène, la poignée, est supprimé). Un exemple similaire est constaté à Paris : les habitants de la rue de Chaillot présentent une



La distribution d'eau contaminée a favorisé la diffusion des épidémies de choléra.



Pandémie	Durée	Régions touchées
Première	1817-1824	Asie, Europe, Afrique
Deuxième	1829-1837	Amérique, Afrique, Asie, Europe,
Troisième	1840-1860	Amérique, Afrique, Asie, Europe,
Quatrième	1863-1875	Asie, Afrique,
Cinquième	1881-1896	Asie, Afrique, Europe, Amérique
Sixième	1899-1923	Asie, Afrique, Europe
Septième	1961-1992	Asie, Afrique, Europe, Amérique



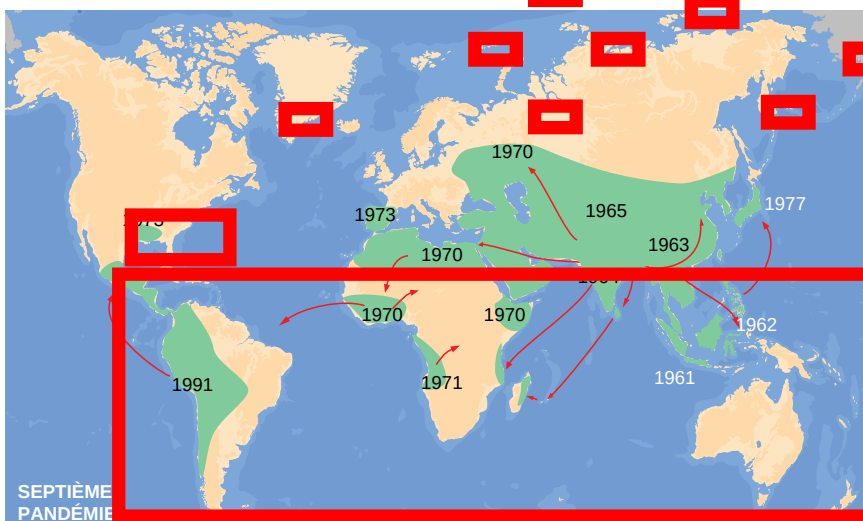
par les selles d'un malade, ou d'eau stagnante.

L'ingestion de nourriture contaminée est également une voie de transmission de la maladie. Aujourd'hui, on sait que cette voie est nettement plus importante que celle de l'ingestion d'eau. Certains fruits de mer contiennent le vibron cholérique, mais ce dernier survit et se multiplie également dans le riz, le millet et certains légumes frais. La transmission interhumaine directe, par les malades ou par des porteurs sains, est également avérée, l'agent pathogène se multipliant, par exemple, dans la sueur.

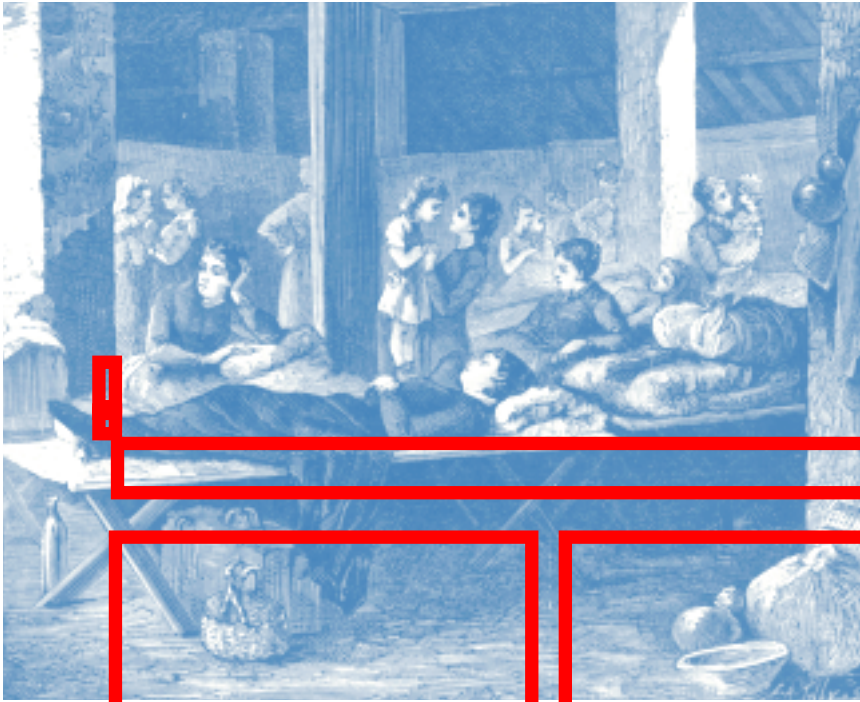
Dans l'intestin, les bactéries se multiplient et sécrètent une toxine qui se fixe sur un récepteur spécifique. Cette fixation perturbe l'activité enzymatique locale, ce qui aboutit à une fuite d'ions sodium et d'eau dans l'intestin. Il en résulte une diarrhée incoercible qui peut entraîner la mort par déshydratation aiguë. Les douleurs abdominales sont vives. La diarrhée est souvent suivie de vomissements.

Selon les épidémies, la mortalité varie. Les porteurs sains jouent un rôle important dans la propagation de la maladie, car ils ne présentent aucun symptôme et échappent aux mesures de quarantaine qui sont efficaces. Près de 90 pour cent des personnes contaminées restent asymptomatiques et éliminent les bactéries pendant quelques jours dans leurs selles. Seulement une personne sur cent a un choléra grave.

En l'absence d'endémie de choléra, plusieurs souches coexistent, et des variants dérivés de ces souches réémergent périodiquement. Le bacille *Vibrio cholerae*, présent dans les eaux des estuaires, survit longtemps, à l'état de dormance. Il se multiplie lorsque les conditions sont favorables, telles une température supérieure à 15 °C ou une abondance de nutriments.



Sept pandémies de choléra ont été enregistrées depuis le début du XIX^e siècle. La première dure de 1817 à 1823 (en haut ; les dates indiquent le début de l'épidémie dans les pays concernés). Cette première flambée se meurt aux confins de l'Empire russe. La quatrième dure de 1863 à 1875 (au milieu). Les connections régulières assurées par des bateaux à vapeur rapides, ainsi que la réalisation du canal de Suez, multiplient les échanges et favorisent la diffusion du vibron cholérique. Outre le continent africain, le continent américain est envahi. La septième pandémie (en bas) commence en 1961, dans les îles Célèbes, en Indonésie, et touche la côte pacifique de l'Amérique, en 1991. Aujourd'hui, le choléra reste endémique en Asie, en Afrique et en Amérique latine, où il resurgit périodiquement. Ces épidémies, dont la septième a été la plus longue, reflètent les médiocres conditions sanitaires des pays surpeuplés.



Le carré des femmes du lazaret de la Latta, à la frontière franco-italienne, en 1884 : la mise en quarantaine était efficace pour bloquer la propagation du choléra.

Aujourd'hui, pour lutter contre le choléra, on dispose d'antibiotiques et de moyens de réhydratation efficaces. En revanche, au XIX^e siècle, les principales méthodes efficaces étaient proposées : les saignées, l'application de sangsues, le punch de Magendie (une boisson composée de quatre litres de tilleul, de quatre citrons, d'un litre d'alcool et d'une livre de sucre), les frictions, ou encore le réchauffement des malades par tous les moyens.

DES PANDÉMIES TARDIVES

Pourquoi les pandémies ont-elles été si tardives dans l'histoire de l'homme ? *Vibrio cholerae* serait apparu, dans la nature, il y a environ 800 millions d'années. À l'époque néolithique, il y a environ 10 000 ans, lorsque les hommes, vivant de la pêche, se sont organisés en villages côtiers, certaines souches auraient contaminé l'homme et se seraient adaptées à son intestin, donnant des diarrhées sporadiques.

L'acquisition de gènes de virulence aurait renforcé le caractère infectieux et contagieux de certains vibrions. Des groupes de personnes, d'abord isolés, mais de plus en plus importants, ont commencé à être infectés. Le phénomène d'adaptation aurait été accéléré par la croissance démographique, qui favorise les contaminations interhumaines directes. De multiples souches auraient émergé à des époques différentes dans les zones surpeuplées, celles de l'estuaire du Gange notamment.

Les épidémies résultent de l'interaction de plusieurs facteurs : la virulence de la souche bactérienne, divers facteurs environnementaux, le comportement humain et le degré d'immunité de la population. Les souches, répandues dans l'environnement par les malades et par les porteurs sains se seraient implantées à l'état endémique dans certaines régions.

L'augmentation de passages par l'homme et de périodes de survie dans l'environnement aurait favorisé la diversification des bactéries existantes et l'émergence de nouvelles souches plus pathogènes pour les populations exposées de façon chronique. Aux XIX^e et XX^e siècles, l'augmentation de la population, de la promiscuité et de la malnutrition a favorisé l'apparition des pandémies que les nouveaux moyens de communication ont diffusées avec une remarquable efficacité.

P. BOUTELIS, A. DODIN, *Visages du choléra*, éditions Belin, 1987.

O. WEIL, P. BERCHE, *The Cholera Epidemic in Ecuador : toward an endemic in Latin America*, in *Rev. Épidém. et Santé Publ.*, vol. 40, pp. 145-155, 1992.

P. BERCHE, O. WEIL, *L'épidémie de choléra en Amérique latine*, in *Méd. Mal. Infect.*, vol. 23, pp. 85-98, 1993.

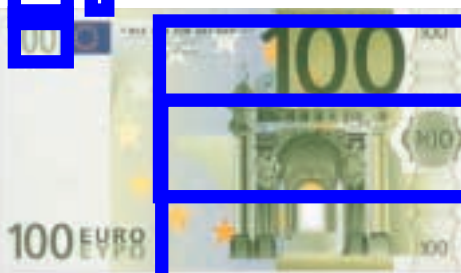
P. BERCHE, *La réémergence du choléra*, in *Médecine thérapeutique*, vol. 4, n° 3, pp. 213-222, mars 1998.



JEAN-PAUL ESCANDE

© POUR LA SCIENCE - N° 252 OCTOBRE 1998

Le médecin doit-il s'interdire de soigner des athlètes malades de l'entraînement quand les médicaments sont considérés comme dopants?



La monnaie?

BERNARD GUERRIEN • SOPHIE JALLAIS

La politique monétaire, bientôt européenne, dépend de ce qu'englobe la définition de masse monétaire.

Franc ou euro? Factures et relevés bancaires sont peu à peu évalués dans l'une et l'autre unité monétaire, même si seuls les francs circulent aujourd'hui en pièces et en billets. Dans le contexte du passage à l'euro, une question devient lancinante : qu'est-ce que la monnaie, « unique » ou plurielle? Comment les banques nationales et européennes contrôlent-elles sa création et sa destruction? Qui régule la « planche à billets »?

La monnaie est d'abord une unité de compte, mais c'est aussi une réserve de valeurs, et surtout un moyen de paiement. Pour le dernier point, l'image du billet de banque est trompeuse : billets et pièces (formant la masse monétaire) ne constituent qu'une très faible part des moyens de paiement utilisés, surtout pour les petites dépenses, la baguette du matin, le journal, le café, la place de cinéma. Les dépenses d'importance, moins fréquentes, mais d'un poids important, le loyer, de l'électricité et du téléphone, cotisations et impôts de tous ordres, achats de biens durables, etc., se font par chèque ou par prélèvement automatique sur un compte courant. La monnaie perd là tout support matériel, et la définition de la masse monétaire en est compliquée.

LA CRÉATION MONÉTAIRE

La création de monnaie et sa destruction passent par le système bancaire. Quand un dirigeant d'entreprise obtient de son banquier un crédit de 1000 pour se lancer dans la production d'un bien, le banquier crédite le compte de l'entreprise de la somme requise. Ce faisant, il crée un montant 1000 de monnaie. Le dirigeant d'entreprise utilise ce crédit pour mettre en œuvre la production, notamment en versant des salaires et en payant des fournisseurs. Si ces paiements se font par chèques dans la même banque que celle qui a accordé le crédit à l'entreprise, et si tout le crédit est utilisé en salaires et fournitures, alors le circuit est fermé : la banque détient une créance de 1000 sur l'entreprise et a une dette de 1000 envers ceux qui ont déposé des chèques auprès d'elle (et qui ont cette somme à leur disposition pour leurs paiements). Si les produits de l'entreprise se

vendent, celle-ci pourra alors rembourser la banque. En faisant, elle détruira de la monnaie. Si elle décide de continuer à investir et donc d'emprunter, il y a nouvelle création de monnaie : la création monétaire suit l'évolution de l'activité.

LA BANQUE CENTRALE

Nous avons supposé le circuit fermé, au sens où toutes les personnes concernées ont un compte dans la même banque. Toutefois, le raisonnement s'applique même si elles ont des comptes dans des banques différentes : il suffit de considérer le système bancaire dans son ensemble.

Toutefois, le jeu d'échanges entre banques ne ferme pas complètement le circuit : celui-ci comporte des « fuites », essentiellement du fait de l'existence d'une demande de billets de la part des agents économiques. Il revient alors à la banque centrale (aujourd'hui, la Banque de France) de satisfaire cette demande formulée par les autres banques, elles-mêmes sollicitées par leurs clients.

Cependant le rôle de la banque centrale ne se limite pas à l'émission de billets ; elle agit également en tant que « banquier des banques » : toutes les banques ont un compte à la banque centrale, où s'effectuent les compensations des opérations déficitaires s'adressant à la banque centrale ; le rôle de celle-ci en tant que prêteur en dernier ressort lui confère un pouvoir politique important. Ce pouvoir est au cœur du débat entre les « pro » et « anti » monnaie unique, bien plus que le simple changement d'unité de compte.

LES DIVERSES MASSES MONÉTAIRES

La banque centrale – d'un pays, ou européenne – décidera de sa politique en fonction des moyens de paiement disponibles dans l'économie (dont elle peut estimer qu'ils sont « trop importants »). D'où la nécessité d'évaluer ces moyens de paiement qui englobent, outre les pièces et les billets, les divers comptes détenus par les agents économiques, à commencer par ceux qui représentent de l'argent disponible immédiatement. Ce sont les comptes courants, ou dépôts à vue, sur lesquels

transitent chèques, prélèvements automatiques et autres paiements par carte. Avec les billets et les pièces, ils forment ce qu'on appelle l'« agrégat monétaire M_1 ». En France, en 1997, les billets et les pièces constituaient environ 10 pour cent de l'agrégat monétaire M_1 , le reste étant formé des dépôts à vue.

L'agrégat monétaire M_1 représente la monnaie au sens strict, car il regroupe tous les moyens de paiement utilisables à un moment donné, directement et sans condition. Toutefois, il ne donne qu'une idée approximative des moyens de paiement disponibles. Ainsi, en France, les comptes courants ne sont jusqu'à présent pas rémunérés et celui qui veut faire fructifier les sommes qu'il n'utilise pas les place sur un livret d'épargne, un plan d'épargne logement, etc. La caractéristique de l'argent ainsi placé est qu'il ne peut toutefois être directement utilisé comme moyen de paiement, mais ce plus ou moins facilement.

Ainsi, l'argent placé à la Caisse d'épargne est facilement mobilisable, et pratiquement sans frais : il faut seulement se déplacer pour retirer l'argent, ou donner une instruction pour qu'il y ait transfert sur le compte courant. En revanche, si le placement se fait sur la base d'un contrat comportant une échéance, alors la somme placée peut être mobilisée, mais à un certain coût (perte des intérêts ou des avantages fiscaux).

C'est pourquoi on compte de ces divers degrés de liquidité de moyens de paiement potentiels qu'il existe, parmi de nombreux indicateurs, un indicateur baptisé M_3 , qui comprend, outre M_1 , les divers types de livrets d'épargne, les comptes d'épargne logement, les placements à terme et les titres sur le marché monétaire, tous étant mobilisables rapidement, même si c'est à un certain coût.

En France, actuellement, l'indicateur M_3 est plus de deux fois supérieur à l'indicateur M_1 , ce qui mesure l'importance des moyens de paiement potentiels. Cette diversité est une marge de manœuvre pour les autorités monétaires, qui avancent tel ou tel agrégat pour justifier « scientifiquement » leur politique monétaire. Plus on avance dans le temps, plus la masse monétaire devient... immatérielle.

Des crustacés, de l'oxygène et du sel

Même avec un sang bien oxygéné, des crustacés peuvent mourir asphyxiés.

La mortalité des poissons ou autres espèces aquatiques, attribuée au manque d'oxygène, dans les eaux saumâtres des estuaires et des baies, a augmenté partout dans le monde. Naguère, seules les zones confinées, tels les fonds de lagunes, étaient en proie au printemps et en été à des «crises d'asphyxie» résultant d'une trop forte production de végétaux marins. Aujourd'hui, les rejets excessifs de fertilisants contenus dans les engrais et les détergents phosphatés entraînent une surproduction de matières organiques qui, après dégradation par les bactéries, absorbent une consommation d'oxygène.

Cette augmentation de la mortalité est d'autant plus impressionnante que l'on a découvert que, chez de nombreux animaux aquatiques (crustacés, mollusques et poissons), la concentration en oxygène dissous dans le sang est bien inférieure à celle des animaux qui respirent de l'air, même lorsque l'eau est

bien oxygénée. En revanche, nous avons montré que certaines espèces sont menacées quand la concentration en oxygène de l'eau et sa salinité sont simultanément faibles, car le peu d'oxygène présent dans le sang n'est pas toujours disponible pour les tissus.

On savait que, lorsqu'il y a beaucoup d'oxygène dans l'eau et que les animaux sont au repos et à jeun, leur ventilation (le passage de l'eau dans les branchies) diminue pour que leur sang ne soit pas mieux oxygéné. La question se posait : la concentration en oxygène dissous dans le sang participe-t-elle à la modulation du comportement des animaux aquatiques ? Pour le savoir, nous avons étudié le homard *Homarus gammarus*, en travaillant sur une partie de son système nerveux central, le ganglion stomatogastrique, qui contient 30 neurones parfaitement connus. Ce ganglion commande les mouvements de mastication de l'estomac et celui de filtrage du pylore avant l'entrée des aliments dans les intestins. Chacun des 30 neurones agit sur des muscles spécifiques de ces deux organes. Avec des collègues de l'Unité CNRS-UMR 5816, nous avons enregistré l'activité des muscles qui commandent l'estomac et le pylore en y implantant des électrodes de façon permanente, sur des animaux libres. Lorsque l'animal est au repos et à

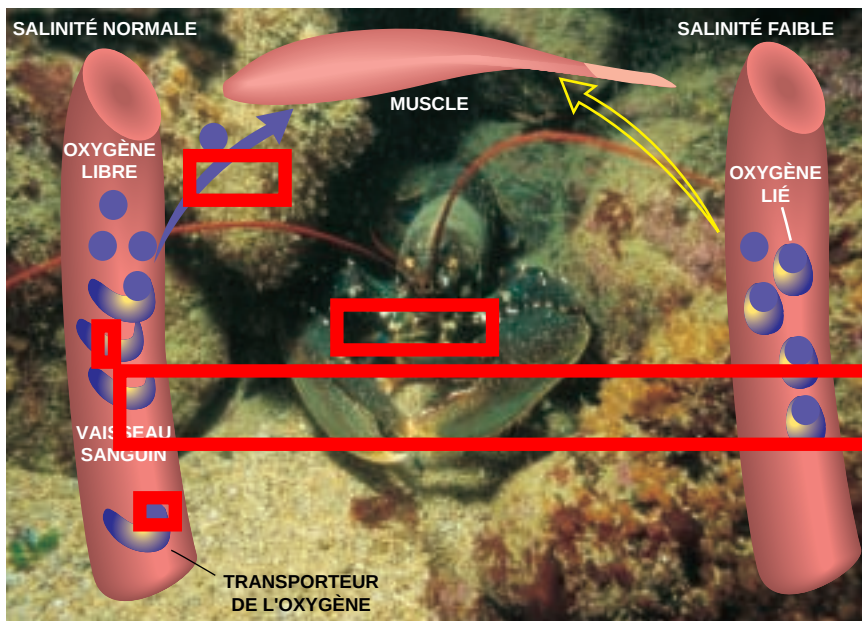
jeun, son métabolisme est lent, les concentrations en oxygène sont faibles et les activités de l'estomac et du pylore sont lentes et synchronisées. Lorsqu'il mange, différents paramètres augmentent : la ventilation, la concentration en oxygène dans le sang et dans le cerveau, l'activité des muscles masticateurs de l'estomac et filtreurs du pylore qui sont alors désynchronisés (comme on le démontre en enregistrant des électrodes).

Quand on diminue modérément la concentration en oxygène du milieu où baigne le homard, après la prise de nourriture (eau enrichissant, par exemple, l'eau en azote), on constate que l'activité des muscles du pylore ralentit et redevient synchronisée avec celle des muscles de l'estomac, comme avant le repas.

Nous avons également étudié le fonctionnement du ganglion stomatogastrique isolé *in vitro* et placé dans une artère en verre perfusée par une solution physiologique adaptée. Nous avons placé des microélectrodes sur les neurones correspondant aux muscles gastriques et pyloriques que nous avions étudiés sur l'animal libre, et nous avons enregistré leur activité électrique en reproduisant les modifications d'oxygénation qui existent avant et après un repas. Ces enregistrements sont identiques à ceux que nous avons obtenus sur l'animal vivant. Ainsi, l'oxygénation modifie l'activité de réseaux de neurones et, par conséquent, celle des muscles qu'ils commandent : l'oxygène est un neuromodulateur du comportement qui agit sur le cerveau au même titre que d'autres médiateurs connus, telles la sérotonine ou les catécholamines.

Bien que la quantité d'oxygène disponible dans certaines eaux saumâtres soit suffisante, divers crustacés, tels le crabe vert *Carcinus maenas*, qui peuple les côtes françaises, ou le homard japonais (notamment étudiée par Claude Seyoum d'IFREMER Tahiti) risquent de mourir par manque d'oxygène. Pourquoi ? Par manque de sel ! Jean-Paul Truchot, dans notre laboratoire, a montré que leur pigment respiratoire a une affinité pour l'oxygène qui augmente quand la salinité diminue : sa configuration change et l'oxygène y est plus fortement fixé.

Lorsque la salinité décroît jusqu'à dix grammes de chlorure de sodium par litre, et que l'eau est peu oxygénée, cette affinité assure une concentration totale en oxygène (fixé et dissous) éle-



Chez de nombreux crustacés, l'oxygène est véhiculé dans le sang par un transporteur (à gauche), dont la configuration change quand la salinité de l'eau devient trop faible (à droite) : l'oxygène, piégé, n'est plus relargué dans les tissus et l'animal risque de mourir asphyxié.

vée, et l'animal au repos dispose d'une réserve sanguine d'oxygène suffisante. Pourtant, lorsque la salinité continue à diminuer et que l'affinité du transporteur pour l'oxygène continue à augmenter, il y a un sérieux revers à la médaille!

Il faut que l'animal puisse libérer l'oxygène dans ses tissus. Cette tâche est d'autant plus difficile que la fixation sur le transporteur est forte. Quand l'affinité est excessive, l'oxygène est si fortement fixé à sa molécule transporteuse qu'il ne peut plus quitter les artérioles en quantité suffisante pour approvisionner les tissus. Avec un métabolisme activé, un crabe peut mourir asphyxié même si sa concentration sanguine totale en oxygène est normale.

Ainsi, pour le crabe vert, lorsque la salinité est égale au quart de la normale (environ neuf grammes de chlorure de sodium par litre) et qu'il est à jeun, la quantité d'oxygène libérée du sang vers les cellules est significativement réduite, après une prise alimentaire où la demande cellulaire double, l'oxygène n'est plus libéré à une vitesse suffisante. Sans augmentation de salinité, laquelle diminue l'affinité du transporteur pour l'oxygène, ou réoxygénation de l'eau, qui entraîne une augmentation de la concentration sanguine d'oxygène libre, la mort est alors inévitable.

J. C. MASSABUAU et A. LEGEAY
CNRS UMR 5805- Université Bordeaux I

BRÈVES

Empilement de sphères

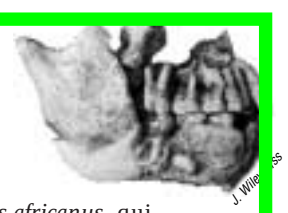
La plus vieille conjecture de la géométrie semble démentie : après quatre siècles de recherches, T. Hales et M. Ferguson de l'Université de Michigan ont prouvé la résolution du problème de Kepler : l'empilement le plus dense de sphères identiques dans tout l'espace est l'empilement régulier cubique à faces centrées, celui des boîtes de canons et des oranges. La démonstration – de 350 pages – qui utilise l'informatique pour partie, est aujourd'hui proposée pour vérification.

Un nouveau VIH

Un nouveau variant de virus responsable du SIDA a été identifié par F. Simon et ses collègues de l'Hôpital Bichat. Les virus VIH1 se répartissent en deux groupes, le M et le O. Les premiers sont responsables de la pandémie mondiale, tandis que ceux du groupe O sont cantonnés quasi exclusivement au Cameroun. D'après les analyses phylogéniques, le nouveau virus, découvert au Cameroun, est un virus intermédiaire entre le VIH1 et le virus IV qui infecte le chimpanzé ; il aurait franchi la barrière d'espèce.

Grand puzzle

En 1963, l'équipe d'A. Hughes avait découvert une quarantaine de fragments d'os et de dents à Sterkfontein, en Afrique du Sud. Ils datent d'entre 2 et 2,5 millions d'années. J. Moggi-Cecchi, à l'Université de Florence, a reconstitué le puzzle : tous ces fragments appartiennent à un australopithèque de l'espèce *Australopithecus africanus*, qui était âgé de cinq ans environ.



Le temps de demain

Aujourd'hui, ce sont les horloges atomiques qui énoncent les secondes avec le plus de précision. Toutefois, les atomes de césium, qui sont censés rester dans les mêmes configurations, interagissent entre eux ce qui finit par modifier le rythme. Une équipe de l'Université de Boulder vient de concevoir la première horloge fondée sur les battements d'un condensat de Bose-Einstein : les atomes sont tous dans le même état quantique, de sorte qu'aucune perturbation ne rompt le rythme imperturbable de l'horloge.

Suite page 24

Vitraux visqueux?

Contrairement à une idée répandue, le verre ne coule pas à température ambiante.

Si les vitraux sont plus épais dans leur partie inférieure, c'est que le verre dont ils sont constitués se comporte comme un liquide très visqueux : il coule. Cette affirmation répandue, au point qu'on la retrouve dans certains ouvrages scolaires et dans des cours d'histoire de l'art, est erronée. À température ambiante, la viscosité du verre est telle que ce matériau peut être considéré comme un solide et ne s'écoule pas, même après des milliers d'années.

La viscosité mesure la vitesse d'écoulement d'un fluide. Par un trou de diamètre donné, un fluide coulera d'autant

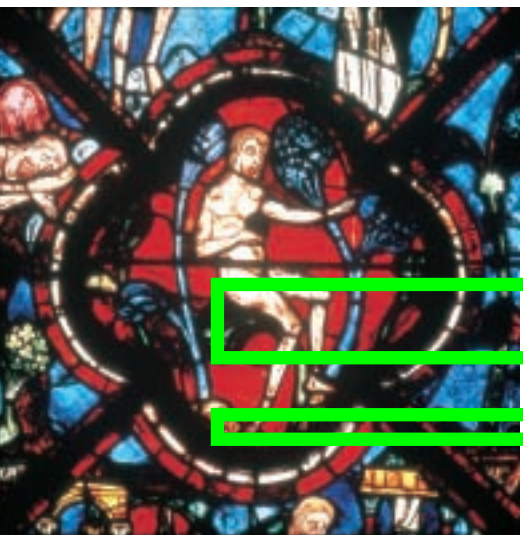
plus lentement qu'il est visqueux. Le miel, par exemple, est plus visqueux que l'eau.

Quelle est la différence entre la viscosité du verre liquide, et celle du fer liquide? Dans du fer en fusion, la viscosité est quasiment constante. Si on refroidit un tel liquide à une température inférieure à la température de fusion, la cristallisation se produit brusquement : les molécules s'organisent en un réseau rigide. Aux températures inférieures au point de fusion, les molécules oscillent autour de leur point d'équilibre, mais les liaisons sont rigides, même à proximité du point de fusion.

En revanche, à mesure que le verre liquide refroidit, sa viscosité augmente. Lorsque la température diminue, un verre épais se forme et l'on obtient finalement un solide amorphe. Dans ces solides, les molécules ne sont pas rangées de manière ordonnée, comme dans un cristal, mais la cohésion est suffisante pour maintenir la rigidité. Le solide amorphe est donc caractérisé par une viscosité qui croît rapidement lorsque la température diminue.

Comment mesure-t-on une viscosité à température ambiante? Pour les «objets» liquides à température ambiante, la tâche est simple : il suffit de mesurer la vitesse d'écoulement. Pour un matériau comme le verre, la tâche est plus délicate : on ne peut pas attendre des millions d'années qu'un litre de verre daigne s'écouler. Aussi, estime-t-on la viscosité du verre en extrapolant la viscosité mesurée à haute température, lorsqu'il est liquide, ou par l'utilisation de modèles empiriques.

En pratique, les mesures de la viscosité du verre liquide utilisent un visco-élastomètre : cet appareil enregistre la réaction du fluide à une vibration mécanique. En répétant la mesure avec du verre liquide à plusieurs températures



L'épaisseur des vitraux est variable, mais la partie inférieure de chaque morceau n'est pas toujours la plus épaisse.

La Terre gelée

Il y a 700 millions d'années, les océans terrestres auraient été, à plusieurs reprises, entièrement pris par les glaces : c'est l'hypothèse du "Snowball Earth". Hoffman et ses collègues de l'Université de Harvard ont cherché à expliquer le quasi arrêt de l'activité biologique qu'ils observent dans des sédiments de cette période prélevés en Namibie. La Terre ne serait sortie de son hibernation que grâce à une intense activité volcanique qui aurait augmenté la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, gaz à effet de serre.

Les anneaux de Jupiter

Les sondes *Voyager*, lancées dans les années 1970, avaient révélé l'existence d'anneaux autour de Jupiter. La sonde *Galileo*, en orbite depuis



NASA/JPL

elle a observé de plus près : les poussières qui composent les quatre anneaux proviennent des plus petits satellites de Jupiter, Adrasteé, Métis, Amaltheé et Thébé. Elles en ont été arrachées par les nombreuses collisions météoritiques qu'ils subissent.

Tourbe conservatrice

Une tourbière du Jura suisse a enregistré la concentration en plomb dans l'atmosphère depuis plus de 12 000 ans. W. Shotyk et ses collègues de l'Université de Berne y ont retrouvé les dates d'événements climatiques tels que le Dryas récent, il y a 10 000 ans, et d'autres, telles les dernières éruptions volcaniques du Massif central, il y a 8 200 ans ; et historiques, telle l'apparition de la métallurgie du plomb, il y a 3 000 ans. On trouve aussi des traces de l'importation massive de minerai australien en Europe, depuis le début du X^e siècle : le rapport des différentes formes du plomb varie.

Fausse gueule de bois

Comment réduire les accidents de la route dus à l'alcool ? En trompant le consommateur sur la quantité d'alcool absorbée. Deux chimistes de l'Université de Californie ont synthétisé le galangal, une racine qui pousse en Asie occidentale, renforce le degré d'alcool apparent des boissons peu alcoolisées. Ils ont synthétisé des molécules identiques au composé actif de la racine. Lors de tests, les volontaires ont déclaré que les boissons qui contenaient ces molécules semblaient plus fortes que des boissons qui en étaient exemptes.

Suite page 26

et à plusieurs fréquences de vibration, on obtient une courbe de la viscosité en fonction de la température que l'on peut prolonger vers la température ambiante.

L'autre méthode consiste à modéliser, à l'aide de lois empiriques, le comportement fluide du verre à basse température. Ainsi, Edgar Zanetto, de l'Université de Sao Carlos, au Brésil, utilise l'expression empirique de la viscosité du Verre Falcão, l'allemand, établie dans les années 1930. Dans cette expression, le logarithme de la viscosité augmente de manière inversement proportionnelle à la température, avec des coefficients qui dépendent de la composition du verre. E. Zanetto a alors calculé ces coefficients numériques pour un verre néolithique qui provient de la cathédrale Saint-Etienne à Tournai.

Quelle que soit la méthode utilisée, les résultats sont semblables : on n'observe pas d'écoulement notable, à moins de chauffer le vitrail à plus de 400 °C. À température ambiante, le temps de relaxation visqueuse, c'est-à-dire le temps après lequel on observe un écoulement, est égal à 10^{32} ans, bien supérieur à l'âge de l'Univers !

Même si l'on considère que l'adjonction d'impuretés diminue la viscosité de quelques ordres de grandeur, le temps de relaxation reste trop grand. Le fait que dans les mosaïques, les vases de verre, parfois vieux de 2 000 ans, ne coulent pas, corrobore ce résultat.

La caractéristique principale des vitraux médiévaux est leur irrégularité et le fait que leur épaisseur n'est pas constante, car, à l'époque de leur fabrication, ils étaient aplatis à la main. L'observation d'une épaisseur supérieure dans la partie inférieure des vitraux est-elle fondée ? Selon Jean-Jacques Barck, du Laboratoire des monuments historiques, à Champs-sur-Marne, on observe que les morceaux de vitraux sont placés dans tous les sens, avec la partie épaisse tantôt vers le haut, tantôt vers le bas ou sur le côté. Le mythe des vitraux coulant est mort.

Des expériences montrent cependant que le verre peut se déformer à température ambiante, de la même façon qu'un cristal mais par un mécanisme élastique réversible, différent de la relaxation visqueuse. Au laboratoire de recherche de Saint-Gobain, René Gy a posé une charge de 100 kilogrammes sur une plaque de verre de quatre mètres de long et de 19 millimètres d'épaisseur. La plaque s'est initialement déformée, puis, au fil des jours, la déformation a augmenté de un pour cent de la flèche initiale. Après 200 jours, la charge a été retirée et la plaque est revenue lentement à son état de départ, quand aucune charge ne pesait sur elle.

Du soleil sous les vignes

Les vignes reçoivent de la lumière solaire réfléchie par un revêtement posé sur le sol.

Les vendanges seront-elles bonnes ? Les vendanges ont été sèches. Chaque année à la même époque, les viticulteurs se posent ces questions et y répondent en général positivement. Une innovation récente, la «solarisation artificielle», amplifie la quantité de lumière solaire reçue par les grappes. La lumière qui atteint le sol est renvoyée vers la plante par un revêtement réfléchissant.

Depuis 2001, le Laboratoire de biochimie métabolique de l'Institut des produits de la vigne, à Montpellier, étudie la maturation des grappes de raisin. Une partie de la lumière solaire est absorbée par le sol sans servir à leur maturation. Comment recycler cette lumière perdue et la renvoyer vers la plante ? Des viticulteurs, dans certaines régions, posaient traditionnellement sur le sol



Le revêtement réfléchissant est posé au pied des vignes.

des galets qui accumulaient de la chaleur pendant la journée pour la restituer durant la nuit.

Une première tentative sur des plants en pots, à l'aide de plaques métallisées, a été concluante : les propriétés gustatives et esthétiques des baies ont été améliorées. La méthode restait toutefois peu pratique et inapplicable à grande échelle. Jean-Pierre Robin et François-Xavier Sauvage, de l'INRA, ont alors utilisé des plaques souples de polystyrène, tapissées de papier d'aluminium, identiques à celles utilisées pour l'isolation thermique des bâtiments. Les fruits récoltés confirmaient les bons résultats, mais la mise en œuvre était très difficile et les plaques trop fragiles pour une utilisation en exploitation agricole.

Le revêtement doit être léger, impu-
trésicible, et diffuser la lumière dans toutes les directions pour que la lumière atteigne les grappes enfouies dans le feuillage. Il doit aussi être perméable à la pluie pour ne pas priver d'eau les pieds de vigne. Le passage d'engins agricoles ne doit pas l'endommager et son utilisation doit être simple, car il n'est pas placé en permanence et réutilisé plusieurs années consécutives. Le *Vitexsol* (abréviation de vigne, textile, sol et soleil), créé par la Société *MDB Texinov*, répond

à ces exigences. Il s'agit d'un revêtement mêlant fibres de polyéthylène et lamelles d'aluminium de trois millimètres de largeur. Fixé au pied des vignes par de petits piquets, il est placé entre l'éclosion des bourgeons et la maturation des fruits.

Lors des premiers essais, sur de petites parcelles, l'amélioration constatée par rapport à des parcelles témoins, porte à la fois sur le rendement et la qualité. Les baies sont plus grosses et moins acides, les grappes plus homogènes, la concentration en pigments responsables de la couleur est accrue, les tanins sont plus alcooliques, la quantité de sucre augmentée de 20 à 30 grammes par kilogramme et, pour certains cépages comme le muscat, la quantité de substances aromatiques est supérieure. Les chercheurs supposent que l'augmentation de la photosynthèse due au surcroît d'ensoleillement (on gagne plus de 20 pour cent d'énergie lumineuse) amplifie l'activité des voies métaboliques, notamment la synthèse des composés aromatiques. Pour le raisin de table, les grappes sont plus attrayantes, plus appétissantes et plus sucrées. Pour le raisin de cuve, la couleur est plus intense et le titre alcoolométrique augmente de un à deux degrés grâce au supplément de sucre dans le raisin.

Ce revêtement empêche la prolifération des mauvaises herbes en occultant la lumière nécessaire à leur croissance, de sorte que les quantités d'herbicides pulvérisées sur les vignes sont restreintes. La propagation de certaines maladies et du *Botrytis*, un champignon qui provoque la putréfaction des baies, en particulier le mildiou. Selon une étude réalisée sur le chardonnay de Limoux, le gain de fruits sains peut atteindre 40 pour cent. Le revêtement renvoie les ultraviolets qui, plus abondants, repousseraient les insectes vecteurs de ces maladies. La hausse de la température diminue l'humidité propice au développement du *Botrytis*.

Nombre de questions restent en suspens. Quels sont les relations entre la quantité de lumière et l'évolution de la vigne ? Existe-t-il une date optimale de pose ? La polarisation a-t-elle des effets sur les caractéristiques individuelles de chaque cépage ?

Les viticulteurs ne sont pas les seuls intéressés par ce procédé. Certains horticulteurs envisagent l'utilisation pour la culture des roses. Il semble nécessaire d'éviter tout contact entre les feuilles et le revêtement sous peine de grave brûlure, mais, cette précaution prise, rien ne semble interdire d'étendre le procédé à d'autres cultures.



Réduction de fractures

Un traitement contre l'ostéoporose réduit de plus de moitié les risques de fractures de la hanche. Une étude réalisée auprès de 6 000 personnes a montré que l'alendronate réduit de 56 pour cent les risques de fractures de la hanche et de

49 pour cent ceux de la colonne vertébrale. Au Congrès européen



également annoncé que le raloxifène, un médicament de la classe des modulateurs sélectifs des récepteurs des estrogènes (SERM) réduit de moitié les risques de fractures de la colonne vertébrale chez les femmes atteintes d'ostéoporose.

Le comportement social du ver

Les vers *Caenorhabditis elegans* ont parfois un comportement solitaire, parfois un comportement grégaire. Une équipe de San Francisco a rassemblé des vers de 17 souches mis en présence de bactéries, certains vers se dévorent, d'autres se détournent. L'équipe américaine a montré que les 12 voraces grégaires et les cinq solitaires ont deux versions différentes d'un même gène : les protéines codées par ces deux gènes ne diffèrent que par un seul acide aminé. La sociabilité des individus ne repose-t-elle que sur cette différence?

Peinture et métallurgie

La métallurgie est-elle la fille de la peinture? C'est ce que suggère un congrès Art & chimie qui a eu lieu à l'École du Louvre. Les pigments utilisés par les hommes préhistoriques sont en effet surtout des oxydes minéraux et du charbon de bois. Le chauffage des oxydes, au départ sans doute pour faire varier les couleurs, permet, en présence de charbon de bois, leur réduction en métaux.

Mithridatisation par la lumière

Avec l'avènement des lasers, les plus puissants, les physiciens recherchent des matériaux qui résistent aux rayonnements lumineux intenses. Les physiciens du CEA ont découvert que certains matériaux, dont la silice, résistent mieux après avoir été soumis à des flux lumineux croissants. Ce conditionnement éliminerait les impuretés responsables de la dégradation.

Vieux jeu

Un jeu de balle pratiqué depuis 3 500 ans.

Les Espagnols qui conquièrent le Mexique, au début du XVI^e siècle, découvrent un jeu, appelé tlachtli ou ulama, où deux équipes s'affrontent pour faire passer une balle de caoutchouc dans des anneaux en pierre, en la frappant du coude, de l'épaule, de la hanche ou du genou. Les quelques dizaines de joueurs qui le pratiquent encore aujourd'hui, sous une forme légèrement modifiée, savent-ils qu'ils perpétuent une tradition plusieurs fois millénaire? Un terrain, construit spécialement pour l'ulama, atteste qu'on y jouait déjà il y a 400 sur la côte Pacifique du Mexique et du Guatemala.

L'ulama se pratiquait sur un terrain plat, aménagé avec des structures maçonnées. Une allée centrale, de quelques dizaines de mètres de long sur quelques mètres de large, est longée par deux talus, de 30 à 80 centimètres de haut et de quelques mètres de large, dont les côtés extérieurs sont eux-mêmes surmontés de murets. Les probables modifications des règles au cours du temps n'ont jamais altéré profondément ce plan. Tout au plus des anneaux de pierre (des «buts»), sont-ils parfois fixés sur les deux murets, perpendiculairement à l'axe principal du terrain, notamment chez les Aztèques. En outre, l'interdiction du jeu par les Espagnols a aussi fait évoluer là où il a survécu : le terrain est devenu une simple esplanade, sommairement délimitée. La

disparition des talus latéraux, qui permettaient de récupérer la balle avec le genou ou la hanche en se baissant, a sans doute rendu plus acrobatique la pratique moderne.

En pratiquant ce jeu, les souverains accomplissaient des rites de fertilité agricole. Ainsi, chaque année, le roi de Copán (ville aujourd'hui au Honduras) y affrontait-il symboliquement les puissances de l'infra-monde ; sa victoire, prévue, assurait la germination du maïs. Le terrain remplaçait parfois le champ de bataille : des récits espagnols racontent la partie qui opposa l'empereur aztèque Moctezuma à un roi vaincu pour le contrôle de Chimalapa, jardins artificiels très fertiles construits sur des lacs du bassin de Mexico. Moctezuma, mauvais perdant, fit assassiner son rival pour s'approprier ce qu'il n'avait pu acquérir par son agilité. Le jeu avait aussi une fonction divinitaire : Moctezuma joua pour connaître l'avenir de l'empire aztèque à l'arrivée des Espagnols.

Souverains et élites n'étaient probablement pas les seuls pratiquants : on a retrouvé des terrains près de sites de garnison à Oaxaca, dans une zone frontalière. S'entraînaient-ils à l'entraînement militaire, à la distraction des soldats ou au règlement de conflits avec les populations frontalières voisines? Ces trois usages ne sont pas incompatibles.

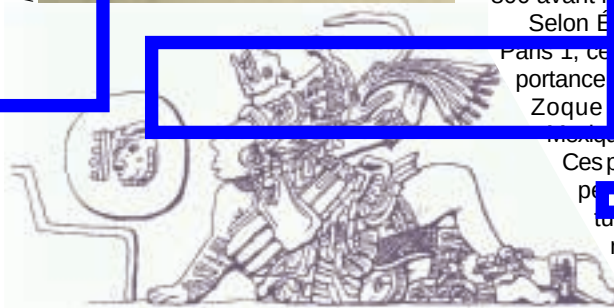
À partir de 200 avant notre ère, on suit la diffusion et l'existence de l'ulama, par la construction de terrains, dans les nombreuses civilisations qui coexistent ou qui se succèdent dans la région. Où et quand le jeu est-il apparu? Les Olmèques, établis sur la côte Est du Mexique, utilisaient le caoutchouc dès 1200 avant notre ère, mais rien ne prouve qu'ils en aient fait des balles, et on ne connaît aucun terrain sur leur territoire. En revanche, le terrain le plus ancien que nous connaissons, et qui vient d'être découvert par une équipe américaine, est à Paso de la Amada, dans le Chiapas, au Sud-Ouest du Mexique. Le seul autre terrain antérieur à 200 avant notre ère est dans la même région, à Abaj-Takalik au Guatemala : il est daté de 800 avant notre ère.

Selon Éric Taladoire, de l'Université Paris 1, cette localisation confirme l'importance culturelle des groupes Mixé-Zoque qui occupaient l'Ouest du Mexique et du Guatemala à l'époque.

Ces populations, qui ont par ailleurs perfectionné le système d'écriture en usage en Mésopotamie, auraient diffusé l'ulama au gré de leurs contacts avec les populations voisines, y compris, en suivant la côte du Pacifique, jusqu'en Amérique du Nord.



P.S. d'après E. Taladoire et T. Leyenaar



Wardwell/Chicago, Art Museum

Les joueurs d'ulama, jeu de balle apparu il y a plus de 3 400 ans au Chiapas, sur la côte Ouest du Mexique, ne frappaient la balle que du coude, de l'épaule, de la hanche ou du genou.

Dopage bénéfique

Un nouveau matériau dopé assure la conservation des mémoires holographiques.

L'explosion de la quantité d'information numérique a stimulé la recherche des nouvelles méthodes de stockage des données. Une idée prometteuse date des années 1970 : elle consiste à utiliser des hologrammes, des motifs d'interférences «gelés» sur un support, ici créés par un laser dans un cristal. Un cristal de la taille d'un morceau de sucre pourrait emmagasiner sous forme d'hologrammes des milliers de milliards de bits d'informations, une densité de stockage bien supérieure aux possibilités actuelles des meilleurs disques magnétiques.

De surcroît, le temps d'accès aux données est très rapide. Pourtant, les mémoires holographiques ne sont pas encore viables commercialement. Une percée d'un groupe de l'Institut de technologie de Californie pourrait remédier à la situation. Un hologramme est créé lorsque deux lasers, dont l'un code les données, interfèrent. La figure d'interférence est enregistrée par un matériau photosensible, et c'est à elle que les propriétés optiques sont modifiées par les faisceaux lumineux. Pour lire l'hologramme, on envoie sur le cristal un faisceau laser. L'hologramme diffracte alors la lumière selon une figure qui contient l'information stockée. Toutefois, en lisant l'information, le laser «use» l'hologramme dont la mémoire s'efface peu à peu.

Toutes les méthodes élaborées pour faire durer les hologrammes sont imparfaites : l'une de ces techniques nécessite que le cristal soit chauffé, une autre requiert des lasers de forte puissance. Le groupe de l'Institut de technologie de Californie, dirigé par Demetri Psaltis, a découvert une méthode d'utilisation plus simple, fondée sur l'utilisation d'un cristal de niobate de lithium dopé au fer et au manganèse.

Lorsqu'ils sont excités par un rayonnement de longueur d'onde spécifique, ces atomes dopants libèrent des électrons qui sont captés par les atomes dopants voisins. Le champ électrique interne est alors modifié, et les atomes dopants enregistrent ainsi le champ électrique de l'hologramme. Le fer et le manganèse ne réagissent pas à la même longueur d'onde : le fer libère des électrons lorsqu'il est soumis à la lumière rouge ou ultraviolette, tandis que

Rallye-concours

Samedi 10 et dimanche 11 octobre

50 lots à gagner

dans le cadre de

*La Semaine
de
La Science*



Jeu : Sur la piste de la Science

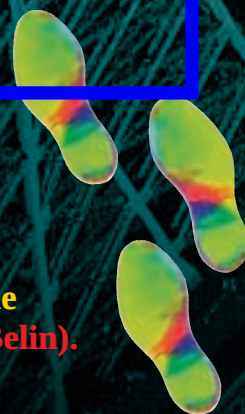
Découvrez, en marchant,
un Paris scientifique inédit

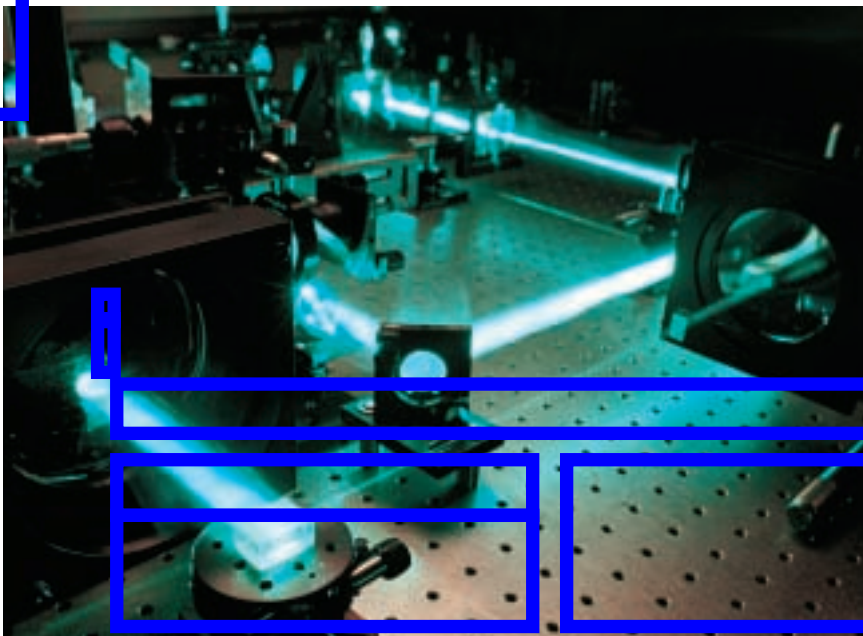
Départ entre 12 h 30 et 16 h
Square René Viviani, Paris 5^e

Participation gratuite

Renseignements (répondeur) :
01 40 46 76 59

Un jeu conçu par
Sciences-ressources et inspiré par le
Guide du Paris savant (Éditions Belin).





Charles O'Rear

L'enregistrement des mémoires holographiques est durable avec des cristaux de niobate de lithium (bloc translucide, en bas) dopés par des métaux.

le manganèse ne réagit qu'à la lumière ultraviolette.

Les physiciens ont découvert qu'ils pouvaient enregistrer des données durablement dans leur cristal en les éclairant par de la lumière rouge.

tenos qu'il enregistreront l'hologramme avec deux faisceaux laser. Cette méthode assure que l'hologramme créé par les faisceaux laser rouges est enregistré à la fois par les atomes de fer et par les atomes de manganèse – bien

que le manganèse soit insensible à la lumière rouge.

Après cet enregistrement, la lumière ultraviolette est éteinte. L'hologramme résultant est lu par un faisceau laser rouge. La lumière rouge ne fait pas réagir les atomes de manganèse, de sorte qu'ils retiennent les données sans perte. Comme prévu le signal émanant des atomes de fer diminue durant la lecture, mais le nombre suffisant d'atomes de manganèse préserve l'intensité de l'hologramme même après de nombreuses lectures. On enregistre un nouvel hologramme en rallumant la source ultraviolette. La découverte de cette méthode est très importante, le matériau n'est pour l'instant sensible qu'à de trop fortes intensités pour que la commercialisation soit envisageable. De surcroît, l'épaisseur du cristal nécessaire pour enregistrer de grandes quantités de données aggrave cette difficulté.

Cependant, D. Psaltis est confiant. Les cristaux doublement dopés utilisés jusqu'ici ont été fabriqués il y a 20 ans, et de meilleurs cristaux, en cours de collaboration, compteraient les performances. Des cristaux doublement dopés au cérium à la place du fer sont particulièrement intéressants.

La plus ancienne tortue marine connue

Elle pleurait son sel.

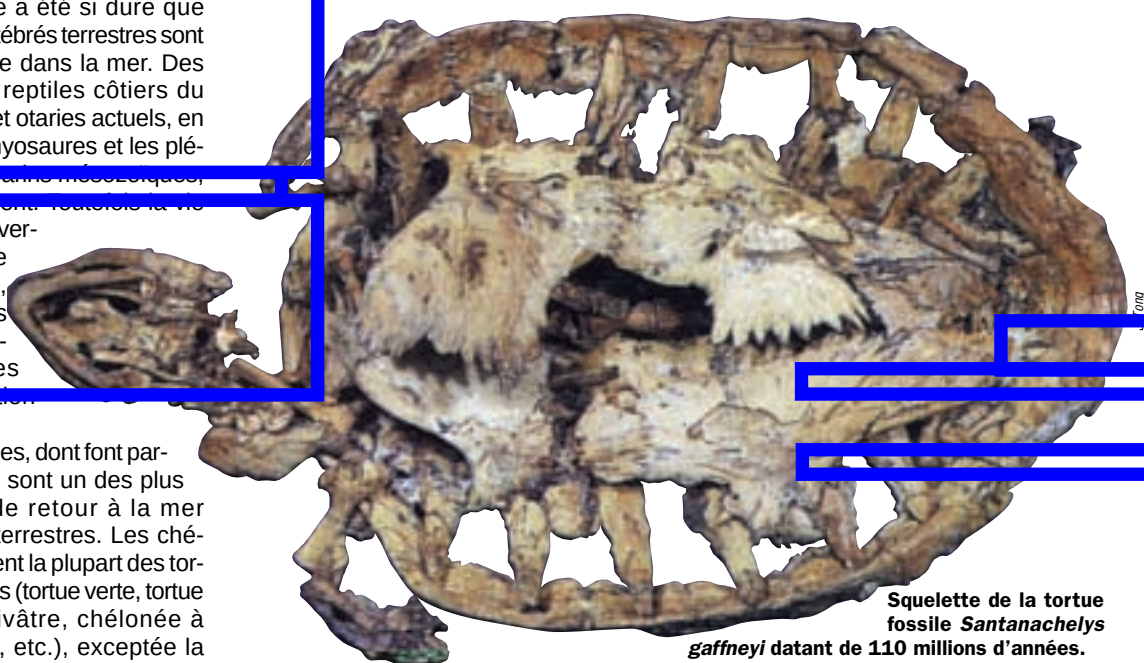
La vie sur terre a été si dure que nombre de vertébrés terrestres sont retournés vivre dans la mer. Des placodontes, reptiles côtiers du Trias, aux ichthyosaures et les plésiosaures, reptiles marins mésozoïques, les exemples abondent. Toutefois, dans la mer, pour les vertébrés terrestres, pose bien des problèmes, parmi lesquels les plus importants sont l'excrétion du sel et les moyens de locomotion aquatiques.

Les tortues marines, dont font partie les chélonioïdes, sont un des plus beaux exemples de retour à la mer chez les vertébrés terrestres. Les chélonioïdes comprennent la plupart des tortues marines actuelles (tortue verte, tortue caret, chélonée olivâtre, chélonée à dos plat, caouanne, etc.), exceptée la

tortue luth. On sait que les chélonioïdes se sont diversifiés au cours du Crétacé supérieur (il y a 100 à 65 millions d'années), mais les données fossiles antérieures du Crétacé supérieur étaient rares. La nouvelle découverte d'une tortue marine fossile, récem-

ment décrite par Ren Hirayama, de l'Université Teikyo Heisei au Japon, a repoussé de quelque dix millions d'années dans le passé l'histoire des chélonioïdes et précisé leur évolution.

Cette nouvelle tortue chélonioïde fossile, provenant de la for-



Squelette de la tortue fossile *Santanachelys gaffneyi* datant de 110 millions d'années.

mation Santana (Crétacé inférieur, il y a 110 millions d'années) dans la partie Nord-Est du Brésil, représente un nouveau genre et une nouvelle espèce, *Santanachelys gaffneyi*. C'est une petite tortue dont le squelette ne mesure que 20 centimètres de longueur. Le squelette fossile, presque complet, est parfaitement conservé.

L'examen de ce chélonioïde primitif révèle deux aspects liés à des phénomènes évolutifs d'importance capitale. Premièrement, cette petite tortue crétacée du Brésil possède un grand foramen interorbitaire. Cette cavité contient, chez les tortues marines, les glandes lacrymales, situées en arrière du cerveau. La plupart des vertébrés marins sont confrontés en permanence à des problèmes de perte d'eau et d'excès de sel. Les vertébrés marins qui ont eu des ancêtres terrestres ont des liquides corporels moins salés que l'eau de mer, et la réalimentation en eau de mer augmente la teneur en sel du corps. Or les reins des reptiles marins, les tortues marines par exemple, ne sont pas capables d'éliminer cet excès de sel. Pour survivre dans la mer, y manger et y boire, les tortues marines ont un ingénieux dispositif d'excrétion du sel consistant d'une importante modification des glandes lacrymales situées autour de l'œil : ces glandes sont beaucoup plus grandes que le cerveau. La présence d'un grand foramen interorbitaire chez la tortue brésilienne indique le développement des glandes lacrymales, et donc l'apparition de ce dispositif d'excrétion du sel.

Deuxièmement, les membres de cette tortue brésilienne constituent des palmes primitives, dont les doigts sont encore mobiles, comme chez les tortues d'eau douce. Chez les tortues marines actuelles, les membres antérieurs et postérieurs sont transformés en véritables nageoires et les doigts sont devenus rigides pour rendre la nage plus efficace.

Ce chélonioïde primitif est le plus ancien représentant connu de la famille des Protostegidae, dans laquelle on place la fameuse *Archelon* du Crétacé supérieur d'Amérique du Nord, la plus grande tortue marine connue, qui vivait il y a environ 75 millions d'années et dont la carapace peut dépasser dix mètres de longueur. Il est aussi le premier représentant de cette famille à être signalé en Amérique du Sud. L'étude de ce spécimen remarquable indique qu'au cours de l'évolution des tortues marines, le dispositif d'excrétion du sel, et donc l'occupation d'un habitat marin, est apparu avant l'apparition de nageoires rigides.

Haiyan TONG

Un virus de cheval

Certaines personnes atteintes de schizophrénie ou de dépression ont, dans leur sang, des anticorps dirigés contre le virus de la maladie de Borna.

Un agent pathogène est généralement spécifique à une espèce : une «barrière d'espèce» protège chaque espèce des micro-organismes qui infectent les autres espèces. Pourtant, des rongeurs, des oiseaux ou encore de petits primates peuvent être contaminés par un même virus, le virus de la maladie de Borna ou Bornavirus, agent pathogène qui franchit les barrières d'espèces.

À la fin du XIX^e siècle, une épidémie a dévasté l'écurie de Borna, une ville de garnison de Saxe, en Allemagne. La maladie frappe de façon sporadique, notamment dans les fermes du Sud-Ouest de l'Allemagne, et l'infection a été identifiée chez d'autres animaux domestiques, tels le mouton, la vache ou le chat. Le virus responsable de la maladie, nommé BDV (d'après l'anglais *Borna Disease Virus*, c'est-à-dire le virus de la maladie de Borna), a été isolé en 1972 et séquencé en 1994. Selon l'animal, les symptômes varient, mais une infection par le virus de la maladie de Borna déclenche des mouvements anormaux, un comportement agressif ou une hyperactivité. Cette phase est suivie d'une phase apathique et somnolente. Certains animaux deviennent obèses. En phase terminale, l'animal est totalement paralysé. Toutefois, une infection par le Bornavirus ne signifie pas nécessairement que l'animal soit malade : il existe une proportion notable de porteurs sains, des animaux asymptomatiques chez qui l'on détecte des anticorps contre le virus.

Diverses données expérimentales indiquent que le virus pénètre dans l'organisme par la voie respiratoire et infecte d'abord l'épithélium neuro-olfactif. Il gagne ensuite le système nerveux central en cheminant par les neurones. Il se multiplie surtout dans la région limbique du cerveau, qui participe au contrôle des comportements. Il infecte les neurones, puis les autres cellules du cerveau (les cellules gliales et les astrocytes). Il déclenche des réactions immunitaires violentes dans le cerveau des animaux malades, ce qui serait la principale cause des symptômes observés. Quand on marque le virus par des anticorps, on le trouve localisé sur les neurones qui por-

tent les récepteurs de certains neurotransmetteurs, notamment ceux du glutamate. De plus, le virus perturbe le système de signalisation chimique utilisé par les neurones pour communiquer, notamment le système de la dopamine.

Après avoir été infectés, les neurones expriment à leur surface des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe I. Ces molécules du soi, associées aux antigènes viraux présentés à la surface des neurones infectés, rendent ces neurones sensibles à l'action destructrice des lymphocytes T cytotoxiques. Le Bornavirus est un virus persistant car même quand le système immunitaire s'épuise et que l'inflammation cesse, le virus continue à se multiplier. De surcroît, comme l'ont montré Daniel Gonzalez-Dunia et ses collègues de l'Institut Pasteur, le Bornavirus perturbe directement le fonctionnement des neurones, indépendamment de leur destruction par les réactions inflammatoires.

On ignore généralement l'origine des maladies psychiatriques et notamment des deux les plus fréquentes, la schizophrénie et la maladie maniaco-dépressive. Or, plusieurs études ont montré, d'une part que le Bornavirus infecterait l'homme et que, d'autre part, près d'une personne sur cinq, en hôpital psychiatrique, a des anti-



À la fin du XIX^e siècle, les chevaux de Borny, une ville de garnison allemande, ont été anéantis par un virus encore inconnu alors et qui fut nommé Bornavirus.

corps dirigés contre le Bornavirus ; cette proportion atteindrait même 37 pour cent chez les personnes ayant un syndrome dépressif grave (dans la population générale, moins de deux pour cent des personnes ont des anticorps contre le Bornavirus).

Ces maladies psychiatriques ont une origine complexe qui fait intervenir de nombreux facteurs. Elles se déclencheraient chez des personnes génétiquement prédisposées (plusieurs gènes sont vraisemblablement nécessaires). Des facteurs environnementaux, tels des agents pathogènes, pourraient intervenir. Cela expliquerait pourquoi deux «vrais» jumeaux (homozygotes) n'ont pas la même susceptibilité à ces maladies.

Plusieurs questions restent ouvertes : quel est le mode d'infection ? Existe-t-il un réservoir animal à l'origine de la contamination humaine, et de quel animal s'agirait-il ? Le Bornavirus est-il en cause dans les maladies psychiatriques ? Le virus n'infecte-t-il que les neurones ou a-t-il d'autres cibles, notamment des cellules sanguines ? Ainsi certaines personnes ont des anticorps dirigés contre le Bornavirus, ce qui indique un contact ancien avec le virus ; chez d'autres on détecte de l'ARN viral dans le sang, ce qui révèle une contamination récente, le virus continuant à se multiplier, donc à produire de l'ARN qui sert à la fabrication de protéines virales, assemblées en nouvelles particules virales. Si le virus est persistant, on devrait trouver sans cesse des traces d'ARN viral ce qui n'est pas le cas (à moins qu'on ne le recherche pas là où il se trouve).

Les réponses s'accumulent, mais ne font souvent que diminuer certaines hypothèses. Ainsi, selon une étude menée au Japon, les personnes qui consomment de la viande de cheval ne cuisinée n'ont pas d'anticorps contre le Bornavirus, bien que certains chevaux soient porteurs du virus : la consommation de viande de cheval ne favorise pas la contamination.

Marie-Édith LAFON, Laboratoire de virologie, CHU Pellegrin - Bordeaux II



Des détecteurs répartis sur le sol (ici au Gran Sasso, en Italie) enregistrent les particules créées par les rayons cosmiques de haute énergie qui percutent les atomes de l'atmosphère. Le détecteur Auger, en construction en Argentine et aux États-Unis, couvrira une surface au sol de 5 000 kilomètres carrés.

Désintégration de cryptons

La désintégration de particules primitives produirait les rayons cosmiques les plus énergiques.

Depuis 30 ans, l'observation de rayons cosmiques aux énergies extrêmes déroute les physiciens. D'où viennent ces particules dont l'énergie est des dizaines de millions de fois celle des particules produites dans les accélérateurs les plus performants ? Selon Michael Birkel et Subir Sarkar, de l'Université d'Oxford, elles résulteraient de la désintégration de particules très massives créées après le Big Bang : les cryptons.

Les rayons cosmiques les moins énergiques, très nombreux, sont détectés directement par des satellites. En revanche, les rayons cosmiques de haute énergie

sont rares, et on les détecte indirectement en analysant les gerbes de particules qu'ils produisent par collision avec les atomes de la haute atmosphère. Depuis 1962, seulement deux gerbes correspondant à des particules d'énergie supérieure à 10^{20} électronvolts (soit 16 joules, du même ordre de grandeur que l'énergie d'un ballon de football lors d'un penalty) ont été enregistrés. Sur cette base, les astrophysiciens estiment que moins d'un rayon cosmique d'énergie supérieure à cette énergie pénètre dans un kilomètre carré d'atmosphère chaque siècle.

Ces rayons cosmiques de haute énergie sont peut-être des protons, mais on ignore leur nature. Proviennent-ils d'objets cosmiques lointains, tels les quasars et les galaxies radio ? Vraisemblablement pas : en raison des interactions (donc des pertes d'énergie) avec les photons du fond diffus cosmologique, l'Univers devient opaque aux rayons cosmiques de haute énergie à partir d'une distance de 300 millions d'années-lumière. Ainsi, ces rayons cosmiques doivent provenir d'une distance inférieure à 300 millions d'années-lumière. Or, aucune source plausible n'a été observée jusqu'à ces distances.

Pour contourner ce problème, les astrophysiciens ont imaginé que ces rayons cosmiques proviennent de la désintégration de particules massives proches, créées au début de l'Univers. À la fin de l'inflation, la période d'expansion très rapide qui a suivi le big-bang, des particules massives se sont formées. Prévues par la théorie des cordes, selon laquelle toutes les particules sont décrites comme des vibrations d'objets à une dimension, ces particules massives formeraient la plupart de la matière noire de l'Univers.

De la même manière que les quarks s'assemblent pour former les protons ou les neutrons, ces particules à la charge électrique fractionnaire s'assembleraient pour former des cryptons, de charge entière. Il est difficile de prédire exactement combien de ces particules survivent depuis le big-bang, mais les théoriciens estiment que si leur masse est égale à environ 1 000 milliards de fois la masse du proton, leur désintégration expliquerait la répartition des rayons cosmiques de très haute énergie détectés sur Terre.

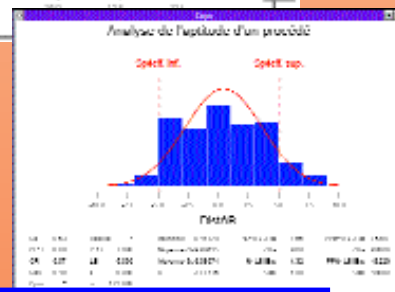
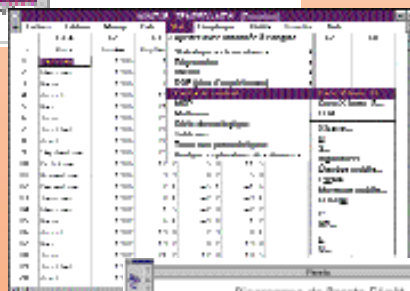
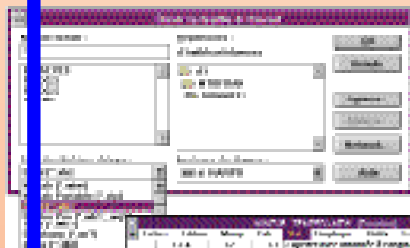
Depuis trois ans, de nombreux théoriciens cherchent à expliquer l'origine des rayons cosmiques de haute énergie par la désintégration de particules massives. Ces suppositions de théoriciens subiront l'épreuve de l'expérience à l'aube du prochain millénaire : à l'aide de l'Observatoire international Auger, le gigantesque détecteur de rayons cosmiques en construction en Argentine et aux États-Unis, les astrophysiciens seront en mesure de tester leurs théories.

MINITAB®

Logiciel de Statistiques

Analysez facilement vos données.

Contactez nous:
08 00 77 72 00
E-Mail: bienvenue@minitab.fr
<http://www.minitab.com>



MINITAB SARL®

L'analyse des données simplifiée

Minitab SARL, 1 Cité Paradis, 75010 Paris

Tél: 01 55 33 12 36 Fax: 01 55 33 12

Toutes les noms produits et les marques déposées sont de leurs compagnies respectives

© Minitab Inc., 1996 MINITAB est une marque déposée de Minitab Inc.

Les manchots

Coopération sous-marine?

Les manchots sont aussi populaires, que mal connus, même des naturalistes. Les explorateurs ont décrit les manchots comme des êtres hybrides, mi-poissons, mi-oiseaux, incapables de voler. Au début du XIX^e siècle, Jules Dumont d'Urville nous livre ses impressions sur ces oiseaux-poissons, qui est organisé de façon à pouvoir plutôt nager que voler. Au lieu d'ailes, il a deux nageoires aplaties, et son corps est couvert d'un feutre serré, plutôt semblable à de la soie ou à de la plume ; on dirait même que ses petites rames sont couvertes d'écailles. L'étude des manchots a révélé un comportement de recherche de nourriture inattendu.

L'observation de ces oiseaux montre qu'il faut rapprocher les manchots non pas des Ratites (autruches, émeus...), comme leur inaptitude au vol l'inciterait à supposer, mais plutôt des Procellariiformes (albatros et pétrels), qui sont d'excellents voiliers. En effet, les manchots ne volent

pas dans l'air, mais dans l'eau : toutes leurs caractéristiques contribuent à leur adaptation à ce milieu : leur morphologie, musculature, ossature, plumage, vue, ainsi que leur physiologie. Les manchots ne sont plus envisagés comme des êtres hybrides, mais comme des spécialistes du milieu marin, issus de 50 millions d'années d'évolution.

Cette capacité à plonger leur offre la possibilité de rechercher leur nourriture (poissons, crustacés, calmars) là où les autres oiseaux ne vont pas. L'acquisition de nouvelles ressources a sans doute conduit à une pression de sélection importante, probablement à l'origine de la divergence de ce groupe d'oiseaux par rapport à leurs cousins Procellariiformes.

Les manchots passent plus de 70 pour cent de leur temps en mer, ce qui rend leur étude très difficile. Depuis une décennie, la miniaturisation de l'électronique permet d'enregistrer les comportements à distance à l'aide de différents appareils électroniques miniaturisés (balises ARGOS, sondes stémocales, émetteurs VHF, capteurs de pression, enregistreurs d'activités...). Pour cette étude, nous avons utilisé des enregistreurs de plongée, dont nous récupérons les informations à l'aide d'un ordinateur. L'enregistreur est profilé et collé au bas du dos des animaux afin de minimiser les perturbations hydrodynamiques, puis il est délicatement récupéré, sans abîmer le plumage, lorsque l'oiseau regagne sa colonie. Nous avons ainsi équipé plusieurs femelles de gorfous sauteurs d'une même colonie à la veille de l'un de leurs départs en mer journaliers.

L'île d'Amsterdam (8° 30' Sud, 77° 32' Est – zone subtropicale de l'océan Indien) n'abrite qu'une seule espèce de manchots : le gorfou sauteur, *Eudyptes chrysocome moseleyi* (voir la photographie). C'est l'un des plus petits manchots (environ deux à trois kilogrammes pour 50 centimètres de hauteur). Après la ponte, lors de l'élevage des jeunes poussins, seules les femelles chassent pour les

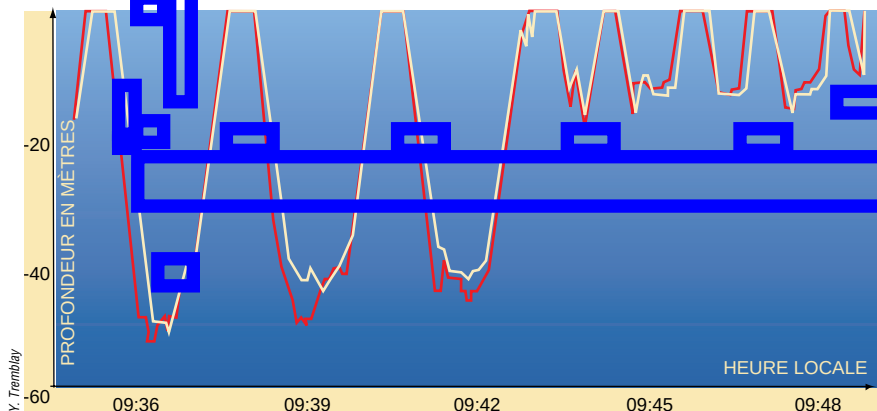
nourrir, les mâles restant sur la colonie pour les protéger. Les femelles se rassemblent le matin au lever du jour, partent en mer par petits groupes, et reviennent le soir pour régurgiter leur pêche à leur progéniture.

Sur cinq femelles que nous avons équipées en même temps d'enregistreurs de plongée, deux ont effectué ensemble près de 300 plongées. Elles ne sont pas parties de la colonie en même temps, mais elles se sont rejointes en mer après une heure de déplacement et ont alors plongé ensemble pendant sept heures (60 pour cent du temps passé en mer). L'écart entre deux plongées synchrones était rarement supérieur à quatre secondes, et la différence de profondeur qui les séparait était souvent inférieure à un mètre, qu'elles plongent à 10 mètres ou à 50. Elles sont donc restées en contact visuel sous l'eau tout au long de leur période de chasse et lors de la plongée, leurs positions respectives étaient maintes fois d'elles se plongeaient la première et se trouvait quasi systématiquement au-dessous de l'autre à une distance de 25 mètres. Ainsi, les manchots sont très coordonnés et coopèrent quand ils plongent pour chasser ; les deux femelles se nourrissent des mêmes types de proies, essentiellement des crustacés de petite taille (du krill) et quelques petits poissons et calmars.

Ces expériences montrent pour la première fois que certains manchots se comportent collectivement sous l'eau, probablement pour déjouer les tactiques antiprédateur de leurs principales proies. Celles-ci échappent à leurs prédateurs en se sauvant brusquement et de façon imprévisible, créant une confusion chez le prédateur. La coopération augmente probablement l'efficacité individuelle de capture des manchots en maintenant, par leur présence concertée, la cohésion des proies au sein d'un banc (cette tactique a été observée chez les orques).

Ces résultats complètent les observations des manchots à la surface de l'eau, où ils sont souvent observés en petits groupes. Le coût des enregistreurs diminuant, il sera bientôt possible d'équiper tous les membres d'une petite colonies de manchots et de compléter cette étude afin d'approfondir notre connaissance des comportements coopératifs et de leur évolution dans le monde animal. En effet, ces comportements se rencontrent pas seulement chez l'homme ou les mammifères ; ils ont été observés aussi chez des oiseaux, des insectes, des poissons, des barracudas et même des crustacés terrestres (cloportes) qui n'ont pourtant que quelques centaines de cellules nerveuses dans leurs ganglions cérébraux !

Yann TREMBLAY et Yves CHEREL
Centre d'études biologiques de Chizé



Les plongées de deux femelles gorfous sont synchrones (en bas). En haut, un Gorfou sauteur (océan Indien).

Le mal de dos

RICHARD DEYO

De très nombreuses personnes souffrent de douleurs dans le bas du dos, dont l'origine reste mystérieuse. Divers traitements sont utilisés, mais la stratégie la plus efficace est souvent d'attendre que la douleur disparaisse spontanément.

Les impôts et la mort ne sont pas les seules certitudes que réserve la vie : il y a aussi le mal de dos. Près de 80 pour cent de la population adulte souffre un jour de douleurs dans le dos : celles-ci sont une des causes les plus fréquentes de consultations, d'hospitalisations, d'interventions chirurgicales et d'arrêts de travail. En France, en 1990, on a estimé à neuf milliards de francs le coût des lombalgies. Pourtant, on ignore presque tout d'elles.

Aujourd'hui, dans les pays industrialisés, les travailleurs sont souvent déchargés des tâches les plus pénibles, désormais assurées par des robots, et de nombreuses chaînes de production ont été automatisées. Simultanément, les méthodes d'imagerie de la colonne vertébrale et les traitements – chirurgicaux ou non – ont été améliorés, de sorte que son diagnostic de mieux en mieux les anomalies de la colonne vertébrale. Pourtant, les lombalgies, ou douleurs du bas du dos, progressent inexorablement, et les spécialistes n'ont qu'une connaissance limitée de l'origine de ces douleurs... peut-être en raison de vieux préjugés, fondés d'ailleurs sur des preuves ténues que sur des essais cliniques rigoureux.

On sait aujourd'hui que la plupart des personnes ayant mal au dos récupèrent rapidement et presque complètement, même lorsque la douleur a été forte, quelle que soit la méthode de traitement adoptée (voire sans traitement du tout). Les quelques personnes contraintes d'arrêter leur travail reprennent leur activité au bout de six semaines environ ; seule une petite proportion ne retravaillera jamais

(environ un pour cent de la population active est en arrêt de travail pour douleurs chroniques dans le dos). En revanche, les récurrences sont fréquentes ; elles se déclenchent généralement comme le premier épisode, et la plupart des malades se rétablissent encore, rapidement et spontanément.

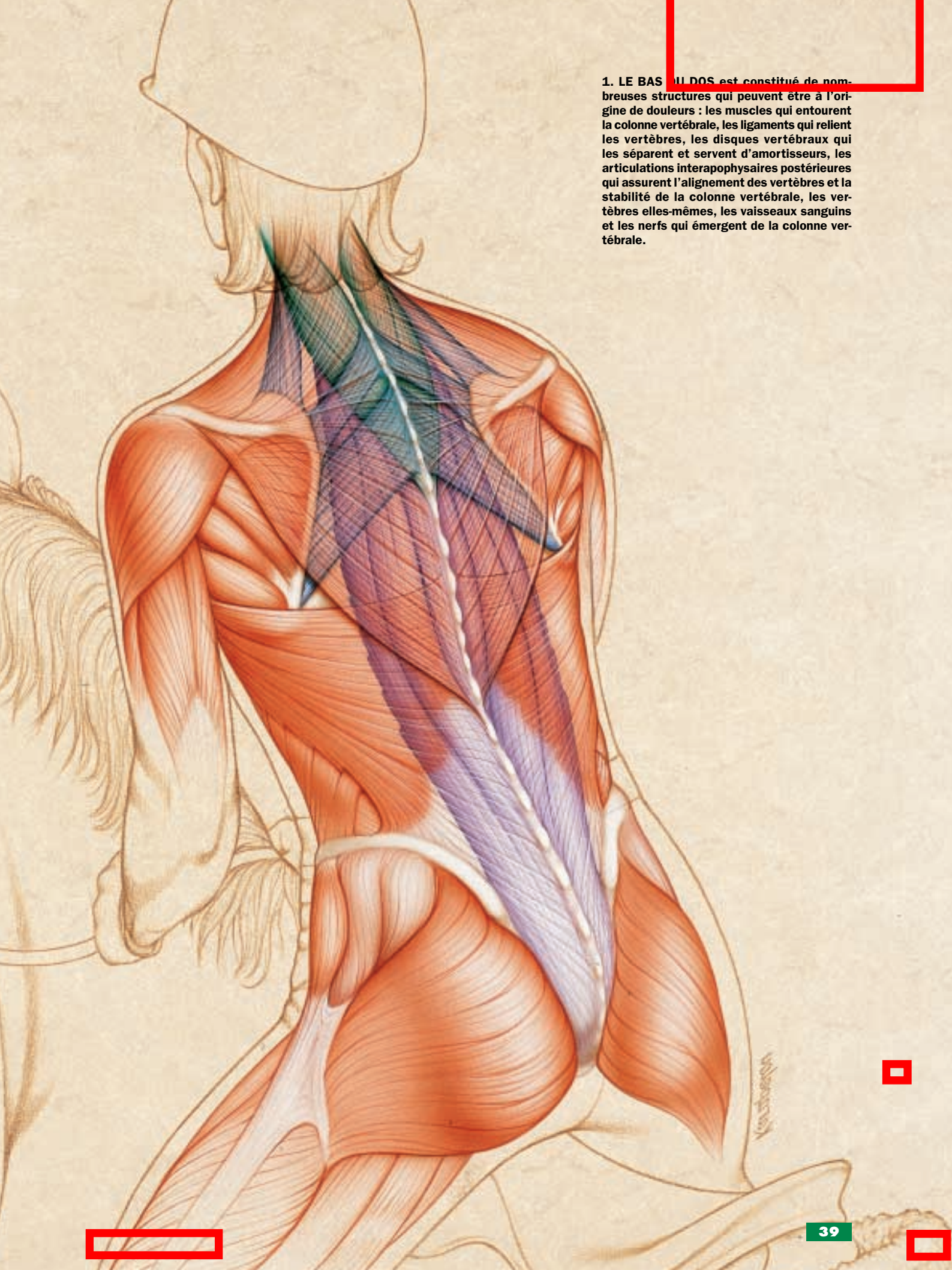
L'origine des douleurs

Chacun des constituants, mécanique ou biochimique, du dos peut être à l'origine d'une lombalgie. Les atteintes des divers muscles et des ligaments, les arthroses des articulations vertébrales postérieures ou des disques intervertébraux sont des causes fréquentes. Les hernies discales, où le « coussinet » souple qui sépare deux vertèbres dépasse le pourtour du disque et irrite la racine d'un nerf voisin, sont douloureuses. Parfois les douleurs sont dues à des sténoses vertébrales, c'est-à-dire à des rétrécissements de la colonne vertébrale, qui comprime un nerf. Les sténoses sont surtout des maladies des personnes âgées, dont les disques, les articulations postérieures et les ligaments de la colonne vertébrale sont usés.

De surcroît, les anomalies héréditaires de la colonne vertébrale, souvent asymptomatiques, sont parfois douloureuses. Les maladies touchant les reins, le pancréas, l'aorte ou les organes sexuels engendrent aussi des lombalgies. Enfin, ces douleurs sont parfois les premiers symptômes de maladies graves encore silencieuses, tels les cancers, les infections des os ou des formes rares d'arthrite. Heureusement, ces causes graves sont extrêmement rares :



John W. Karapetou



1. LE BAS DU DOS est constitué de nombreuses structures qui peuvent être à l'origine de douleurs : les muscles qui entourent la colonne vertébrale, les ligaments qui relient les vertèbres, les disques vertébraux qui les séparent et servent d'amortisseurs, les articulations interapophysaires postérieures qui assurent l'alignement des vertèbres et la stabilité de la colonne vertébrale, les vertèbres elles-mêmes, les vaisseaux sanguins et les nerfs qui émergent de la colonne vertébrale.

environ 90 pour cent des personnes ayant mal au dos n'ont qu'une lésion, généralement passagère, d'un muscle, d'un ligament, d'un os ou d'un disque intervertébral.

Une difficulté s'ajoute à la complexité anatomique de la région lombaire : on sait mal relier les symptômes, les images obtenues par les diverses méthodes de diagnostic et les modifications anatomiques ou physiologiques. Aussi les médecins s'attachent-ils surtout à éliminer les causes graves de douleur (cancers ou infections) et à vérifier que le plaignant n'a pas un nerf comprimé ou irrité. Dans près de 85 pour cent des cas, les médecins ne donnent aucun diagnostic précis, aucune explication de l'origine de la douleur. En général, les personnes qui consultent ne se souviennent d'aucun incident qui expliquerait la douleur et, si les fardeaux ou les blessures sont des facteurs de risque connus, ils ne sont généralement pas en cause. Les lombalgies apparaissent souvent sans cause identifiée, et les médecins ne s'accordent pas sur les origines possibles des divers cas qu'ils rencontrent.

Certaines douleurs rachidiennes banales sont sans doute dues au stress. Il y a quelques années, Astrid Lampe et ses collègues de l'Université d'Innsbruck avaient montré que les personnes qui avaient mal au dos, souffrant d'une arthralgie, considéraient leur vie comme plus stressante, contrairement à un autre groupe de personnes, également souffrantes, mais dont on connaissait l'origine précise de la douleur. Une nouvelle étude de la même équipe révèle que les douleurs surviennent après des évé-

nements stressants. Selon John Sarno, de la Faculté de médecine de New York, les situations personnelles difficiles produisent une tension physique qui déclenche parfois des douleurs dans le dos ; il suppose que les douleurs sont un dérivatif qui aide à oublier la détresse psychique. Certaines personnes sont soulagées de leurs lombalgies par une assistance psychologique.

De simples meurtrissures musculaires résultant d'une activité physique déclenchent aussi des douleurs rachidiennes, tout comme le font l'usure et les déchirures des disques et des ligaments qui créent des micro-traumatismes s'accumulant avec l'âge. La détermination de l'origine d'une douleur, qui relève souvent plus de l'art que de la science, n'est généralement pas nécessaire, puisque la plupart des guérisons sont spontanées (toute maladie grave doit évidemment être écartée d'emblée).

Des diagnostics difficiles

Pourquoi les diagnostics de l'origine des lombalgies sont-ils généralement peu fiables ? Pour le savoir, nous avons demandé à de nombreux spécialistes d'établir un diagnostic à partir de descriptions de cas fictifs que nous avions rédigés, et de dire quelles seraient leurs recommandations thérapeutiques. Nous avons obtenu le résultat de notre enquête par ce aphorisme : « Dis-moi quel médecin tu as vu, je te dirai quelle maladie tu as. » Par exemple, les rhumatologues furent deux fois plus nombreux que les médecins d'autres spécialités à prescrire des tests de laboratoire pour rechercher des

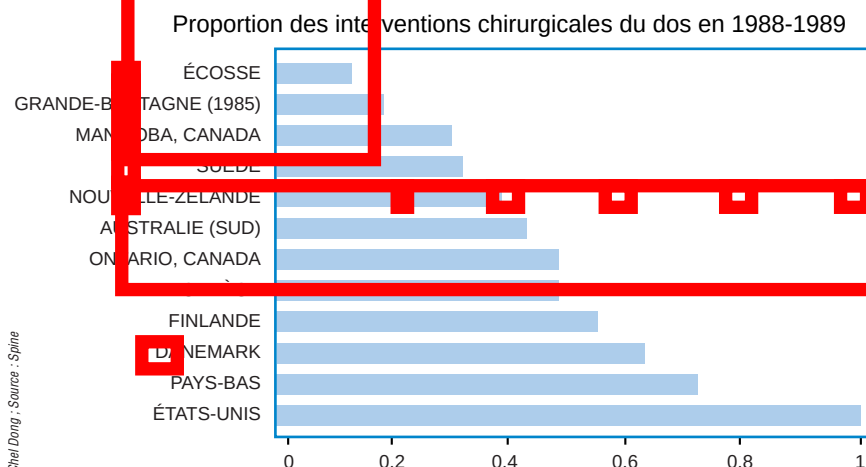
signes d'arthrite. Les neurochirurgiens furent deux fois plus nombreux que les autres à demander des examens par imagerie pour dépister des hernies discales. Enfin, les neurologues ont demandé trois fois plus d'électromyogrammes pour détecter une atteinte des nerfs.

Encore récemment, les médecins prescrivaient souvent une radiographie de la colonne vertébrale à toute personne qui consultait pour un mal de dos, mais cet examen s'est révélé peu informatif : une étude suédoise poursuivie pendant dix ans a montré qu'au moins pour les adultes de moins de 50 ans, les radiographies n'apportaient rien de plus que l'examen clinique, sauf dans un cas sur 2 500 environ.

De plus, certaines anomalies souvent introuvables de la colonne vertébrale ne sont généralement pas à l'origine des douleurs. L'examen des radiographies prises lors de visites médicales d'embauche ou de l'incorporation des recrues montre que les anomalies de la colonne vertébrale sont aussi fréquentes chez les personnes qui n'ont aucun symptôme que chez celles qui ont mal au dos. Les radiographies ne peuvent servir à établir un diagnostic car elles sont trompeuses.

De surcroît, les radiographies de la région lombaire exposent inévitablement les organes sexuels à des doses de rayonnement ionisant plus de 1 000 fois supérieures à celles que l'on reçoit lors d'une radiographie des poumons. Enfin, même les radiologues les plus compétents n'interprètent pas toujours une radiographie de la même façon. Aujourd'hui, quand on recherche l'origine de lombalgies, on réserve les radiographies à certaines personnes, par exemple à celles qui ont subi de graves traumatismes lors d'une chute ou d'un accident de la circulation.

Les médecins avaient espéré que les nouveaux instruments d'imagerie, tels les scanners et les appareils d'imagerie par résonance magnétique, faciliteraient les diagnostics de lombalgies, mais cet espoir a fait long feu : comme les radiographies, ces analyses montrent que certaines personnes qui ne souffrent pas du tout ont parfois de graves anomalies. En 1990, une étude a été réalisée sur 67 personnes qui disaient ne jamais avoir eu ni lombalgies, ni sciatique (une douleur dans une jambe, dont le point de départ est le bas du dos) : des hernies discales, souvent accusées d'être



2. LA PROPORTION DES INTERVENTIONS chirurgicales du dos varie notablement suivant les pays : les personnes souffrant du dos subissent cinq fois plus d'opérations aux États-Unis qu'en Grande-Bretagne. En France, la situation est proche de celle des pays européens ou scandinaves.

Toute personne ayant mal au dos doit subir une radiographie de la colonne vertébrale.

Toute personne ayant mal au dos doit subir une radiographie de la colonne vertébrale.

Q doit prendre son mal en patience jusqu'à ce que la douleur disparaisse.

La plupart des douleurs du dos sont dues à des blessures ou surviennent après avoir soulevé de lourdes charges.

■ Le repos allongé est la base du traitement.

LEARNING OBJECTIVES

Les douleurs du dos obligent en général à arrêter toute activité.

sonnes testées avaient des disques anormaux. La détection d'une hernie discal lors d'un examen par imagerie ne prouve donc qu'une chose : que le patient a une hernie discale.

Ces résultats indiquent que certaines anomalies de la colonne vertébrale ne sont pas douloureuses. Comme les appareils d'imagerie les plus perfectionnés ne repèrent pas les muscles contracturés ou les ligaments lésés, vraisemblablement responsables de la douleur chez une proportion notable des personnes qui ont mal au dos, l'examen clinique est au moins aussi important que l'examen par imagerie, et les interventions chirurgicales pratiquées sur des personnes qui ont des clichés anormaux de la colonne vertébrale, mais qui n'ont pas mal au dos sont inutiles, voire dangereuses. Aujourd'hui de nombreux médecins ne prescrivent des toмоgraphies ou des imageries par résonance magnétique qu'aux personnes que l'on a déjà décidé d'opérer.

Le problème général des lombalgies est encore compliqué par le fait que la plupart des personnes ayant des douleurs aiguës dans la région lombaire guérissent spontanément et vite. D'après une étude qui a comparé divers traitements, les personnes suivies guérissent aussi vite qu'elles consultent un chiropracteur, leur médecin de famille ou un chirurgien orthopédiste. En revanche, le coût des divers traitements varie considérablement : les coûts d'une opération chirurgicale sont bien supérieurs aux honoraires du médecin de famille ! En matière de lombalgie, les personnels soignants devraient se souvenir du précepte d'Hippocrate : « D'abord, ne pas nuire », puisque, le plus souvent, les douleurs aiguës de la région lombaire disparaissent spontanément.

L'alitement a longtemps été considéré comme le meilleur des remèdes. En effet, quelques patients sont soulagés — au moins passagèrement — lorsqu'ils sont allongés et que leurs disques intervertébraux sont moins comprimés. Toutefois, les disques incriminés sont parfois innocents, et la rémission est spontanée. Après avoir été longtemps prescrit, le repos en position allongée est tombé en désuétude il y a une dizaine d'années. Aujourd'hui, l'alitement prolongé est même

à l'origine de douleurs dorsales, ont été décelés par résonance magnétique chez une de ces personnes sur cinq parmi les sujets de moins de 60 ans. Chez la moitié des personnes de ce sous-groupe, on a détecté un renflement de l'un des disques, une autre cause de douleur. Parmi les personnes de plus de 60 ans, plus d'un tiers avait une hernie discale, près de 80 pour cent avaient un renflement d'un des disques, et presque toutes présentaient des dégénérescences discales liées à l'âge. Une sténose de la colonne vertébrale, une chez les adultes plus jeunes, a été observée chez un cinquième des personnes de plus de 60 ans, qui ne se plaignent d'aucune douleur. Une autre étude, portant sur 98 personnes ne souffrant pas du dos, a montré que les deux tiers des per-

Consensus médical pour les lombalgies

Aujourd'hui, les grands axes de la thérapeutique des lombalgies sont reconnus et appliqués par tous les spécialistes des maladies de la colonne vertébrale. Comme dans l'ensemble des pays industrialisés, les lombalgies représentent, en France, l'un des tout premiers problèmes de santé publique. Près de 80 pour cent de la population en souffrent un jour ou l'autre. En outre, les lombalgies les plus courantes, celles qui ne sont pas liées à une maladie autonome et évolutive, sont fréquentes dès l'enfance et l'adolescence, récidivent souvent, et aboutissent parfois à des douleurs chroniques et à des invalidités.

En 1999, les coûts directs des lombalgies ont été estimés à neuf milliards de francs, et neuf pour cent des consultations des médecins généralistes sont motivées par le mal de dos. C'est la première cause de consultations dans les centres antidouleur. À ce chiffre s'ajoute le coût indirect des arrêts de travail : dans le cadre des accidents du travail, 13 pour cent des arrêts (environ 110 000) sont dus, chaque année, à des lombalgies, ce qui correspond à la perte de 3,6 millions de journées de travail. Le coût total des incapacités temporaires ou définitives est d'environ 3,5 milliards de francs par an. À ces coûts indirects tangibles s'ajoutent les coûts indirects intangibles liés aux conséquences psychologiques et sociales ou à la réduction des capacités physiques des personnes souffrantes.

En France, les lombalgies représentent un pôle d'intérêt majeur pour la Société française de rhumatologie, SFR, et sa section Rachis, dont les travaux visent à une meilleure connaissance des causes, des symptômes et des traitements des maladies de la colonne vertébrale, et l'Association française de lutte antirhumatisme, AFLAR, association d'utilité publique orientée vers les relations avec les professionnels, l'information et la prévention.

Le Groupe interdisciplinaire de lutte contre les lombalgies, le GILL, est lié à ces deux structures. Il réunit des membres de la SFR, des médecins

du travail, des rééducateurs, des ergonomes, des pédiatres, des orthopédistes, des kinésithérapeutes, des psychologues, etc. Ces spécialistes tentent d'organiser une lutte concertée contre les lombalgies, notamment une information des médecins et des patients, recherchent des moyens de prévention en milieu professionnel et organisent un congrès sur «Lombalgies de l'enfant et l'adolescent et la prévention des lombalgies», qui aura lieu en mars 1999.

L'attitude des médecins français à l'égard des douleurs du dos est proche de celle présentée par R. Devo. Ils admettent que le repos et l'alitement forcés ne sont pas un traitement des lombalgies, mais un passage obligé, imposé par la douleur, pendant une période limitée, durant laquelle l'administration d'antalgiques est nécessaire. Le maintien des activités possibles et non douloureuses est préconisé.

Cela est important dans un but préventif, car l'un des grands risques du mal de dos est l'installation progressive dans l'inactivité, dans un état de maladie et d'invalidité chroniques. Ces situations chroniques concernent peu de personnes lombalgiques mais leurs conséquences personnelles (sociales, professionnelles et psychologiques) et leur coût socio-économique sont considérables. Chez les personnes qui ont des douleurs, le maintien ou la reprise des activités antérieures est l'un des principaux objectifs du traitement et de la prévention.

La survenue d'une lombalgie bénigne et transitoire est une éventualité à laquelle chacun de nous peut s'attendre. Un exercice physique régulier, une bonne hygiène de vie instaurée dès le jeune âge et maintenue à l'âge adulte sont des moyens de prévention utiles. Certes la survenue de douleurs révèle parfois une affection grave, mais, le plus souvent, la situation est bénigne et les principaux ennemis de la guérison sont l'anxiété et l'inactivité.

Xavier PHELIP - CHU de Grenoble
Président du GILL,
Vice-président de la SFR

proscrit, et l'on conseille aux personnes qui souffrent de lombalgies aiguës de reprendre aussi vite que possible leurs activités normales.

Pas d'alitement

Quand l'alitement était encore en grâce, on avait testé l'efficacité en comparant l'effet de deux ou de sept jours couchés : trois semaines ou trois mois après cet alitement, la douleur résiduelle était identique dans les deux cas, tout comme le nombre de jours d'activité réduite, le comportement quotidien ou la satisfaction vis-à-vis des soins. En revanche, les personnes qui étaient restées le plus longtemps allongées avaient évidemment eu un arrêt de travail plus long. La durée d'arrêt de travail du malade ne dépendait pas de l'intensité de la douleur, de sa durée ni des anomalies observées lors de l'examen clinique. En fait, l'analyse des données montra que le seul facteur permettant de prévoir la durée de cet arrêt était... notre propre prescription du nombre de jours de repos!

D'autres travaux ont confirmé que quatre jours au lit font le même effet que deux jours... ou zéro jour. L'activité ne retarde pas la guérison : les personnes ayant des lombalgies aiguës et qui poursuivent leurs activités aussi normalement que possible se portent plutôt mieux que celles qui restent allongées. Mieux encore : les personnes qui restent actives malgré leurs douleurs aiguës ont, ultérieurement, moins de douleurs chroniques (c'est-à-dire des douleurs qui persistent plus de trois mois) et elles consultent moins de médecins que les personnes qui se reposent en attendant que leur douleur cesse. Ces études, qui montrent l'inefficacité de l'alitement comme traitement des lombalgies, ne doivent pas faire conclure que les arrêts de travail sont toujours inutiles en cas de lombalgies : certaines personnes dont l'activité est physiquement éprouvante ne peuvent pas toujours reprendre leur travail aussi rapidement que celles qui travaillent dans un bureau, par exemple. Néanmoins, les patients ont souvent intérêt, du point de vue strictement physique, à reprendre une activité partielle ou moins difficile, jusqu'à ce que le rétablissement soit complet.

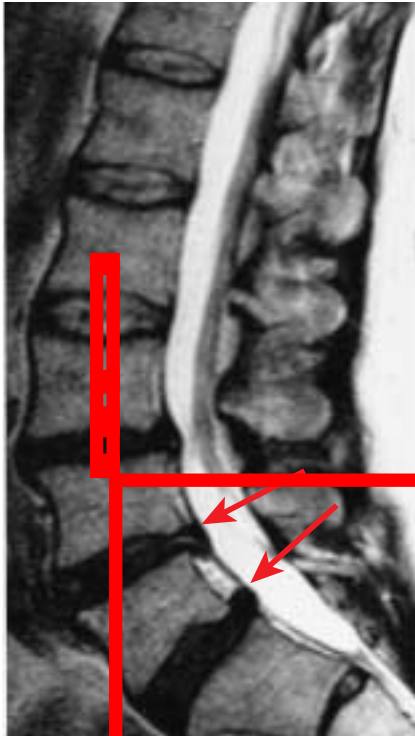
Des travaux récents ont également remis en cause l'efficacité d'autres types de traitement : par exemple,

les étirements de la région lombaire n'ont aucun effet ; la stimulation électrique transcutanée d'un nerf, qui consiste à envoyer un courant électrique modéré dans la zone douloureuse est très peu efficace à long terme ; enfin, les injections dans les articulations vertébrales postérieures de substances telles que la cortisone ne semblent pas plus efficaces que des injections de... sérum physiologique !

En revanche, les études montrent que l'exercice physique est un bon moyen de prévention et de traitement des douleurs de dos chroniques et aiguës. Aucun exercice n'est meilleur qu'un autre, mais les programmes les plus efficaces combinent des séances de remise en forme générale et des entraînements plus spécifiques, destinés à renforcer la résistance et l'endurance des muscles du dos.

Une analyse exhaustive des études cliniques sur le sport et les lombalgies a révélé que les personnes qui, ayant des douleurs aiguës, suivent régulièrement certains programmes d'exercices, peu de temps après la fin de l'épisode douloureux, rechutent moins souvent et ont des arrêts de travail plus courts que les autres. De tels exercices préviennent mieux la douleur que les campagnes d'information (qui expliquent, par exemple, comment soulever une charge) ou que le port de ceintures abdominales, qui limitent les mouvements de la colonne vertébrale. Les personnes qui ont des douleurs chroniques ont intérêt à faire ces exercices. Contrairement aux personnes qui ont des douleurs aiguës et dont l'état s'améliore plutôt en reprenant une activité normale qu'en faisant de la gymnastique, les personnes ayant des douleurs chroniques voient leur état s'améliorer quand elles pratiquent des exercices, même en période douloureuse.

Face à l'impuissance de la médecine classique, de nombreuses personnes qui ont mal au dos suivent d'autres traitements, notamment la chiropraxie et l'acupuncture. Apparemment, les manipulations de la colonne vertébrale réduisent effectivement la douleur à court terme lorsque les lombalgies sont récentes. En revanche, il n'est pas prouvé que la chiropraxie soulage durablement la douleur. En fait, c'est sans doute la guérison naturelle du dos qui valide les différents traitements et qui pousse les personnes guéries à les défendre si ardemment.



3. CETTE IMAGE OBTENUE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE est trompeuse, parce qu'elle révèle deux hernies discales (les flèches) et des anomalies des disques vertébraux, pourtant la personne dont le dos apparaît ici ne souffrait absolument pas. De nombreuses personnes sans aucun symptôme ont souvent des renflements des disques intervertébraux ou des hernies discales. Certaines personnes ayant mal au dos ne présentent pas d'anomalies détectables sur les images et, inversement, des anomalies sur les images ne correspondent pas nécessairement à des douleurs.

Les interventions chirurgicales

À l'opposé, les interventions chirurgicales ne doivent être pratiquées que si plusieurs conditions sont réunies : une hernie discale nette sur une image de la colonne vertébrale, des douleurs, des signes d'irritation des racines nerveuses et l'échec de six semaines de traitement non chirurgical. Alors, une intervention chirurgicale peut soulager rapidement les personnes qui réunissent ces conditions. Malheureusement, même des personnes qui ne relèvent pas de la chirurgie se font opérer, sans réel effet : si la douleur n'a pas pour origine une hernie discale, l'intervention chirurgicale sur un disque intervertébral ne la fera pas disparaître.

La mise en accusation des hernies discales devrait être moins systématique qu'aujourd'hui. Les hernies discales surviennent surtout chez les

adultes âgés de 30 à 50 ans, et déclenchent d'abord des douleurs (des engourdissements et des fourmillements) dans les jambes, la douleur dans le dos étant souvent plus discrète. Une hernie discale ne devrait être tenue pour responsable de douleurs lombaires que si on la repère sur une image obtenue par résonance magnétique et si l'examen clinique révèle une irritation des racines nerveuses, des réflexes anormaux ainsi que des anomalies de la perception, de la résistance musculaire et de la mobilité des jambes.

Des travaux récents ont montré que, même chez des personnes ayant une hernie discale rendue visible par une technique d'imagerie, la guérison est généralement spontanée. Une hernie discale se résorbe souvent spontanément : 90 pour cent environ des malades vont mieux au bout de six semaines. Ainsi, dix pour cent seulement des malades ayant les symptômes d'une hernie discale pourraient subir une intervention chirurgicale ; si l'on tient compte de la proportion de hernies diagnostiquées chez les personnes qui consultent pour lombalgie, on calcule que moins de deux pour cent des personnes qui ont mal au dos doivent être opérés.

Pourtant les hernies discales restent la cause la plus fréquente des interventions chirurgicales du dos. Une étude menée à Oslo, publiée en 1983 et portant sur 28 opérés suivis pendant longtemps, jette le doute sur l'intérêt de ces interventions. Chez les malades opérés, la douleur est soulagée plus rapidement que chez les personnes traitées autrement, mais cette différence disparaît avec le temps. Il n'y a plus aucune différence au bout de quatre ans.

De plus en plus souvent, les personnes âgées de plus de 65 ans sont opérées de sténoses rachidiennes. Le nombre d'opérations de hernies discales a augmenté de 39 pour cent entre 1979 et 1990, tandis que celui des interventions pour cause de sténose a augmenté de 143 pour cent. Pourquoi cet accroissement rapide ? Sans doute parce que le scanner et l'imagerie par résonance magnétique permettent de mieux diagnostiquer les sténoses : identifiées, elles sont alors opérées. Malheureusement, l'intérêt de la chirurgie des sténoses est encore moins net que celui des hernies discales.

De surcroît, les sténoses sont plus difficiles à opérer que les hernies discales, car, contrairement à ces dernières,

qui surviennent à un endroit précis, elles sont disséminées le long de la colonne vertébrale. En outre, les personnes opérées sont plus âgées, donc plus sujettes à des complications, pendant et après l'opération. Enfin, on connaît encore moins que dans le cas des hernies discales l'efficacité à long terme des traitements chirurgicaux ou non chirurgicaux des sténoses vertébrales. Les symptômes des sténoses vertébrales évoluant peu, les décisions sont rarement à prendre dans l'urgence, et le médecin doit tenir compte de l'avis des malades.

La plupart des individus ont mal au dos à un moment ou à un autre de leur vie, mais ils doivent s'y résigner. Quand cette douleur ne résulte pas d'une maladie grave, la meilleure attitude est le stoïcisme, car la douleur disparaît en quelques jours, parfois en quelques semaines. Des antalgiques permettent de passer ce cap.

De nombreux médecins recherchent aujourd'hui, plus finement qu'autrefois, les causes – encore inconnues – des lombalgies et les mécanismes fondamentaux de cette plaie des pays industrialisés. Peut-on encore se contenter de la réponse habituelle des médecins : « Prenez deux aspirines et rappelez-moi » ? Une attitude sans doute plus profitable serait de prendre des médicaments contre la douleur en quantité suffisante, de faire de l'exercice régulièrement, de rester actif – dans la mesure du possible – en cas de douleurs aiguës et de surveiller que la douleur disparaisse spontanément en quelques jours. Patient et longueur de temps font souvent plus que traitements.

Richard DEYO est professeur de médecine interne à l'Université de Washington.

D. C. CHEKIN, R. A. DEYO, K. WHEELER et M. A. CIOL, *Physician Variation in Diagnostic Testing for Low Back Pain*, in *Arthritis & Rheumatism*, vol. 37, n° 1, pp. 15-22, janvier 1994.

M. C. JENSEN, M. N. BRANT-ZAWADZKI, et al., *Magnetic Resonance Imaging of the Lumbar Spine in People without Back Pain*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 331, n° 2, pp. 69-73, 14 juillet 1994.

John E. SARNO, *The Mindbody Prescription : Healing the Body, Healing the Pain*, Warner Books, 1998.

Les chimères de caillie et de poulet pour étudier l'embryogenèse

NICOLAS M. LE DOUARIN

Les greffes de cellules de caillie sur des embryons de poulet ont apporté des informations sur les mécanismes du développement du système nerveux, du système sanguin et immunitaire, et sur la localisation cérébrale de certains comportements innés.

La transformation d'une cellule unique, l'œuf fécondé, en un embryon, puis en un adulte, constitue l'un des problèmes les plus complexes et les plus fascinants de la biologie. L'œuf d'un mammifère, l'homme par exemple, donne naissance à un individu constitué de milliards de cellules qui, au cours de l'embryogenèse, se sont diversifiées et groupées en ensembles structurés constituant tissus et organes destinés à accomplir des fonctions à la fois spécifiques et intégrées.

Il est remarquable de constater que la prolifération cellulaire intense qui caractérise le développement embryonnaire est strictement régulée dans le temps et dans l'espace. Dans la plupart des systèmes en développement, la phase de prolifération cellulaire précède la phase de différenciation. Ainsi, la mise en activité des gènes spécifiques des cellules différenciées (par exemple, les gènes codant les protéines contractiles du muscle ou les protéines spécifiques du neurone) s'accompagne de l'arrêt, ou de la diminution, de l'activité des gènes qui interviennent dans la réplication cellulaire.

En dehors de la prolifération des cellules et de leur différenciation, le développement embryonnaire implique aussi la morphogenèse, c'est-à-dire l'établissement de la forme des organes et du corps, fidèlement transmise d'une génération à l'autre au sein de chaque espèce.

Le programme assurant, à chaque génération, le passage d'une forme d'organisation «simple», la cellule, à

l'être achevé est inscrit dans le patrimoine génétique, où il est codé dans les molécules d'ADN. Celles-ci sont les constituants essentiels des chromosomes contenus dans le noyau de l'œuf et de chacune des cellules qui en sont issues. Certes, les informations codées dans le génome assurent l'exécution du plan de développement qui caractérise chaque espèce vivante, mais l'embryogenèse pose un problème : comment cette information est-elle transmise et comment les différentes phases du programme de développement s'enchaînent-elles ?

Les lois universelles du développement

Les grands événements qui se succèdent au cours de l'embryogenèse ont commencé à être décrits correctement à partir de la moitié du XIX^e siècle. Les sources de l'embryologie moderne remontent à Karl Ernst von Baer (1796-1876), qui a montré que les cellules issues des divisions de l'œuf s'organisent rapidement en trois feuillets, par un processus morphogénétique appelé gastrulation. L'un externe, l'ectoderme, fournira la peau et le système nerveux, tandis que l'endoderme tapissera le tube digestif et fournira les glandes qui lui sont associées ; enfin, de la couche intermédiaire, ou mésoderme, dériveront les muscles, les tissus conjonctif et adipeux, ainsi que la totalité du squelette. Von Baer démontra la généralité de la formation des feuillets embryonnaires dans l'ensemble du règne animal.

Ainsi le développement passe par un stade gastrula constituée d'une future cavité digestive, recouverte d'une couche moyenne et superficielle de cellules. Les cellules-ci seront issues les éléments de communication avec le monde extérieur (système nerveux, organes des sens), et les éléments assurant le soutien (squelette) et les mouvements (muscles) de l'individu.

À partir de la fin du XIX^e siècle, sous l'impulsion de l'école allemande d'embryologie, dont deux des représentants les plus célèbres sont Wilhelm Roux (1850-1924) et Hans Spemann (1869-1941), l'embryologie devient expérimentale : la science de la «mécanique du développement» est créée. Les embryologistes montrent qu'une hiérarchie s'établit rapidement au sein des cellules issues de la division de l'œuf, et que certaines influencent l'évolution de leurs voisines. Le phénomène d'interaction entre cellules et, plus précisément, d'induction est découvert. Il est confirmé par Spemann qui, avec son élève Hilde Mangold, montre qu'une région déterminée de l'embryon de triton est indispensable à la formation du système nerveux. Il nomme cette région l'«organisateur». Ainsi, l'exécution du programme de développement fait intervenir des interactions entre les cellules de l'embryon, et ce dialogue est indispensable au développement intégré de l'ensemble.

Dès lors, on comprend que l'étude du développement embryonnaire occupe une place centrale en biologie, car elle concerne tous les aspects

de la vie, les cellules aux êtres pluricellulaires.

Les progrès de la génétique et de la biologie moléculaire permettent aujourd'hui d'aborder la question fondamentale posée par l'embryologie : comment les gènes dirigent-ils la transformation de l'œuf en un embryon, puis en un adulte ? Au cours des dix dernières années, il est apparu que, dans de nombreux cas, les systèmes génétiques qui jouent un rôle clé dans le développement de l'embryon ont été conservés au cours de l'évolution dans l'ensemble du règne animal, des invertébrés aux vertébrés.

Cela s'est toutefois accompagné d'une complexification considérable des réseaux moléculaires mis en œuvre. Ainsi les gènes dits «homéotiques», responsables de l'identité des différents segments du corps chez la *Drosophile*, sont au nombre de 8 chez les insectes et les homologues de ces gènes sont au nombre de 39 chez les vertébrés supérieurs.

Ces gènes remplissent un rôle fondamental, qui est de régler l'activité d'autres gènes, grâce à la conservation

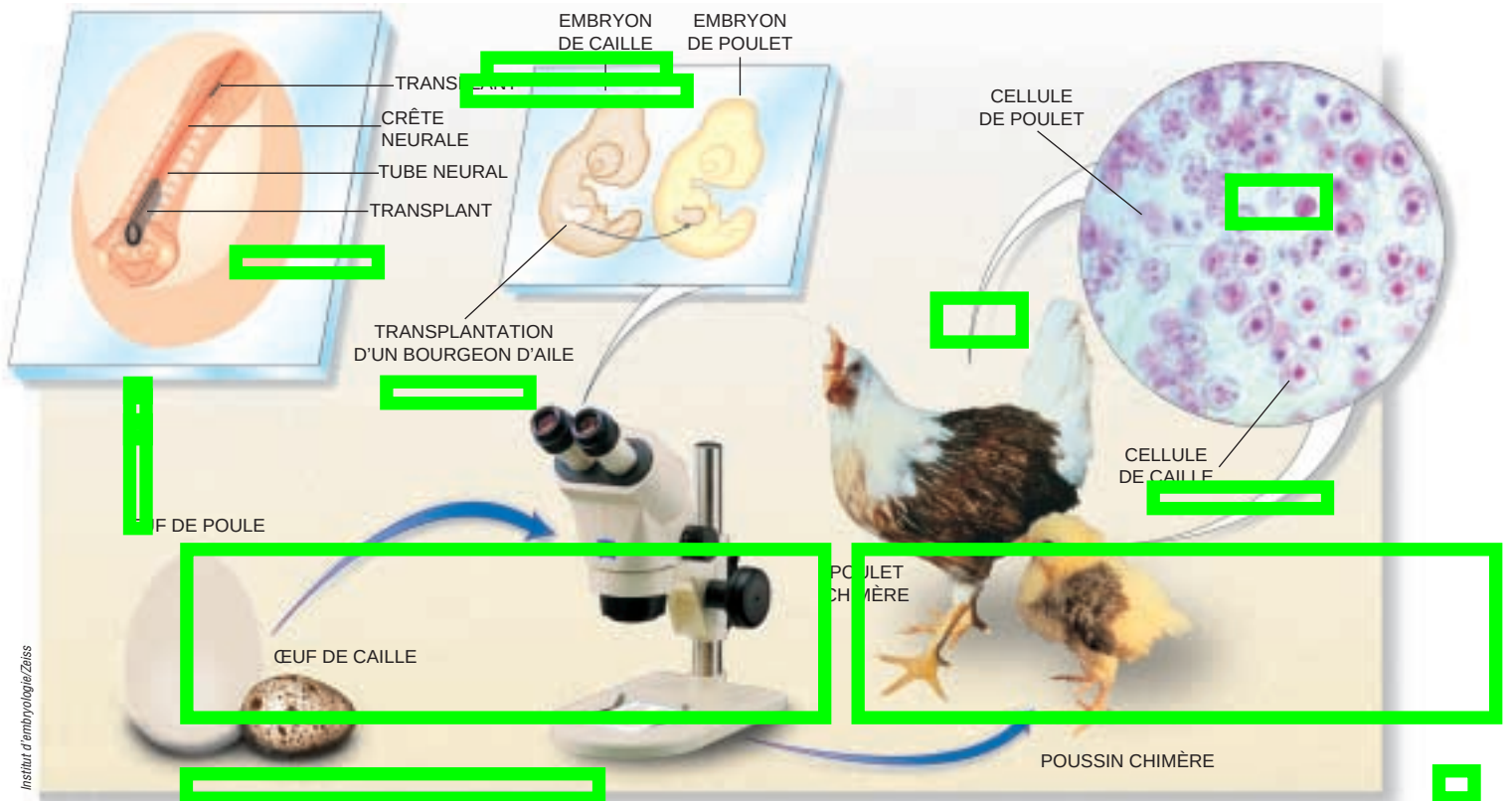
remarquable d'un domaine de la molécule, nommé homéobox ; certains motifs génétiques qui jouent un rôle clé dans les interactions moléculaires ont peu varié au cours de l'évolution. Ils ont été associés et utilisés différemment selon les groupes d'êtres vivants sans qu'un principe directeur apparait puisse en rendre compte, mais plutôt parce que François Jacob a qualifié de «bricolage de l'évolution». Ainsi se sont créés de nouveaux gènes permettant à de nouvelles formes et à de nouvelles fonctions d'apparaître.

Migrations cellulaires et morphogénèse

Les spectaculaires progrès que connaît la biologie du développement tiennent aussi aux avancées des moyens d'investigation à l'échelle cellulaire et subcellulaire. Ceux-ci ont permis notamment de mettre en évidence que la morphogénèse relève de deux mécanismes fondamentaux, la croissance différentielle des territoires embryonnaires et les mouvements des cellules. Ensembles de cellules ou cellules isolées migrent

dans l'embryon. Ainsi, au cours des premiers stades du développement des vertébrés, un repli de l'ectoderme donne naissance à la gouttière neurale. Par apposition de ses bords latéraux naît le primordium de la moelle épinière et du cerveau. De plus, les bourrelets qui limitent la dépression primitive (bourrelets médullaires) fusionnent sur la ligne médiodorsale pour fournir une structure transitoire, la crête neurale (voir la figure 2). Celle-ci est à l'origine d'un grand nombre de types cellulaires et constitue l'exemple le plus frappant de territoire embryonnaire produisant des cellules migratrices qui essaient dans tout l'embryon.

Chez l'embryon des vertébrés, les migrations cellulaires jouent un rôle essentiel dans la construction des tissus. Virtuellement tous les tissus et organes sont formés de cellules d'origines embryologiques diverses. De longues migrations sont nécessaires pour certaines d'entre elles avant qu'elles n'atteignent leur destination, c'est-à-dire les tissus où elles se fixent et à l'histogénèse desquels elles participent. Ces migrations ont généralement lieu alors que les



1. POUR CONSTRUIRE DES CHIMÈRES D'OISEAUX, on enlève une petite zone de la coquille d'un œuf de poule ; on prélève, sous le microscope, une zone bien définie de l'embryon précoce (les zones noires sur l'ébauche neurale, en haut et à gauche) ou de l'embryon plus âgé (l'aile sur les embryons ci-dessus) ; on remplace les zones prélevées sur l'embryon de poulet par les zones identiques d'un embryon de caille, au même stade de développement. Les cellules de caille présentent, quand elles

sont colorées, des granules rouge foncé dont les cellules de poulet sont dépourvues (en haut à droite). Cette différence permet aux biologistes de suivre la migration des cellules greffées. On déduit de telles expériences l'origine embryonnaire des tissus adultes : par exemple, l'origine des cellules qui donnent les ailes (sur le poussin chimère, l'aile issue de cellules de caille est marron) ou celle des cellules qui forment le tronc (la zone marron sur le poulet chimère).

cellules embryonnaires sont encore indifférenciées. Il est donc impossible, dans la plupart des cas, de reconnaître, sur les tissus fixés, les cellules qui se déplacent, car elles ne se distinguent en rien des autres. Ces cellules doivent être marquées d'une manière ou d'une autre si l'on veut en suivre la destinée.

Les migrations cellulaires posent des questions fondamentales en biologie cellulaire : pourquoi des cellules, initialement stables, comme celles de la crête neurale, par exemple, qui proviennent de l'épithélium ectodermique, soudain s'en détachent pour migrer ? Quelles sont les caractéristiques moléculaires des voies de migration qu'elles empruntent d'une manière exclusive ? Pourquoi s'arrêtent-elles dans des sites déterminés de l'embryon ? Ces questions relatives au comportement cellulaire, essentielles pour la compréhension du développement embryonnaire, en dépassent cependant le cadre, car elles

concernent aussi le problème général des mécanismes de la motilité cellulaire et celui de la stabilité de l'état tissulaire qui caractérise les constituants des différents organes du corps adulte. On sait qu'enfin, dans les tumeurs, cet ordre tissulaire est aboli. Lorsqu'elles deviennent métastatiques, les cellules cancéreuses ne restent plus groupées, mais elles acquièrent la capacité de migrer et d'essaimer dans divers sites.

La connaissance des règles qui contrôlent la motilité des cellules est essentielle aussi bien dans le domaine de la biologie que de la pathologie cellulaire.

Marquage et suivi des cellules

Depuis longtemps, les embryologistes cherchent à marquer les cellules dans l'embryon pour suivre leurs migrations. Pour être efficace, un marquage ne doit

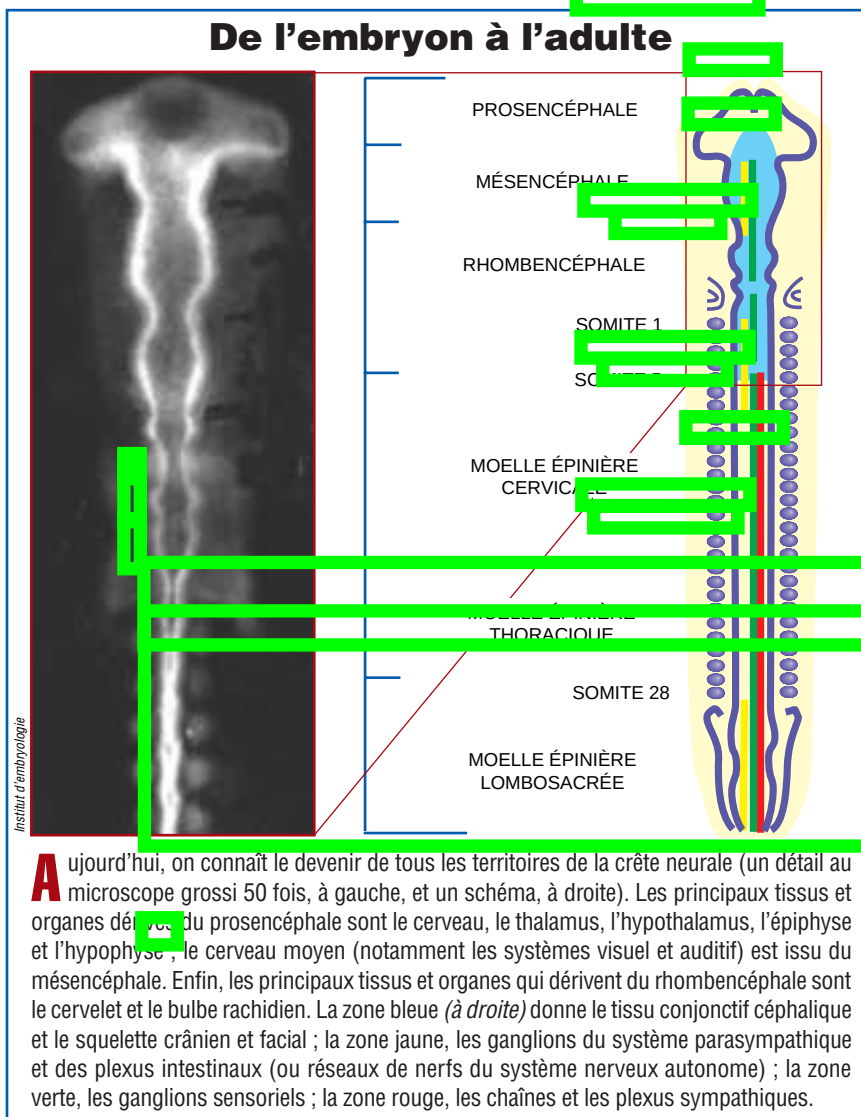
pas être toxique ; il doit rester strictement localisé dans les cellules initialement marquées et être stable, afin que le destin des cellules puisse être connu jusqu'à ce qu'elles aient atteint un stade complètement différencié.

Les premières tentatives de marquage ont consisté à appliquer aux cellules embryonnaires des colorants dits vitaux, tel le rouge neutre. Cela est faisable sur des embryons qui se développent hors de l'organisme maternel, comme celui des amphibiens ou des oiseaux. L'embryon de poulet est accessible à l'expérimentation dans l'œuf pendant toute la durée de l'embryogenèse. Il est proche, dans son organisation et son développement, de celui des mammifères et constitue donc un matériel expérimental précieux, car la majorité des résultats obtenus chez l'oiseau peuvent être étendus aux mammifères.

Toutefois, le rouge neutre, bien que qualifié de vital, n'est pas dépourvu de toxicité. De plus, il diffuse aisément vers les cellules voisines de celles sur lesquelles il a été appliqué et, par conséquent, ne fournit pas un marquage précis. Enfin, il ne permet qu'un marquage très transitoire. Dans les années 1960, deux chercheurs, Pierre Chibon, en France, et James Weston, aux États-Unis, ont respectivement marqué les cellules d'embryons d'amphibien et de poulet en leur faisant incorporer un précurseur de l'ADN (la thymidine), où un atome d'hydrogène est remplacé par son isotope radioactif, le tritium. Ainsi, lorsque les cellules en division, qui dupliquent leur ADN, incorporent ce précurseur, leur noyau devient radioactif. Les cellules marquées sont repérées sur les coupes histologiques. Comme dans le cas des colorants vitaux, l'inconvénient majeur est le caractère instable du marquage. En effet, le marquage par la thymidine radioactive est dilué de moitié à chaque duplication de l'ADN et, compte tenu de la vitesse élevée de la prolifération des cellules embryonnaires, il n'est plus visible au-delà de deux à trois jours.

Il existe actuellement des colorants vitaux qui sont beaucoup plus performants. Il en est ainsi des carbocyanides qui, étant lipophiles, ont une affinité pour les membranes cellulaires où ils s'incorporent, conférant aux cellules une fluorescence rouge. Ce marquage, cependant, n'est aussi que temporaire.

D'autres méthodes consistent à tirer parti de différences génétiques stables



Aujourd'hui, on connaît le devenir de tous les territoires de la crête neurale (un détail au microscope grossi 50 fois, à gauche, et un schéma, à droite). Les principaux tissus et organes dérivés du prosencéphale sont le cerveau, le thalamus, l'hypothalamus, l'épiphyse et l'hypophyse ; le cerveau moyen (notamment les systèmes visuel et auditif) est issu du mésencéphale. Enfin, les principaux tissus et organes qui dérivent du rhombencéphale sont le cervelet et le bulbe rachidien. La zone bleue (à droite) donne le tissu conjonctif céphalique et le squelette crânien et facial ; la zone jaune, les ganglions du système parasymphatique et des plexus intestinaux (ou réseaux de nerfs du système nerveux autonome) ; la zone verte, les ganglions sensoriels ; la zone rouge, les chaînes et les plexus sympathiques.

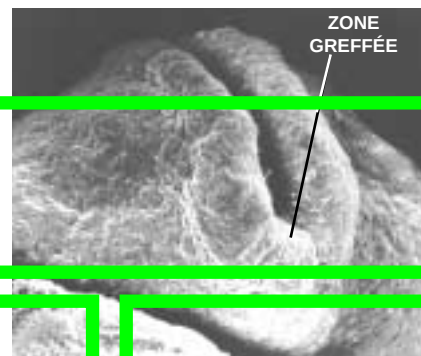
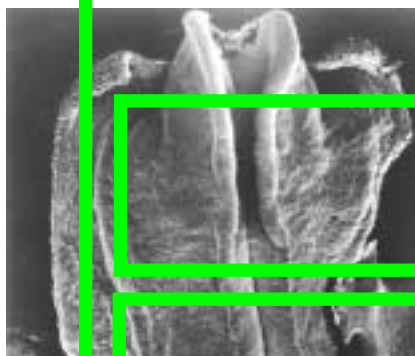
entre deux souches différentes appartenant à la même espèce ou à deux espèces différentes. La combinaison entre cellules d'individus porteurs d'un marqueur aisément identifiable peut, si le marqueur est permanent, permettre de suivre les cellules pendant toute la durée du développement embryonnaire. L'association des cellules provenant de deux individus différents au sein d'un seul embryon consiste à construire une chimère. Pour qu'une chimère se développe normalement, les processus morphogénétiques et les interactions entre cellules, si importants pour le développement harmonieux de l'embryon, doivent être fondamentalement identiques dans les espèces dont sont issues les cellules recombinées. Cela est possible lorsque les espèces sont proches sur le plan taxonomique.

Chimère et exploration de l'embryon

L'association dans un même organisme de cellules provenant de deux individus distincts – en d'autres termes, la juxtaposition de cellules de deux génotypes différents –, loin de produire des monstres permet non seulement de suivre les déplacements de cellules greffées reconnaissables de celles de l'hôte, mais aussi de mettre en évidence les interactions entre ces cellules.

Vers la fin des années 1960, le généticien Ernst Bösiger utilisait, comme matériel expérimental, la caille japonaise (*Coturnix coturnix japonica*), une espèce particulièrement féconde, puisque la femelle pond un œuf par jour. Ayant plus d'œufs qu'il ne pouvait en utiliser pour son élevage, il en distribua à divers laboratoires d'embryologie. J'en bénéficiai moi-même et, par curiosité, fis quelques expériences pour éprouver l'intérêt potentiel de l'embryon de caille comme matériel expérimental. J'ai alors fait une observation qui a été décisive pour la suite de mes travaux, puisqu'elle m'a amenée à mettre au point la méthode de marquage cellulaire fondée sur la construction de chimères entre la caille et le poulet.

J'ai remarqué la présence, dans le noyau des cellules de caille, d'une volumineuse condensation d'ADN associée au nucléole (une structure présente dans tous les types cellulaires). L'ADN condensé dans les noyaux constitue l'hétérochromatine. Il s'agit d'une par-

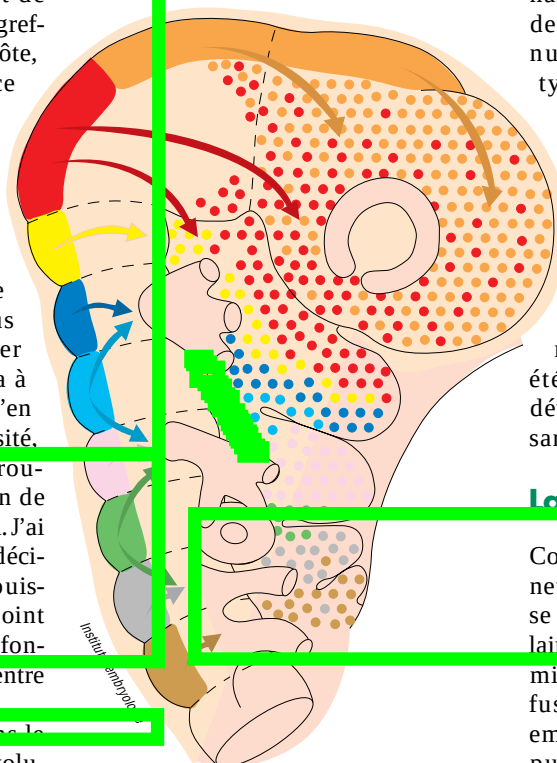


2. LA PLAQUE NEURALE (une couche de cellules indifférenciées) se replie au début de l'embryogenèse et les plis neuraux se rapprochent, jusqu'à se coller, formant le tube neural d'où émergera la quasi-totalité du système nerveux (*embryon de poulet, à gauche*). L'étude des chimères caille-poulet a permis d'établir une carte du devenir des cellules de cette région : en remplaçant des cellules de poulet par des cellules de caille (*à droite, la zone greffée apparaît plus claire*), on suit le mouvement des cellules de caille, reconnaissables par leur volumineux noyau (le grossissement est égal à 300).

tie du génome qui, à un moment déterminé et dans une cellule donnée, est non transcrit, par opposition à l'euchromatine, qui est constituée d'ADN non condensé et accessible à la transcription. Hétérochromatine et euchromatine sont des états dynamiques du génome et sont, dans une certaine mesure au moins, interconvertibles. Cette association de l'hétérochromatine (ADN condensé) et du nucléole n'existe généralement pas dans les

cellules animales... sauf chez la caille et quelques autres espèces d'oiseaux. Lorsque les cellules de caille et de poulet sont colorées de façon à mettre l'ADN en évidence, la différence de structure de leur noyau est manifeste (*voir la figure 1*).

Quand on construit des embryons chimériques en greffant, comme nous allons l'expliquer, des territoires embryonnaires de caille sur un embryon de poulet (ou *vice versa*), on reconnaît aisément les cellules de chacune des deux espèces. La même structure nucléaire se rencontre dans tous les types cellulaires embryonnaires et adulte de caille et constitue un marqueur génétique d'une stabilité jamais égalée dans les marquages expérimentaux utilisés auparavant. Ainsi, les chimères offrent la possibilité de suivre, jusqu'au stade adulte, le devenir de cellules choisies dans un embryon. Dans mon laboratoire, cette méthode a été utilisée surtout pour l'étude du développement des systèmes nerveux, sanguin, vasculaire et immunitaire.



3. LES CHEMINS MIGRATOIRES des cellules de la crête neurale (ici dans la tête) ont été identifiés par l'auteur et ses collègues : on a indiqué par la même couleur les cellules de la crête neurale avant et après leur migration.

La crête neurale

Comme nous l'avons indiqué, la crête neurale se forme lorsque le tube neural se ferme et que les bourrelets médullaires qui bordent l'ébauche neurale primitive (aussi appelée plaque neurale) fusionnent. Le rôle de cette structure embryonnaire transitoire, très discrète puisqu'elle n'est constituée à l'origine que de quelques milliers de cellules chez l'embryon d'oiseau ou de souris, est resté longtemps mal connu. La construction de chimères entre caille et poulet permet d'étudier l'ontogenèse de la crête

neurale chez l'embryon des vertébrés supérieurs. La méthode utilisée consiste à remplacer, chez un embryon de poulet, des fragments bien définis du territoire neural par leurs équivalents provenant d'un embryon de caille au même stade de développement.

Cette substitution, dite isotopique et isochronique, reconstitue un embryon complet, mais où une partie du «soi» est remplacé par l'équivalent provenant d'une espèce différente et qualifié de «non-soi». On construit ainsi des chimères hétérospécifiques, où les tissus de deux espèces différentes sont associés. L'état indifférencié du système immunitaire de l'embryon a pour résultat que les tissus appartenant au greffon sont acceptés, car non identifiés comme «non-soi». De plus, les interactions cellulaires, si importantes dans l'organogenèse, se déroulent normalement chez les chimères. Ceci tient certainement au fait que les deux espèces d'oiseaux mises en présence appartiennent à la famille des Gallinacés et sont proches sur le plan taxonomique.

La crête neurale est une structure particulièrement intéressante, car son développement soulève la plupart des questions posées par l'embryogenèse. Non seulement les cellules qui en sont issues sont douées de propriétés migratoires, mais elles donnent naissance à des dérivés très diversifiés. Par conséquent, comme l'œuf lui-même, à l'origine de toutes les cellules de l'organisme, la crête neurale est une structure pluripotente.

Quand j'ai commencé à m'intéresser au développement de la crête neurale, au début des années 1970, il convenait d'établir tout d'abord quels sont les différents types cellulaires qui en dérivent chez les vertébrés supérieurs et comment s'effectue la diversification des types cellulaires qu'elle produit. Il est fréquent en effet que le «choix de différenciation» de cellules pluripotentes précède l'expression morphologique ou biochimique du phénotype différencié.

Ainsi, quand une cellule est déterminée à se différencier en un type cellulaire donné, elle se différencie selon son destin normal, même si elle est expérimentalement transposée dans un environnement différent, par exemple au cours d'une greffe hétérotopique (dans un territoire de l'embryon autre que le sien).

Au contraire, lorsque la cellule n'a pas un devenir déterminé, son choix de différenciation est influencé par l'environnement dans lequel elle se trouve. Donc, en situation de greffe hétérotopique, elle se différencie en accord avec le nouveau milieu où elle se trouve plutôt qu'avec son destin normal.

L'identification des voies de migration

L'exploration systématique du devenir des cellules de la crête neurale par la méthode décrite précédemment nous a permis de découvrir des dérivés de cette structure jusque-là insoupçonnés, de montrer le rôle essentiel qu'elle joue

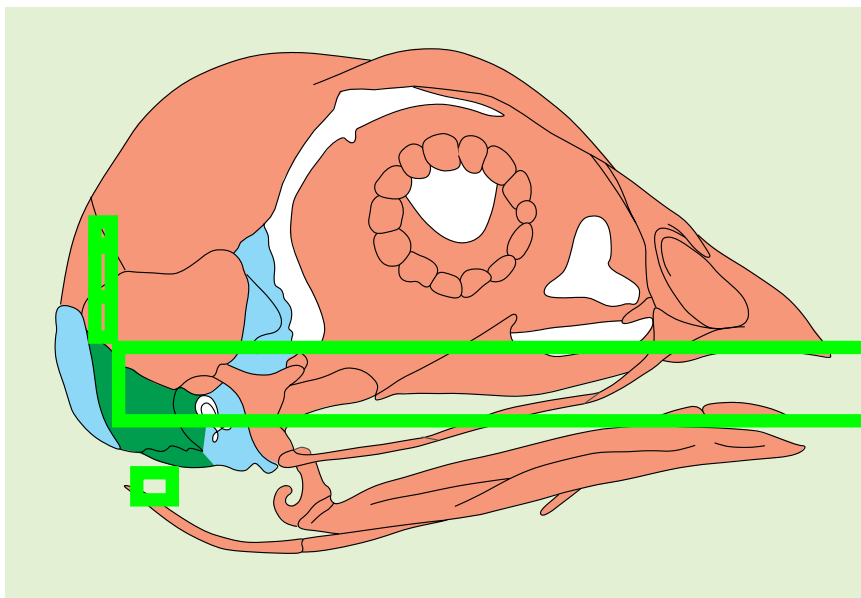
dans la formation de la tête chez les vertébrés et de connaître les niveaux précis de l'axe neural, dont chacun des dérivés de la crête neurale est issu. Les voies de migration de ces cellules à travers les tissus de l'embryon ont aussi été identifiées dans ces expériences. Enfin, les transplantations hétérotopiques de tube neural, où l'on modifie la position d'un territoire donné le long de l'axe antéro-postérieur de l'embryon, ont permis de mettre en évidence le rôle décisif joué par l'environnement dans la différenciation de la plupart des dérivés de la crête neurale.

Ces expériences ont révélé qu'après transposition hétérotopique les cellules de crête atteignent les tissus cibles correspondant à leur position sur l'axe neural (et non pas ceux qu'elles colonisent en l'absence de transposition). Ensuite, elles se différencient en fonction de leur nouvel environnement plutôt qu'en fonction de leur destinée normale, régie par leur emplacement d'origine.

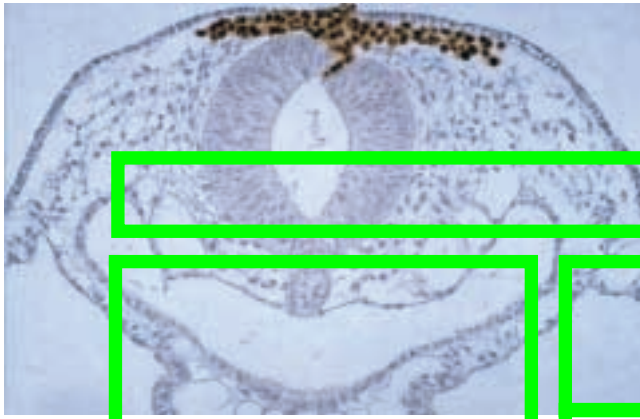
Une autre façon d'évaluer la pluripotence des cellules de crête est de les transplanter *in vitro* dans un milieu qui permet l'expression de la totalité des phénotypes auxquels elles donnent naissance chez l'embryon. Si les cellules sont transplantées isolément, elles donnent naissance, par divisions cellulaires successives, à une colonie, ou clone. Dans le cas où la cellule initiale est pluripotente, plusieurs phénotypes cellulaires sont représentés dans le clone. Au contraire, quand la cellule est monopotentielle ou bipotentielle, respectivement un ou deux types cellulaires sont présents dans le clone.

Quand elles commencent à migrer, les cellules de la crête neurale sont pour la plupart pluripotentes, c'est-à-dire que leur descendance se compose par exemple de neurones, de cellules gliales, ou de mélanocytes. *In vivo*, le «choix» de différenciation est dicté par des facteurs spécifiques des différentes régions de l'embryon : les mélanocytes se développent dans la peau, ou les neurones dans les ganglions du système nerveux périphérique. Ainsi, la différenciation des dérivés de la crête neurale dépend des interactions qui ont lieu entre les cellules de la crête et celles des tissus embryonnaires environnants.

Nous avons également étudié le rôle de la crête neurale dans l'embryogenèse de la tête chez les vertébrés supérieurs. Mes premières recherches sur ce sujet ont été effectuées en collabo-



4. LE CRÂNE DES VERTÉBRÉS dérive, pour l'essentiel, de la crête neurale (en rouge). Les quelques zones qui ne dérivent pas de la crête neurale proviennent d'autres régions de l'embryon nommées mésenchyme céphalique (en bleu) ou mésoderme somitique (en vert).



Institut d'embryologie

5. DES ANTICORPS spécifiques des cellules de caille (*en rouge*) servent aujourd'hui à visualiser la migration des cellules de caille greffées sur les embryons de poulet. Le suivi des cellules de caille est ainsi rapide

et aisé. On visualise généralement les cellules de caille sur des coupes (*à gauche*), mais parfois sur l'embryon entier qui, lorsqu'il est tout jeune (quelques heures), est transparent (*à droite*).

ration avec Christiane Le Lievre, au début des années 1970. Elles ont été reprises et développées, à partir de 1987, avec Gérard Couly. Il est apparu que la contribution de la crête neurale aux structures céphaliques est plus importante que l'on avait laissé supposer les travaux réalisés sur les œufs de grenouille et de triton.

En fait, il est maintenant établi que tous les os de la face, ainsi que la majeure partie de la boîte crânienne, dérivent de la crête neurale. Au cours de l'évolution, le développement de la tête des vertébrés s'est effectué essentiellement à partir de l'ectoderme dont sont issus le cerveau, les os de la face, la voûte crânienne, qui recouvre le cerveau et le protège. Il en est de même de la plupart des capsules osseuses qui abritent les organes sensoriels céphaliques, par exemple le squelette des fosses nasales, les orbites et certains des os du canal auditif.

La transition entre l'ébauche neurale primitive, ou plaque neurale, et le cerveau qui en dérive fait intervenir des mécanismes morphogénétiques complexes et met en œuvre de nombreux gènes. Les centres nerveux et les faisceaux de fibres qui assurent les connexions neuronales sont engendrés par les cellules les plus internes de l'épithélium neural qui, pendant le processus de neurogenèse, fonctionne comme une assise génératrice. Elle est constituée de cellules «souches», qui produisent par division asymétrique une autre cellule souche et une cellule différente qui donnera des neurones ou des cellules gliales.

L'activité prolifératrice des différentes régions du tube neural est variable et responsable de la croissance particulièrement active de certaines

zones, comme celles qui donnent naissance aux hémisphères cérébraux, très développés chez l'homme, ou aux lobes optiques volumineux chez les oiseaux, dont la vision est perfectionnée.

Les neurones ainsi produits effectuent, au sein même de l'épithélium neural, des migrations qui les conduisent à former les centres nerveux. Ils émettent des axones (ou fibres nerveuses) qui établissent un réseau de connexions interneuronales d'une extrême complexité. La possibilité de marquer sélectivement des zones définies de l'épithélium neural à un stade précoce du développement embryonnaire permet d'en suivre l'évolution au cours de la morphogenèse du cerveau. Ainsi le trajet des cellules marquées peut être observé lorsqu'elles migrent hors du greffon de caille dans l'épithélium de l'hôte pour venir se positionner dans les centres nerveux où elles achèvent leur différenciation. Les chimères ont permis d'une part d'identifier, sur la plaque neurale, les territoires destinés à fournir les divers constituants du cerveau antérieur et, d'autre part, de localiser dans le cerveau les centres responsables de certains comportements innés.

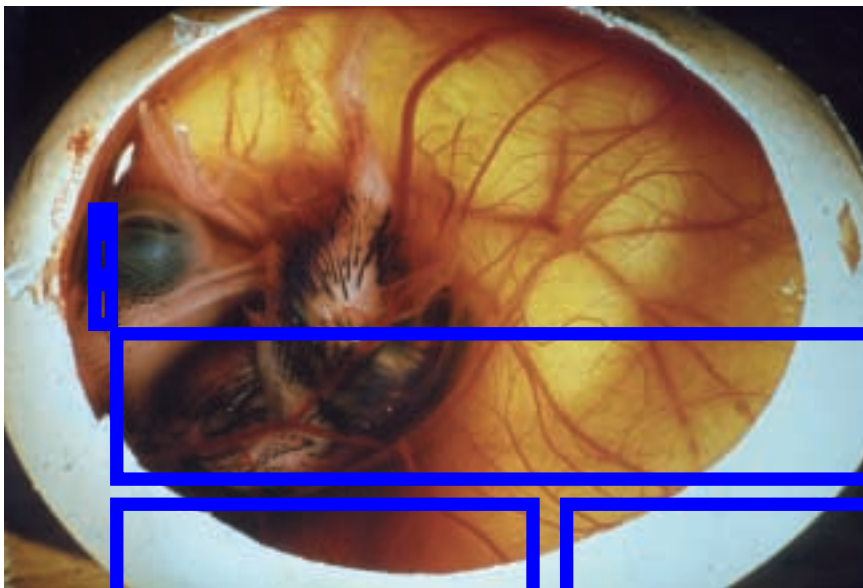
L'intégration des tissus nerveux d'embryon de caille dans le poulet étant suivie du développement normal des structures nerveuses, nous nous sommes demandé si les chimères neurales ainsi construites sont capables d'éclore. Les premières expériences ont montré que des greffes dans le territoire de la moelle épinière permettent le développement normal des chimères jusqu'à l'éclosion et au-delà. Environ dix pour cent des embryons opérés éclosent et produisent des poussins normaux. Le seul signe de leur statut

de chimère est la présence d'une bande transversale de plumes pigmentées particulièrement visible lorsque le poulet hôte appartient à une race blanche. Cette pigmentation provient de la migration des précurseurs des mélanocytes. C'est-à-dire des cellules productrices de pigment, ou mélanine, contenus dans la crête neurale de caille greffée. Ceux-ci migrent dans les bourgeons plumaires du poulet hôte comme ils l'auraient fait dans ceux de l'embryon de caille dont ils proviennent.

Le chant des chimères

Le fait que ces animaux composites présentent un comportement moteur normal indiquait que des synapses fonctionnelles pouvaient s'établir entre les neurones de caille et les neurones ou les cellules musculaires de poulet, et validait le modèle expérimental des chimères, tant du point de vue morphogénétique que fonctionnel. Avec Marie-Cécile Teillet et Evan Balaban (ce dernier est aujourd'hui à l'Institut des neurosciences de San Diego), nous avons tenté de construire des chimères selon le principe de remplacement isotopique et isochronique des territoires de l'encéphale. Les greffes sont en général réalisées en prenant le poulet comme receveur et la caille comme donneur, et le territoire greffé s'intègre parfaitement dans le cerveau de l'hôte. Les connexions nerveuses s'établissent d'une façon apparemment normale, et les chimères peuvent éclore.

Nous avons recherché si certains comportements innés sont transférables d'une espèce à l'autre par la transplantation de régions définies de l'ébauche de cerveau. E. Balaban a choisi d'étudier le chant. Étant donné les phé-



6. UN EMBRYON DE CAILLE a été substitué à un embryon de poulet, dans l'œuf : il se développe dans un œuf de poule, en association avec le sac vitellin de poulet. Grâce à cette expérience, réalisée dans le laboratoire de l'auteur, on a montré que tous les organes hématopoïétiques de l'embryon sont entièrement colonisés par des cellules sanguines de caille : ces dernières proviennent de l'embryon lui-même et non du sac vitellin, qui est pourtant le site de production des toutes premières cellules souches sanguines.

nomènes de rejet immunitaire observés chez les chimères, nous ne pouvions attendre qu'elles atteignent l'âge adulte pour comparer leur chant avec celui des individus normaux de chaque espèce.

Or, le traitement précoce du jeune poussin par la testostérone déclenche un chant de type «juvénile» qui est différent d'une espèce à l'autre et ne dépend d'aucun apprentissage. Celui qu'émet le poussin de caille est saccadé, comprenant en général deux cris brefs séparés par un silence, lequel est suivi par une vocalisation plus prolongée ; celui du poussin de poulet est unique et modulé. Les embryons de poulet dont le mésencéphale est remplacé par celui de la caille donnent naissance à des poussins chimères, chez qui le cri juvénile est celui de la caille. Le mésencéphale est la seule région du futur encéphale qui permet d'obtenir ce résultat.

Dans notre laboratoire, E. Balaban avait remarqué que l'émission vocale de la caille s'accompagne de mouvements caractéristiques de la tête, inexistant chez le poulet. La transplantation du mésencéphale de caille chez le poulet transmet le chant saccadé de la caille à la chimère. Mais pour autant transférer les mouvements de la tête. Récemment, E. Balaban a montré que ces mouvements sont transférables indépendamment des vocalisations typiques de la caille, par la greffe de la partie cervicale de la moelle épinière de caille

chez le poulet. Ainsi, bien que ces deux comportements d'un même comportement soient activés simultanément lors du chant, elles sont commandées par des régions distinctes et relativement éloignées de l'axe neural. Ces contrôles neuronaux sont génétiquement programmés et peuvent être déclenchés indépendamment l'un de l'autre.

Chez les chimères construites par E. Balaban le chant typique de la caille et les mouvements de la tête qui l'accompagnent normalement sont transférables chez le poulet par la greffe d'ensembles neuronaux distincts. Ainsi, les comportements spécifiques (ici le chant) que ces neurones déterminent chez la caille peuvent s'exprimer dans une espèce différente ; ils dépendent d'une information codée, dès le stade de l'ébauche neurale primitive dans un territoire restreint du neuroépithélium.

Chimères et immunologie

Nous avons vu que les poulets qui éclosent après que l'embryon a subi la greffe d'un fragment de tube neural de caille ne présentent pas d'anomalies neurologiques à la naissance. Cela reste vrai pendant plusieurs semaines, mais, ensuite, le système immunitaire du poulet réagit contre le greffon. Dans le cas où le greffon neural de caille a été placé au niveau des membres antérieurs, l'attaque du système immunitaire se mani-

feste par une paralysie des ailes. La région de la moelle épinière greffée, les ganglions périphériques et les nerfs issus de la queue sont le siège d'une réaction inflammatoire due à une invasion massive par des lymphocytes et par des macrophages du poulet hôte. On n'observe quasiment aucune réaction de rejet quand les chimères sont construites entre deux embryons de poulet, même s'ils sont issus de lignées ayant des antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité (les molécules spécifiques du soi) différents ; les chimères poulet-poulet portant des régions de la moelle épinière ou du cerveau provenant d'une autre lignée de poulet restent bien portantes toute leur vie durant.

La notion de distinguer le soi du non-soi revient aux cellules effectrices de la réponse immunitaire, les lymphocytes. Ceux-ci se classent en deux catégories : les lymphocytes *T*, qui se différencient dans le thymus, et les lymphocytes *B*, qui prennent naissance dans la moelle osseuse, chez les mammifères, et dans un organe spécialisé, associé au cloaque, la bourse de Fabricius, chez les oiseaux. Les lymphocytes *T* sont notamment responsables de l'immunité à médiation cellulaire et du rejet des greffes. Les lymphocytes *B* sont à l'origine de l'immunité humorale et de la production d'anticorps.

Le thymus et la bourse de Fabricius sont des organes lymphoïdes primaires ou centraux, tandis que la rate et les ganglions lymphatiques qui reçoivent les lymphocytes *T* et *B* issus du thymus et de la bourse de Fabricius sont des organes lymphoïdes secondaires ou périphériques.

La source cellulaire des lymphocytes qui apparaissent dans ces deux organes lymphoïdes primaires a été longtemps l'objet de débats. Selon une des hypothèses, les lymphocytes dériveraient de l'endoderme des ébauches du thymus et de la bourse de Fabricius (contrairement aux autres cellules sanguines, qui dérivent du mésoderme). Une autre hypothèse proposait que les lymphocytes dérivent de cellules extrinsèques aux organes lymphopoïétiques primaires. Grâce aux chimères caille-poulet, nous avons montré que tous les lymphocytes dérivent de cellules souches hématopoïétiques qui envahissent les ébauches du thymus et de la bourse de Fabricius à une (ou à des) période(s) bien déterminée(s) du développement embryonnaire. Il en est

de même des cellules sanguines qui se différencient dans la rate et dans la moelle osseuse.

Ainsi, les organes qui donnent les cellules du sang ne les produisent-ils que s'ils ont été préalablement colonisés par des cellules fondatrices d'origine extrinsèque ; celles-ci trouvent dans chacun des organes colonisés un environnement favorable à leur différenciation vers l'une ou l'autre des lignées de cellules du sang. Chez l'adulte, la moelle osseuse est le site de production des globules rouges et de divers types de globules blancs (y compris les lymphocytes B chez les mammifères). Ainsi, les lymphocytes qui se différencient dans le thymus (chez tous les vertébrés) et dans la bourse de Fabricius (chez les oiseaux) dérivent de cellules qui ne sont pas produites par ces organes eux-mêmes, mais de précurseurs dont l'origine embryologique restait à identifier.

Françoise Dieterlen et Claude Martin, dans leur laboratoire, ont réalisé une expérience ingénieuse destinée à explorer la capacité des cellules produites par le sac vitellin – site de production des premières cellules sanguines – à coloniser la moelle osseuse, la rate, le thymus et la bourse de Fabricius.

Lorsque la distinction entre l'embryon proprement dit et ses annexes vitellines est établie, F. Dieterlen et C. Martin remplacent le territoire embryonnaire du poulet par l'équivalent provenant de la caille. Un embryon de caille se développe donc dans un œuf de poulet et en association avec un sac vitellin de poulet (voir la figure 6). L'expérience a montré que les organes hématopoïétiques de cet embryon sont entièrement colonisés par des cellules souches de caille qui proviennent de l'embryon lui-même et non de son sac vitellin.

La source des cellules souches sanguines qui assureront le renouvellement du sang pendant toute la vie a été récemment localisée, par l'équipe de F. Dieterlen, dans des îlots mésodermiques dont le

fonctionnement est transitoire et qui sont associés à l'aorte ventrale. Durant cette période, des cellules souches hématopoïétiques totipotentes sont produites par ces îlots et pénètrent dans les organes qui produiront les cellules sanguines. Nous avons montré que le thymus ne reçoit ces précurseurs que pendant de courtes périodes séparées par des intervalles où l'organe n'est plus « réceptif ». Au contraire, dans le cas de la bourse de Fabricius, les précurseurs pénètrent en une seule vague qui dure de cinq à six jours, au cours de l'embryogenèse.

Des vagues de lymphocytes

Pourquoi les cellules hématopoïétiques pénètrent-elles dans le thymus par vagues successives ? Selon l'hypothèse la plus plausible, l'épithélium du thymus produit une substance chimiotactique à laquelle les cellules souches du sang circulant sont sensibles. En effet, quand l'épithélium du thymus est réceptif aux cellules hématopoïétiques, on voit ces cellules adhérer aux parois des vaisseaux sanguins qui

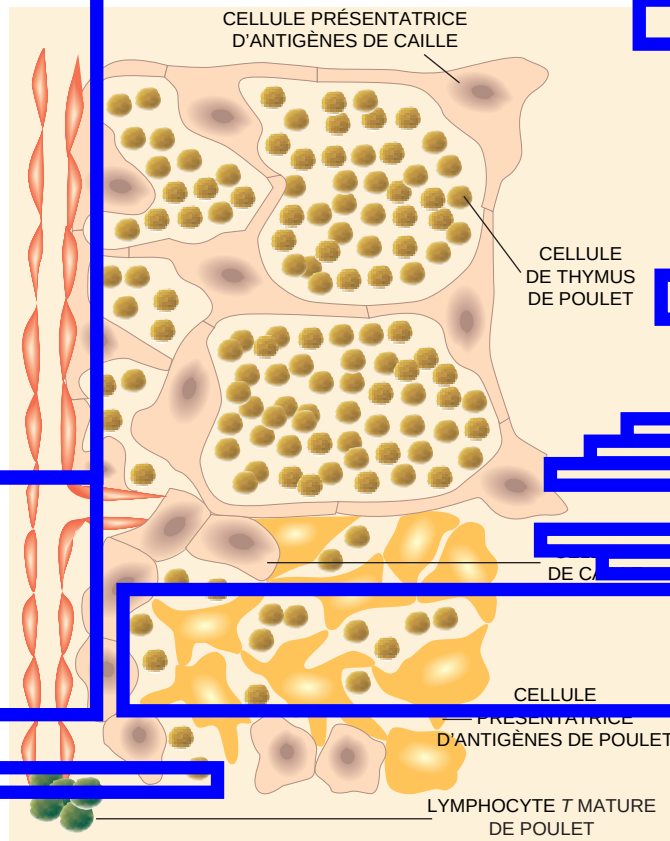
entourent le rudiment thymique, puis migrer vers la source supposée de l'attracteur chimique. Ce phénomène d'adhérence des cellules circulantes aux parois vasculaires a été retrouvé chez l'adulte dans les sites d'inflammation. Les cellules de défense de l'organisme adhèrent aux cellules de l'endothélium vasculaire avant de pénétrer dans les tissus.

Des expériences réalisées *in vitro* par Jean-Paul Thiery et son équipe (maintenant à l'Institut Curie) ont confirmé que l'ébauche thymique embryonnaire exerce un effet chimiotactique vis-à-vis de ces cellules, aux stades où elle est normalement colonisée par les précurseurs hématopoïétiques.

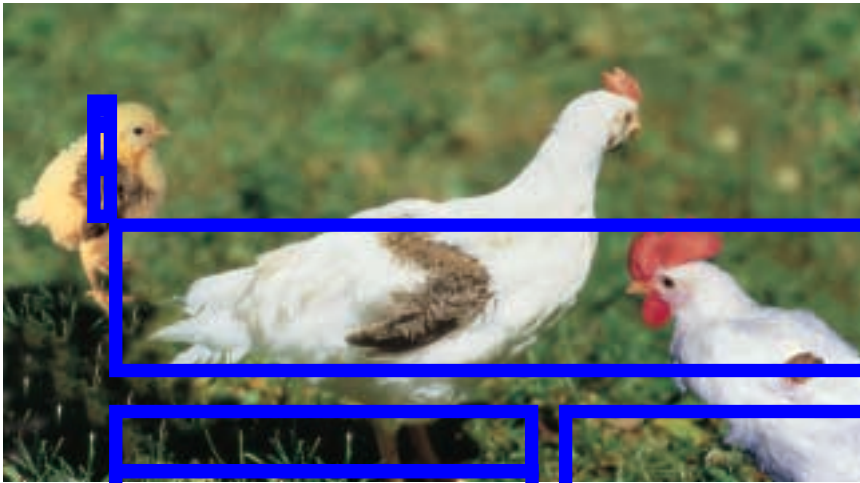
La périodicité de la colonisation du thymus n'est pas spécifique des embryons d'oiseaux. Francine Jotereau, à l'Université de Nantes, a montré qu'elle existe aussi chez l'embryon de souris. Enfin, le caractère cyclique de l'activité du thymus a été démontré chez certains reptiles hibernants par Rachika El Ridi, à l'Université du Caire. Chez ces reptiles, le thymus se vide totalement de ses lymphocytes pendant l'hiver.

Il y a une période au cours de laquelle les animaux sont immunodéficients. Au printemps, ils deviennent à nouveau capables de produire des anticorps et de rejeter les greffes : leur thymus a été recolonisé par des cellules hématopoïétiques qui se différencient en lymphocytes et en cellules dendritiques médullaires. Chaque année, la même alternance de phase d'immunodéficience et d'immunocompétence se reproduit.

Les expériences de chimères caille-poulet ont permis d'analyser la destinée des lymphocytes engendrés par chaque vague de cellules hématopoïétiques arrivant dans le thymus. Les cellules de la première vague colonisent l'ébauche épithéliale thymique. Les interactions entre cellules hématopoïétiques et épithélium thymique modèlent l'architecture de la glande adulte, qui est pourvue d'un « cortex » riche en lymphocytes, lesquels se multiplient activement et acquièrent les caractéris-



7. DANS UN THYMUS CHIMÉRIQUE, des cellules épithéliales de caille cohabitent avec des cellules hématopoïétiques de poulet. Des cellules sanguines de poulet pénètrent par vagues dans le thymus, où elles se différencient en thymocytes (en orange). Les lymphocytes T matures (en vert) quittent le thymus. Ils sont tolérants aux antigènes de caille.



**8. L'AILE GREFFÉE de caille (en marron) est tolérée chez le pous-
sin. Chez le poulet, elle est
généralement rejetée au bout de quelques semaines (en bas à droite). Elle est tolérée chez le
poulet adulte (au centre) à condition que l'ébauche embryonnaire du thymus de caille ait été
greffée sur l'embryon de poulet en même temps que les cellules qui donneront l'aile. Dans ces
conditions, les lymphocytes de poulet qui pourraient réagir contre les antigènes de caille sont
soit éliminés au cours de l'embryogenèse, soit muselés par des lymphocytes T régulateurs.**

tiques moléculaires et cellulaires des lymphocytes T.

Au centre de la glande, la « médulla » contient des lymphocytes T matures prêts à être exportés dans le sang et vers les organes lymphoïdes périphériques. Chaque lymphocyte T mature est pourvu d'un récepteur capable de distinguer les déterminants du soi, c'est-à-dire les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité. Ces molécules, associées à des peptides produits par les cellules, présentent à la surface cellulaire des complexes moléculaires spécifiques de chaque individu.

Normalement, les lymphocytes T qui quittent le thymus ne réagissent pas contre le soi, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas activés en cellules tueuses ou en lymphocytes T auxiliaires par les antigènes du soi. En fait, les lymphocytes T qui portent des récepteurs susceptibles de reconnaître des antigènes du soi avec une haute affinité sont éliminés au cours de leur maturation dans le thymus. Les cellules dendritiques de la médulla thymique jouent ainsi le rôle d'un « filtre » vis-à-vis des lymphocytes T capables de reconnaître le soi.

Les chimères caille-poulet ont fourni un modèle expérimental pour explorer le rôle de l'épithélium thymique dans les mécanismes de tolérance vis-à-vis du soi. Quand on substitue l'épithélium des ébauches thymiques de caille à l'épithélium correspondant de poulet, le thymus obtenu est chimérique : les éléments épithéliaux proviennent d'une espèce (la caille), tandis que les lymphocytes

et les cellules dendritiques proviennent de l'hôte (le poulet). Les lymphocytes de poulet qui se différencient dans ce contexte rejettent-ils une greffe provenant du même embryon de caille que l'épithélium thymique ? Pour le savoir, nous avons transplanté des bourgeons d'ailes d'un embryon de caille de quatre jours sur un embryon de poulet du même âge. La greffe se développe normalement chez l'embryon qui n'a pas encore la capacité de distinguer le soi du non-soi, mais elle est rapidement rejetée dans le mois qui suit la naissance, lorsque le système immunitaire de l'hôte devient fonctionnel. Ainsi, l'exposition du système immunitaire immature d'un embryon précoce à des tissus étrangers ne gâche pas la reconnaissance du tissu étranger comme faisant partie du soi du moins dans les associations entre espèces différentes).

Si le poulet ayant reçu la greffe d'un bourgeon d'aile de caille a reçu en même temps celle des bourgeons thymiques épithéliaux du même donneur, l'aile de caille échappe au rejet et est définitivement tolérée. De plus, nous avons montré que la reconnaissance permanente des tissus de caille comme éléments du soi ne nécessite pas le remplacement complet du thymus du poulet par celui de la caille : il suffit qu'un tiers du thymus contienne des cellules épithéliales de caille pour que l'aile greffée soit tolérée durant toute la vie de la chimère.

Le dogme dominant pour expliquer la tolérance vis-à-vis du soi est

dérivé de l'hypothèse de la sélection clonale proposée dans les années 1950 par les immunologistes McFarlane Burnet et Joshua Lederberg : la spécificité de reconnaissance moléculaire qui caractérise chaque lymphocyte T provient du réarrangement au hasard des gènes codant son récepteur spécifique. Parmi la multitude de molécules produites par ces combinaisons géniques, certaines sont potentiellement cancéreuses, car elles produisent des récepteurs reconnaissant les antigènes du soi. Les lymphocytes portant des récepteurs autoréactifs sont éliminés dans le thymus. On peut donc proposer que les lymphocytes de poulet qui se sont développés au contact de l'épithélium thymique de caille sont rendus tolérants par un mécanisme d'élimination.

Ceci, pourtant, n'explique pas la totalité des résultats obtenus dans nos expériences. L'hypothèse que nous proposons est que les lymphocytes anticaille venant de ces lobes thymiques sont maintenus dans un état de non-réponse vis-à-vis de la caille par des lymphocytes « régulateurs » produits, au contact de l'épithélium thymique de caille, dans les régions chimériques du thymus. Ainsi, la tolérance vis-à-vis du soi serait régie, en partie seulement, par un phénomène passif d'élimination des clones autoreactifs. A cela s'ajouterait un second mécanisme, actif : tous les clones autoréactifs n'étant pas détruits dans le thymus, un mécanisme de sécurité résultant de la sélection de lymphocytes T régulateurs compléterait la sélection clonale.

Nicolas LE DOUARIN, professeur au Collège de France, dirige l'Institut d'embryologie cellulaire et moléculaire du CNRS, à Nogent-sur-Marne.

S. CHAMPION, B. A. IMHOF, P. SAVAGNER et J.-L. THIERY, *The Embryonic Thymus Produces Chemotactic Peptides Involved in the Homing of Hemopoietic Precursors*, in *Cell*, vol. 44, pp. 781-790, 1986.

F. JOUREAU et al., *Cell Kinetics in the Fetal Mouse Thymus: Precursor Cell Input, Proliferation and Emigration*, in *J. Immunol.*, vol. 138, pp. 1026-1030, 1987.

N. M. LE DOUARIN, *Embryonic Neural Chimeras in the Study of Brain Development*, in *Trends Neurosci.*, vol. 16, pp. 64-72, 1993.

N. M. LE DOUARIN, C. KALCHEIM, *Neural Crest*, Second edition, Cambridge University Press, à paraître.

Calculer avec l'ADN

LEONARD ADLEMAN

L'utilisation d'ADN pour résoudre des problèmes mathématiques conduit à repenser la notion de «calcul».

Quand on évoque les ordinateurs, on pense claviers, écrans, souris, mémoire vive, circuits micro-électroniques, gigaoctets et mégahertz. Les succès de l'informatique classique ont fait croire que seules des puces de silicium pouvaient recevoir des circuits capables d'effectuer des calculs, mais est-ce exact? L'ordinateur que vous utilisez inconsciemment pour lire ces mots, votre cerveau, n'a pas grand-chose à voir avec les ordinateurs classiques. Peut-être avons-nous une vision trop étroite de ce qu'est le calcul. Ne gagnerait-on pas à élargir la notion d'ordinateur? Certains peuvent-ils être des liquides, où les calculs résulteraient d'interactions de molécules? De telles machines existent : ce sont les ordinateurs à ADN.

Je m'intéresse à ces systèmes depuis un séjour dans un laboratoire de biologie moléculaire, en 1993. Mathématicien et informaticien, j'ai d'abord fait de la recherche médicale, contribuant notamment à des études du SIDA. Comment montrer aux biologistes l'intérêt des modèles mathématiques ou informatiques sous la houlette de Nicolas Chelyapov, j'ai commencé à apprendre les méthodes de la biologie moderne.

Ce travail est fascinant : on crée de l'ADN qui n'existe pas dans la nature et on l'introduit dans des bactéries où

il déclenche la production de protéines qui peuvent changer la nature même de l'organisme. Pendant cette période d'apprentissage, je lus la *Biologie moléculaire du gène*, un manuel classique de biologie dû à James Watson, l'un des deux découvreurs de la structure en double hélice de l'ADN, et ma conception de la biologie en fut bouleversée. La biologie moléculaire n'était plus la science des produits odorants conservés dans des réfrigérateurs ; elle gagnait en profondeur et en puissance explicative. La biologie est aujourd'hui l'étude de l'information stockée dans l'ADN par des enchaînements de quatre lettres, A, T, G et C, les quatre bases qui sont l'adénine, la thymine, la guanine et la cytosine ; la biologie étudie aussi les modifications de ces informations dans la cellule. Ces modifications se font selon des règles mathématiques.

Un soir, dans mon lit, alors que je lisais le livre de J. Watson, j'en arrivai à la description de l'ADN polymérase, la reine des enzymes, celle qui crée la vie : dans un milieu approprié, cette enzyme fabrique, à partir d'un brin d'ADN, un ADN complémentaire, où chaque C est remplacé par un G, chaque G par un C, chaque A par un T et chaque T par un A. Par exemple, en partant

d'une molécule dont la séquence est CATGT, l'ADN polymérase engendre une nouvelle molécule de séquence GTACAG. L'ADN polymérase assure la reproduction de l'ADN, ce qui permet aux cellules de se reproduire et, indirectement, à l'espèce humaine de se développer : pour un biologiste réductionniste, la réplication de l'ADN par l'ADN polymérase est l'essence même de la vie.

L'ADN polymérase est une machine étonnante : à elle seule, cette molécule s'accroche à un brin d'ADN, se déplace dessus en «lisant» chaque base rencontrée et en «écrivant» son complément, fabriquant ainsi un nouveau brin d'ADN. Alors que je pensais à cette enzyme remarquable, je compris qu'elle fonctionnait comme une machine décrite en 1936 par le mathématicien anglais Alan Turing.

Ce dernier, ainsi que Kurt Gödel, Alonzo Church et Stephen Kleene, avait analysé la notion de «calculabilité». Ces travaux théoriques, qui précédaient de plus d'une décennie les premiers ordinateurs, ont abouti à certains des résultats les plus importants des mathématiques du XX^e siècle (voir, par exemple, *Le hasard en théo-*



1. LES MOLÉCULES D'ADN stockent de l'information. Ce sont des enchaînements d'adénine, de thymine, de guanine et de cytosine, respectivement représentées par les lettres A, T, G et C. La molécule dessinée ici en couleurs, de séquence GCAGTCGGACTGGGC-TATGTCCGA, code la solution du problème du chemin hamiltonien représenté page suivante.

rie des nombres, par Gregory Chaitin, *Pour la Science*, septembre 1988).

Turing avait inventé un ordinateur abstrait que l'on nomme aujourd'hui «machine de Turing». Cette machine est composée de deux bandes, ainsi que d'un système nommé contrôleur à états finis, qui se déplace le long d'une bande pour y lire des données et, simultanément, se déplace le long de la deuxième bande pour y écrire d'autres données. Le contrôleur se programme à l'aide d'instructions simples, de sorte qu'il est aisé d'écrire un programme qui lit sur la bande d'entrée une chaîne composée de A, de T, de C et de G, et qui écrit la chaîne complémentaire sur la bande de sortie. La similitude avec l'ADN polymérase est patente.

La similarité est intéressante, parce que la machine de Turing est universelle, c'est-à-dire qu'elle peut être programmée pour calculer tout ce qui est calculable. Cette idée est la «thèse de Church». Elle me fit penser que l'on pourrait programmer une machine de Turing pour produire une chaîne complémentaire, pour factoriser des nombres ou pour jouer aux échecs. Je me dressai soudain dans mon

lit et fis remarquer à mon épouse : «Bon sang! Ces choses peuvent calculer.» Je ne dormis pas de la nuit, cherchant un moyen d'utiliser l'ADN pour résoudre ces problèmes.

Je vous ai d'abord concevoir un ordinateur à ADN analogue à une machine de Turing, où le contrôleur à états finis serait remplacé par une enzyme. Une idée identique avait déjà été proposée dix ans plus tôt par des chercheurs de la Société IBM (voir *Les limites physiques du calcul*, par Charles Bennett et Rolf Landauer, *Pour la Science*, septembre 1985). Malheureusement, sans une enzyme (l'ADN polymérase) permet de créer des ADN complémentaires, où trouverait-on les molécules qui assureraient d'autres calculs importants, telle la factorisation des nombres?

Les biologistes moléculaires ont la chance inouïe de pouvoir utiliser le contenu des cellules. Nous sommes très loin de savoir créer *ex nihilo* des machines moléculaires aussi perfectionnées que l'ADN polymérase, mais trois ou quatre milliards d'années d'évolution ont engendré des cellules pleines de petites merveilles. La biotechnologie moderne emploie certaines de ces

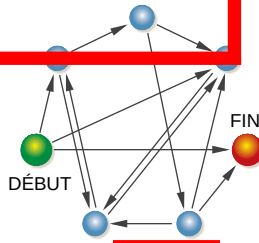
molécules, mais l'évolution n'a jamais produit de cellules qui jouent aux échecs. Aussi, pour construire des machines cellulaires aux capacités de calcul intéressantes, je devais utiliser les outils disponibles. Ces outils sont essentiellement les suivants :

1. L'appariement des bases. À chaque brin d'ADN correspond une molécule complémentaire. Dans une solution, lorsqu'un brin d'ADN rencontre l'ADN complémentaire, les deux brins s'apparient, c'est-à-dire qu'ils s'enroulent l'un autour de l'autre pour former une double hélice. Les brins ne réagissent pas chimiquement, mais se lient parce que des forces faibles, des «liaisons hydrogène» s'établissent entre les bases complémentaires. Quand un brin d'ADN rencontre un autre brin d'ADN qui ne lui est pas complémentaire ou qui ne possède pas de longues parties complémentaires, alors les deux brins ne se lient pas.

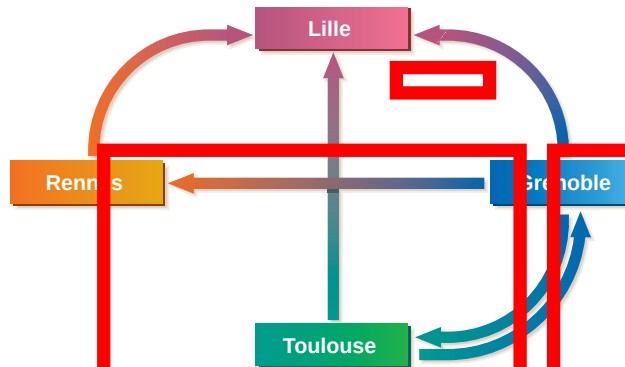
2. Des polymérases dupliquent l'information d'une molécule en créant une molécule complémentaire. Par exemple, l'ADN polymérase fabrique un brin d'ADN complémentaire à partir de n'importe quelle molé-

Le chemin hamiltonien codifié par des bases

Considérons des villes reliées par un certain nombre de vols sans escale (*en bas*). Dans l'exemple représenté, on peut aller de Grenoble à Lille, mais pas l'inverse. On cherche s'il existe un chemin qui part de Toulouse et se termine à Lille, en passant une fois seulement dans les autres villes. On attribue à chaque ville une séquence d'ADN (ACTTGCAG pour Toulouse) qui peut être considérée comme un prénom (ACTT) et d'un nom propre (GCAG). Les codes des vols peuvent alors être définis par la mise bout à bout du nom propre de la ville d'origine et du prénom de la ville de destination (*en bas, à droite*).



Les complémentaires des noms des villes s'obtiennent par le remplacement de C par G, de G par C, de A par T et de T par A. Pour ce problème particulier, un seul chemin hamiltonien relie Toulouse à Lille : il passe successivement par Grenoble et Rennes, dans cet ordre. Dans le calcul de ce chemin est représenté par GCACTCGGAATGGGCATGTCCGA, une séquence d'ADN de 24 bases de longueur. Le problème représenté ci-contre, a été résolu par un ordinateur à ADN : il fait intervenir 7 villes et 14 vols.



VILLE	ADN	COMPLÉMENTAIRE
TOULOUSE	ACTTGCAG	TCAACGTC
GRENOBLE	TCGGACTG	ATCCTGAC
RENNES	GGCTATGT	CCGATACA
LILLE	GGCAGCA	CCCTGCTT

VOL	CODE ADN DU VOL
TOULOUSE - GRENOBLE	GCAGTCGG
TOULOUSE - LILLE	GCAGCA
GRENOBLE - RENNES	ACTGGGCT
GRENOBLE - LILLE	ACTGCCGA
GRENOBLE - TOULOUSE	ACTGACTT
RENNES - LILLE	ATGTCCGA

Slim Films

cule d'ADN. L'ADN polymérase commence cette copie quand elle a rencontré un signal de départ qui lui indique le début de la séquence à copier. Ce signal est fourni par une amorce, une séquence d'ADN particulière et souvent courte. Dès que l'ADN polymérase trouve une amorce appariée au modèle, elle commence à ajouter des bases à l'amorce pour créer une copie complémentaire du modèle.

3. Des enzymes nommées ligases rabouter les molécules d'ADN. Lorsque deux molécules d'ADN sont proches, la ligase fait réagir une extrémité d'une molécule avec une extrémité de l'autre molécule : grâce à la liaison covalente ainsi établie, la ligase lie les deux molécules. Les cellules utilisent les ligases pour réparer les molécules d'ADN coupées par les rayonnements ultraviolets ou par d'autres rayonnements ionisants.

4. Des enzymes nommées nucléases coupent les molécules d'ADN. Par exemple, les enzymes de restriction cherchent une succession spécifique de bases dans un brin d'ADN et, quand elles l'ont trouvée, elles coupent l'ADN en deux parties. L'enzyme EcoRI, par exemple, est une enzyme de restriction qui coupe l'ADN de la bactérie *Escherichia coli* après le G de la séquence GAATTC ; elle ne coupe jamais

à un autre endroit. On a supposé que ces enzymes de restriction défendaient la bactérie contre les virus bactériophages qui injectent leur ADN parasite dans la cellule bactérienne. La bactérie *Escherichia coli* protège son propre ADN de l'action de l'enzyme EcoRI par les méthylations (l'addition de groupes méthyle), lors de la répllication, mais tout virus qui posséderait la séquence GAATTC est inactivé, parce que son ADN est découpé en morceaux. Mon ordinateur à ADN n'utilise pas d'enzymes de restriction, mais celles-ci ont été utilisées, dans de nombreuses expériences, par d'autres équipes de recherche.

5. Les gels pour électrophorèse. Ceux-ci ne sont pas des constituants des cellules. On sépare des molécules d'ADN placées dans une solution en déposant une petite quantité de la solution sur un gel et en appliquant une différence de potentiel entre les deux extrémités du gel. Les molécules d'ADN négativement chargées migrent alors vers l'anode en se frayant un chemin à travers la structure réticulée du gel, à une vitesse qui dépend de leur longueur, les molécules les plus courtes se déplaçant plus vite que les molécules plus longues. Ainsi, les biologistes séparent les brins d'ADN selon leur longueur : l'ajout d'une substance fluorescente qui se

lie à l'ADN révèle la répartition finale des molécules d'ADN en fonction de leur longueur.

6. La synthèse de l'ADN. Aujourd'hui, on peut écrire une séquence d'ADN sur un bout de papier, l'envoyer à un laboratoire de synthèse, et recevoir quelques jours plus tard, un tube à essai qui contient approximativement 10^{18} molécules d'ADN, dont la plupart possèdent exactement la séquence demandée. On atteint facilement des longueurs de 100 bases et, pour des molécules dont la longueur est de 20 bases, le coût n'est que de 150 francs. Les molécules sont fournies deshydratées dans un tube à essai ; elles forment un petit grain, blanc et amorphe.

Comment ces divers ingrédients aident-ils à factoriser les nombres ou à jouer aux échecs ? Dans les années 1930, les mathématiciens ont démontré que deux ingrédients seulement sont indispensables pour construire un ordinateur : un moyen de stocker de l'information et un système pour effectuer quelques opérations simples. La machine de Turing étale l'information au moyen de lettres écrites sur une bande et la manipule grâce aux instructions simples que possède le contrôleur à états finis. Un ordinateur électronique stocke l'information dans sa mémoire sous la forme de sé-

quences de 0 et de 1, et il la manipule grâce à l'unité de calcul. N'importe quelle façon de stocker l'information et n'importe quel jeu d'instruction suffisent.

Suffisant à quoi? À effectuer n'importe quel calcul. Pour synthétiser un ADN complémentaire ou pour déterminer des coups aux échecs, il suffit de stocker la bonne information et d'appliquer la bonne séquence d'opérations, c'est-à-dire d'exécuter un programme. Or, l'ADN est un excellent système de stockage de l'information: les cellules l'utilisent depuis des milliards d'années pour stocker le modèle de la vie. Les enzymes, telles que les polymérases et les ligases, agissent sur cette information. Était-ce suffisant pour construire une machine à calculer universelle? Grâce aux mathématiciens des années 1930, je savais que oui.

Le problème du chemin hamiltonien

Quel problème résoudre? Il ne devait pas être inventé spécialement pour la machine, et il devait démontrer les possibilités de cette nouvelle manière de calculer. J'ai choisi de résoudre le problème du chemin hamiltonien, une variante du problème du voyageur de commerce.

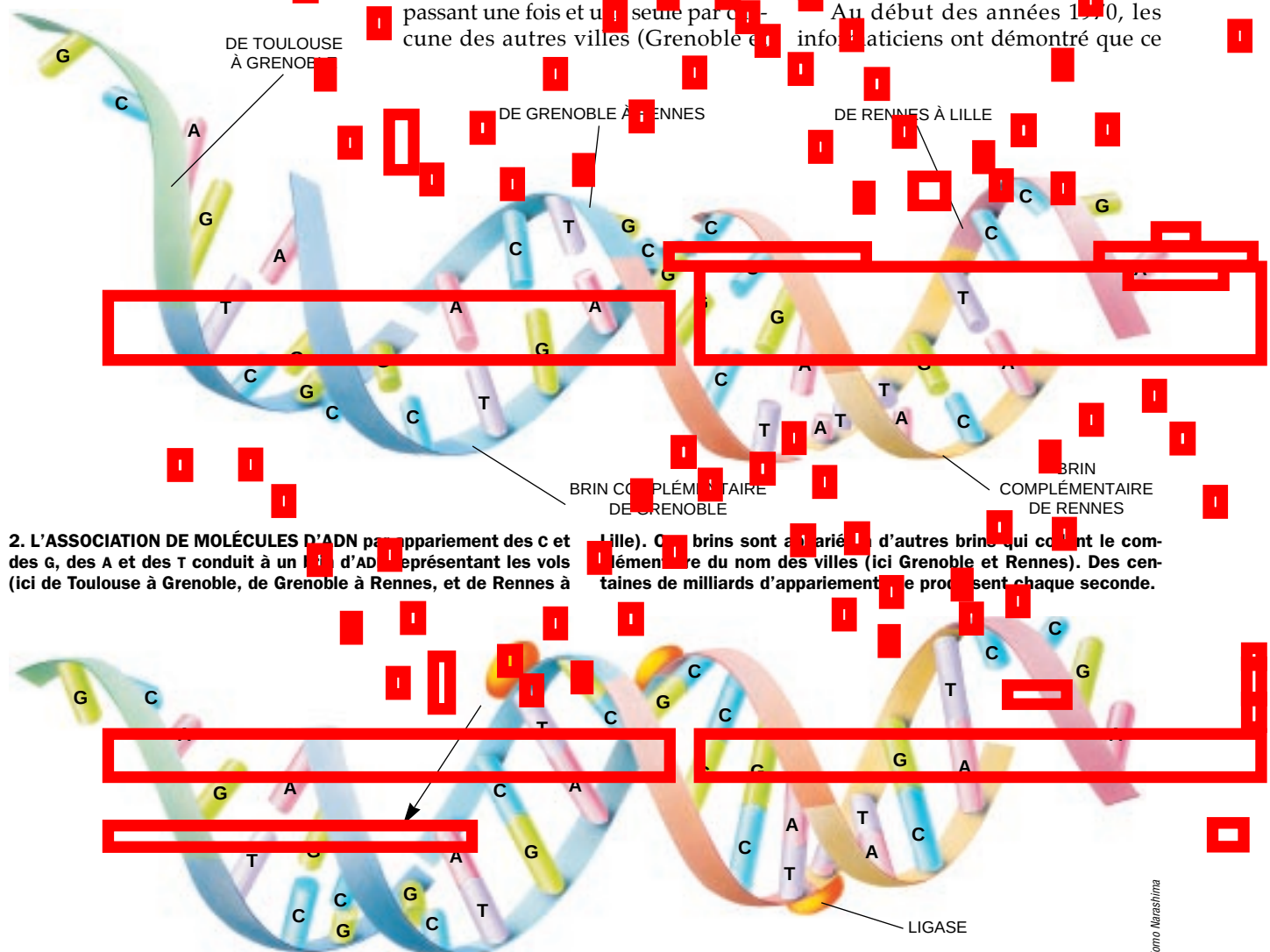
Les chemins hamiltoniens sont dus à William Rowan Hamilton, qui était astronome royal en Irlande, au milieu du XIX^e siècle. Le problème qui porte son nom est décrit dans l'encadré de la page 58: soit une carte (graphe) où figurent des villes reliées par des vols sans escale (chemins orientés). Par exemple, on peut aller de Grenoble à Rennes, mais pas de Rennes à Grenoble. On cherche le chemin qui part de Toulouse (le sommet de départ) et se termine à Lille (le sommet d'arrivée) en passant une fois et une seule par chacune des autres villes (Grenoble et

Rennes). Un tel trajet est un chemin hamiltonien. Dans cet exemple, on voit rapidement qu'un seul chemin hamiltonien relie Toulouse à Lille; c'est: Toulouse, Grenoble, Rennes, puis Lille. Entre Lille et Toulouse, il n'existe pas de chemin hamiltonien.

Plus généralement, étant donné un graphe orienté, un sommet de départ et un sommet d'arrivée, alors il existe un chemin hamiltonien si et seulement s'il existe un chemin qui passe par tous les sommets exactement une fois. Le problème du chemin hamiltonien est la recherche de ce chemin.

Ce problème a été très étudié par les informaticiens, mais aucun algorithme efficace (c'est-à-dire rapide) n'a été trouvé. On connaît des graphes de moins de 100 sommets pour lesquels, même en utilisant le meilleur algorithme et le meilleur ordinateur, la résolution du problème du chemin hamiltonien prendrait des centaines d'années.

Au début des années 1970, les informaticiens ont démontré que ce



2. L'ASSOCIATION DE MOLÉCULES D'ADN par appariement des C et des G, des A et des T conduit à un fil d'ADN représentant les vols (ici de Toulouse à Grenoble, de Grenoble à Rennes, et de Rennes à

Lille). Ces brins sont associés à d'autres brins qui contiennent le complément du nom des villes (ici Grenoble et Rennes). Des centaines de milliards d'appariement se produisent chaque seconde.

3. LES LIGASES RELIENT des molécules. Chaque fois que ces protéines trouvent deux molécules d'ADN à proximité, elles déclen-

chent une réaction des deux extrémités et relient les deux molécules en une seule par une liaison covalente.

problème était «NP-complet» : la plupart pensent qu'on ne trouvera jamais d'algorithme rapide pour résoudre ce problème bien que la preuve de cette supposition reste à fournir (voir *Les lois du tout ou rien*, par Jean-Paul Delahaye, *Pour la Science*, juillet 1995). Le problème du chemin hamiltonien n'est pas insoluble, mais le temps de calcul risque d'être excessivement long.

Considérons par exemple l'algorithme suivant :

- Soit un graphe possédant n sommets.
1. Engendrer un ensemble de chemins aléatoires.
2. Pour chaque chemin de l'ensemble :
 - a. Vérifier si le chemin part du sommet de départ et se termine au sommet d'arrivée. Sinon, le retirer de l'ensemble.
 - b. Vérifier si ce chemin passe exactement par n sommets. Sinon, le retirer de l'ensemble.
 - c. Pour chaque sommet, vérifier que ce chemin y passe. Sinon, retirer ce chemin de l'ensemble.
3. Si l'ensemble n'est pas vide, alors il existe un chemin hamiltonien. Si l'ensemble est vide, alors il n'existe pas de chemin hamiltonien.

Cet algorithme est imparfait, mais si l'ensemble des chemins est engendré de manière suffisamment aléatoire et si l'ensemble résultant est suffisamment grand, alors cet algorithme donnera probablement la solution. C'est cet algorithme que

j'ai mis en œuvre dans la première expérience de calcul avec l'ADN.

Sentiers dans un laboratoire

Pour cette première expérience, j'ai cherché un problème suffisamment simple pour qu'un prototype d'ordinateur à ADN le résolve, mais suffisamment important pour constituer une preuve indubitable de l'intérêt de ces nouvelles machines. J'ai choisi un graphe comportant sept villes et 14 vols représenté page 58. À la main, on met en moyenne une minute pour trouver l'unique chemin hamiltonien de ce graphe (vous pouvez commencer maintenant...).

Pour examiner la technique utilisée, considérons le graphe qui contient quatre villes seulement : Toulouse, Grenoble, Rennes et Lille, reliées par six vols. On cherche un chemin hamiltonien qui part de Toulouse et qui finit à Lille.

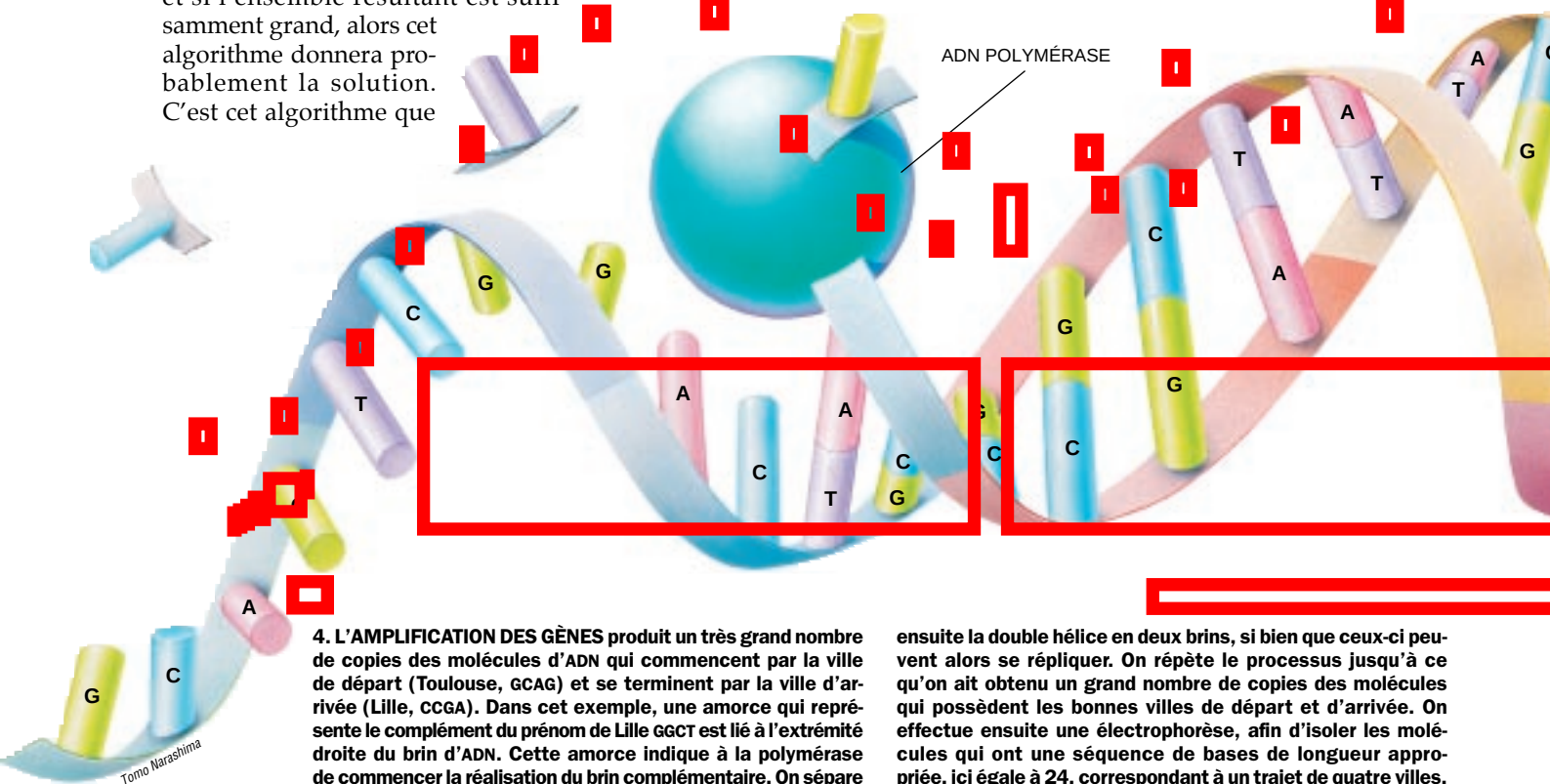
J'ai commencé par attribuer une séquence aléatoire d'ADN à chacune des villes : à Toulouse, j'ai associé ACTTGCAG, et à Grenoble TCGGACTG. J'ai alors imaginé que la première moitié des séquences était le prénom des villes et la seconde moitié leur nom propre. Ainsi le nom propre de Toulouse est GCAG, et le prénom de Grenoble TCGG.

J'ai ensuite codé chaque vol en mettant bout à bout le nom propre de la ville d'origine avec le prénom de la ville d'arrivée. Dans notre exemple, le code du vol reliant Toulouse à Grenoble est GCAGTCGG.

Comme on peut former un ADN complémentaire de tout brin d'ADN, chaque ville possède un nom complémentaire. Le nom complémentaire de Toulouse est TGAACGTC.

Après avoir effectué ces codages, j'ai synthétisé les séquences d'ADN complémentaires des noms de ville et les séquences des codes des vols. J'ai ensuite pris une pincée de chaque séquence, environ 10^{14} molécules que j'ai placées dans un tube à essai. Pour que le calcul commence, j'ai simplement ajouté de l'eau, de la ligase, du sel et quelques autres composants qui reproduisent les conditions qui règnent à l'intérieur d'une cellule. En tout, j'ai utilisé un cinquième de cuillère à café de solution et, une seconde plus tard, j'avais la solution du problème du chemin hamiltonien.

Afin de comprendre le déroulement du calcul, examinons les réactions dans le tube. Le numéro du vol reliant Toulouse à Grenoble (GCAGTCGG), par exemple, et le nom complémentaire de Grenoble (AGCCTGAC) peuvent se rencontrer par hasard. Or, par construction, la première séquence se termine

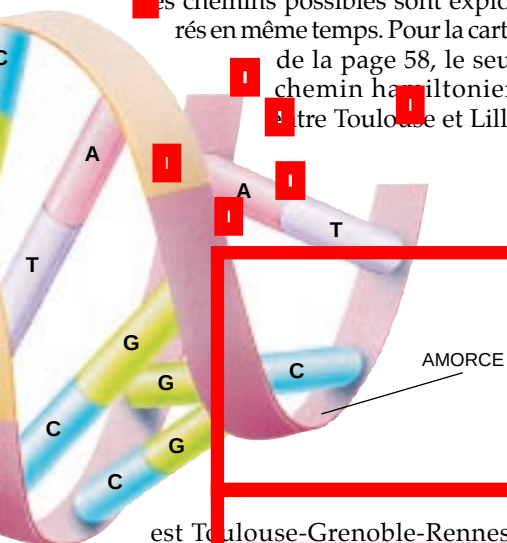


ensuite la double hélice en deux brins, si bien que ceux-ci peuvent alors se répliquer. On répète le processus jusqu'à ce qu'on ait obtenu un grand nombre de copies des molécules qui possèdent les bonnes villes de départ et d'arrivée. On effectue ensuite une électrophorèse, afin d'isoler les molécules qui ont une séquence de bases de longueur appropriée, ici égale à 24, correspondant à un trajet de quatre villes.

par TCGG et la deuxième commence par AGCC. Ces séquences étant complémentaires, elles s'associent. La molécule complexe ainsi formée peut ensuite rencontrer la molécule associée au vol Grenoble-Rennes (ACTGGGCT), qui se liera à son tour au complexe, parce que la fin de celui-ci (TGAC) est complémentaire du début du code du vol (ACTG). Les molécules s'allongent ainsi à mesure que les codes des vols s'associent aux noms complémentaires des villes. Les ligases du mélange relient en permanence les chaînes d'ADN codant les vols. Dans le tube, les molécules restantes représentent des chemins aléatoires passant par les différentes villes. La première étape de notre algorithme est terminée.

Comme on introduit initialement un très grand nombre de molécules et que le problème ne fait intervenir qu'un petit nombre de villes, on obtient très vraisemblablement au moins une molécule qui code le chemin hamiltonien cherché. Ainsi la solution d'un problème mathématique est stockée dans une simple molécule.

Remarquons aussi que tous les chemins sont créés en même temps grâce aux interactions simultanées de centaines de milliers de milliards de molécules. Cette réaction biochimique est un gigantesque calcul parallèle : tous les chemins possibles sont explorés en même temps. Pour la carte de la page 58, le seul chemin hamiltonien entre Toulouse et Lille



est Toulouse-Grenoble-Rennes-Lille. La molécule qui code cette solution possède donc la séquence GCAGTC...GACTGGGCTATCTGCCA. Cette solution est présente dans le tube sous la forme double brin, c'est-à-dire avec la séquence complémentaire appariée.

Toutefois, cette molécule se trouvait parmi les centaines de milliards

Cristal d'ADN

La science est très loin de pouvoir créer des ordinateurs moléculaires et, sans l'exemple donné par la vie elle-même, il ne serait pas évident qu'une telle organisation est possible. Toutefois, l'expérience décrite dans cet article a montré comment les bases complémentaires assurent l'auto-assemblage des molécules d'ADN en une structure linéaire. Des structures autres que linéaires peuvent-elles être construites de la sorte?

Les travaux de Nadrian Seeman, de l'Université de New York, sur les structures d'ADN branchées apportent un élément de réponse. Les structures d'ADN branchées, des molécules d'ADN avec plusieurs extrémités, sont présentes dans la cellule lors de la réplication de l'ADN et pendant la recombinaison. Avec ses collègues, N. Seeman a appris à façonner des molécules d'ADN en des structures branchées. Sa construction d'un cube dont les

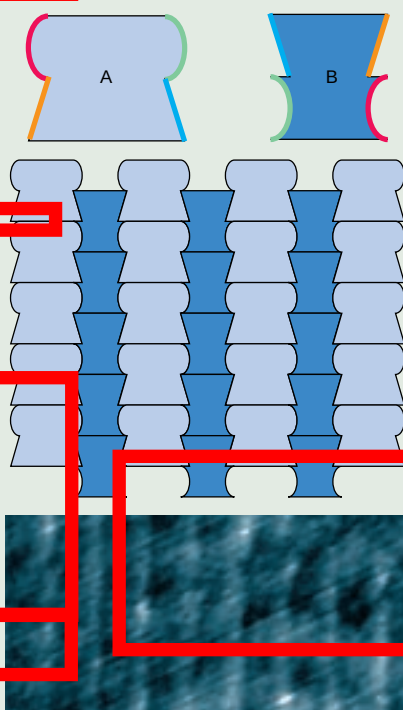
arêtes sont des molécules d'ADN marque le début de ce que l'on nomme « les nanotechnologies de l'ADN ».

En 1977, je fis le lien entre les travaux de N. Seeman et ceux de L. Adleman grâce à la théorie des pavages (voir les pavages de Penrose dans l'article de Martin Gardner, page 86). La théorie des pavages est intéressante non seulement par sa nature géométrique, mais aussi parce qu'elle est liée à la logique et au calcul. Dans les pavages, la forme des bords des pavés détermine quels pavés peuvent être assemblés. Dans un brin d'ADN, la séquence des bases détermine quels brins s'associent. Le passage aux « pavés moléculaires » constitués de brins d'ADN était alors naturel.

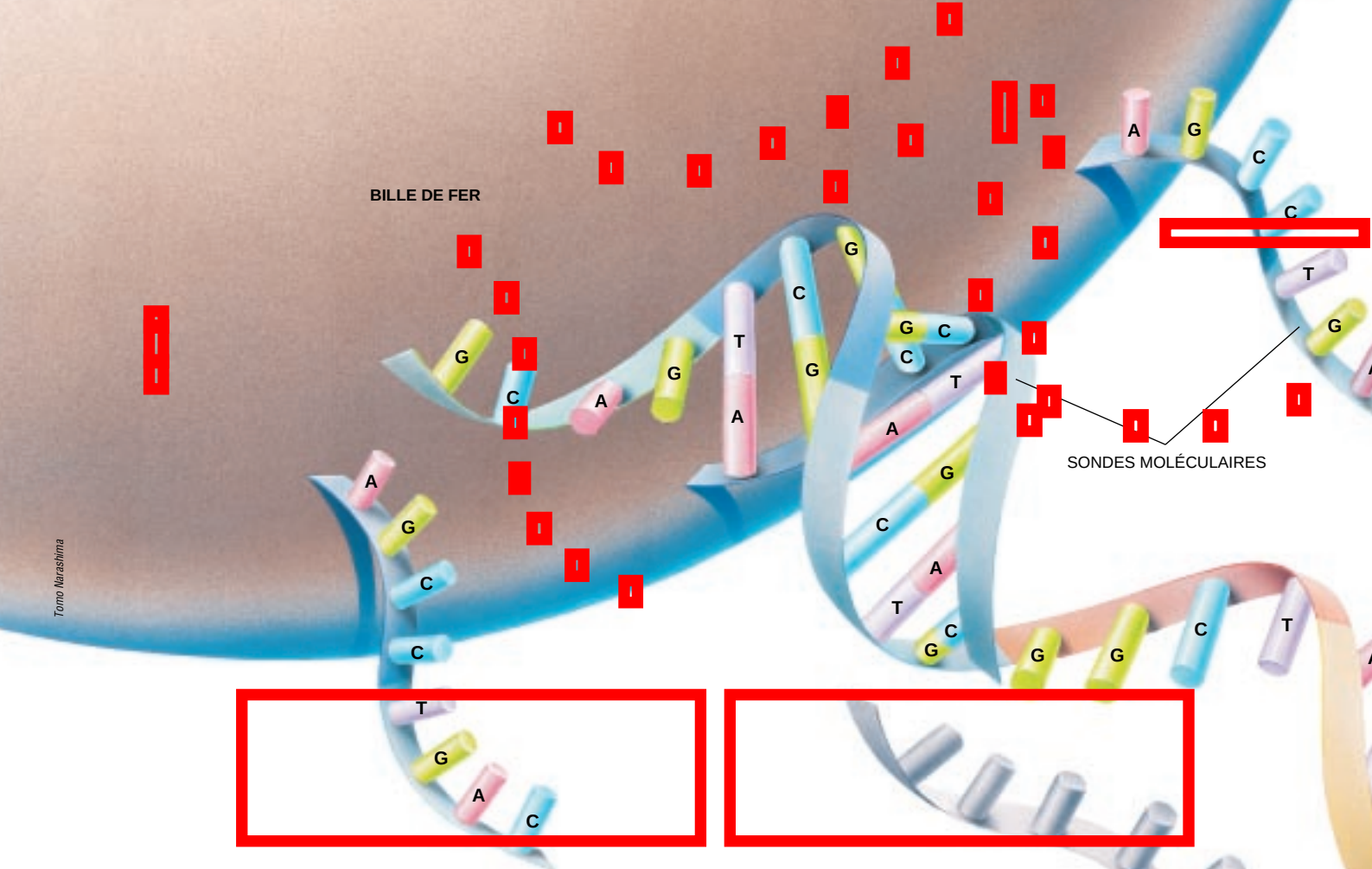
Avec le groupe de N. Seeman, nous avons construit le premier pavage moléculaire en laboratoire. Deux pavés moléculaires A et B (deux structures branchées), s'assemblent d'une façon unique pour produire un pavage rayé. Chaque pavé moléculaire comporte quatre extrémités avec des séquences uniques ; chaque extrémité du pavé A est complémentaire d'une extrémité du pavé B, de sorte que, lorsque l'on mélange de nombreux pavés dans une solution, ils s'assemblent spontanément en un cristal bidimensionnel d'ADN (voir la figure).

À première vue, ce simple motif rayé ne ressemble en rien au calcul. Toutefois, les pavés moléculaires sont « programmables » : on peut modifier facilement les extrémités d'assemblages de chaque pavé pour déterminer leurs interactions. En fait, on peut construire ainsi une infinité de pavés, dont des pavés qui, comme dans l'expérience d'Adleman, simuleraient une machine de Turing par la « logique » de leur assemblage. L'auto-assemblage des pavés d'ADN peut fonctionner comme un ordinateur universel.

Erik WINFREE,
Institut de technologie de Californie



Le premier pavage bidimensionnel d'ADN est obtenu en mélangeant deux sortes de pavés d'ADN, des structures d'ADN qui comportent des extrémités complémentaires (segment colorés, en haut). Ces pavés s'assemblent selon une structure rayée unique (au centre), révélée par microscopie à force atomique (en bas).



5. À L'AIDE DE SONDAS MOLÉCULAIRES, on identifie les brins d'ADN qui codent des chemins passant par les villes intermédiaires (Grenoble et Rennes). Les molécules sondes qui comportent le complémentaire du nom de Grenoble (AGCCTGAC) sont attachées à une bille de fer que l'on met en suspension dans le liquide. En raison des forces entre bases complémentaires, ces molécules captent les brins

d'ADN qui contiennent le nom de Grenoble (TCGACTG). Les brins qui ne contiennent pas le nom de Grenoble sont alors enlevés. On répète ce processus avec des molécules sondes qui codent le complémentaire du nom de Rennes. Lorsque toutes les étapes sont terminées, les brins qui restent sont ceux qui codent la solution du problème du chemin hamiltonien : GCAGTCGGACTGGGCTGTCGCA.

de molécules qui codent des chemins qui ne sont pas hamiltoniens. Comment les éliminer? Pour enlever les molécules qui ne commencent pas par la ville de départ et qui ne se terminent pas par la ville d'arrivée, je me suis servi de la technique d'amplification des gènes (PCR). Cette technique utilise de nombreux exemplaires de deux séquences « amorces » complémentaires des deux extrémités de la séquence d'ADN que l'on désire amplifier. Ainsi, l'ADN polymérase effectue plusieurs cycles de réplication, alternativement sur chacun des brins. Les amorces utilisées sont, d'une part, le nom propre de la ville de départ (GCAG pour Grenoble) et, d'autre part, le complémentaire du prénom de la ville d'arrivée (GGCT pour Lille). Ces deux amorces agissent simultanément : la première prévient l'ADN polymérase de copier les séquences qui possèdent la bonne ville de départ,

la seconde déclenche la duplication de molécules qui codent la bonne ville d'arrivée.

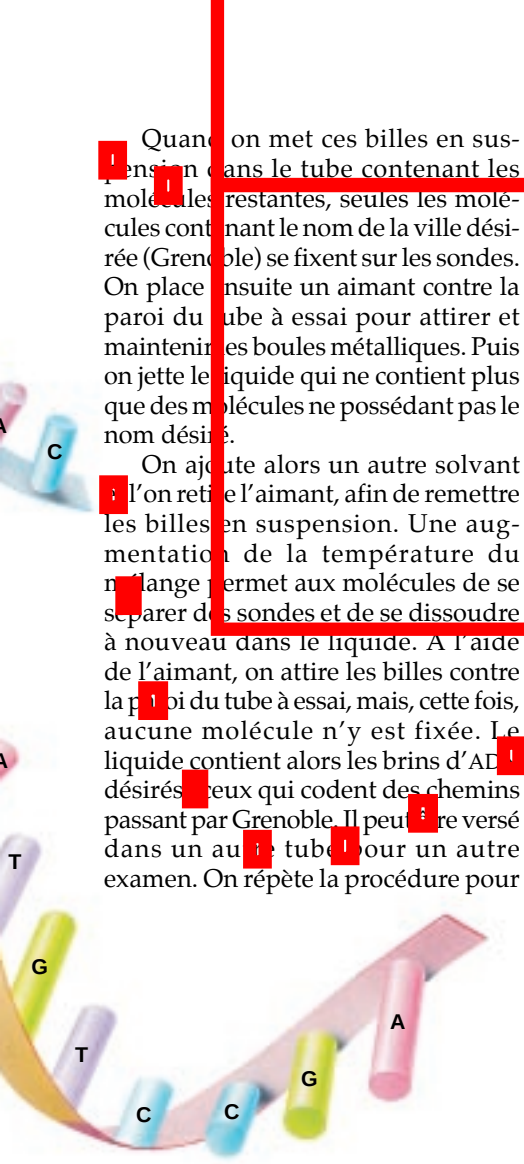
Pour amplifier l'ADN, on effectue des cycles à haute et à basse température. À haute température, on dissocie les complexes double brin pour libérer les séquences complémentaires des amorces. À basse température, on apparie les amorces, et l'ADN polymérase effectue la réplication, recréant une molécule double brin.

Ainsi, les molécules qui possèdent les bonnes villes de départ et d'arrivée se multiplient à une vitesse très élevée (exponentielle). En revanche, les molécules qui possèdent la bonne ville de départ, mais pas la bonne ville d'arrivée, ou réciproquement, se multiplient à une vitesse inférieure (linéaire). Les séquences d'ADN qui ne possèdent ni la bonne ville de départ, ni la bonne ville d'arrivée ne se reproduisent pas du tout. Après la réaction,

le tube à essai contient beaucoup de molécules dont les villes de départ et d'arrivée sont les bonnes et peu de molécules ne satisfaisant pas ces deux critères. L'étape 2a de l'algorithme est alors terminée.

J'utilise ensuite un gel d'électrophorèse pour identifier les molécules qui possèdent la bonne longueur, 24 dans notre exemple ; toutes les autres molécules sont éliminées. C'est l'étape 2b de notre algorithme.

Afin de vérifier que les séquences qui restent codent bien des chemins qui passent par les villes intermédiaires, j'utilise la complémentarité des séquences d'ADN dans une procédure nommée « séparation par affinité ». On utilise des sondes d'ADN qui codent le complémentaire du nom d'une ville particulière, par exemple Grenoble. Ces sondes sont fixées à de microscopiques sphères de fer d'un micromètre de diamètre environ.



Quand on met ces billes en suspension dans le tube contenant les molécules restantes, seules les molécules contenant le nom de la ville désirée (Grenoble) se fixent sur les sondes. On place ensuite un aimant contre la paroi du tube à essai pour attirer et maintenir les boules métalliques. Puis on jette le liquide qui ne contient plus que des molécules ne possédant pas le nom désiré.

On ajoute alors un autre solvant : l'on retire l'aimant, afin de remettre les billes en suspension. Une augmentation de la température du mélange permet aux molécules de se séparer des sondes et de se dissoudre à nouveau dans le liquide. À l'aide de l'aimant, on attire les billes contre la paroi du tube à essai, mais, cette fois, aucune molécule n'y est fixée. Le liquide contient alors les brins d'ADN désirés : ceux qui codent des chemins passant par Grenoble. Il peut être versé dans un autre tube pour un autre examen. On répète la procédure pour

ouvelle amplification des gènes, puis une autre électrophorèse. Cette analyse finale montrera que les molécules restantes codaient effectivement le chemin désiré. Après sept jours de laboratoire, le premier calcul utilisant de l'ADN était terminé.

L'émergence d'un nouveau domaine

Comment perfectionner ce système? Les ordinateurs moléculaires ont de nombreuses propriétés intéressantes. Leurs capacités de stockage sont considérables : un gramme d'ADN sec occupe un volume de un centimètre cube environ et stocke autant d'informations qu'un millier de milliards de disques compacts. En outre, les ordinateurs moléculaires fonctionnent de manière très parallèle. Même dans notre petite expérience conduite avec un cinquième de cuillerée à café de solution, 10^{14} codes de vols étaient mis bout à bout chaque seconde. L'ordinateur micro-électronique le plus puissant du monde n'accomplira vraisemblablement jamais une telle tâche aussi rapidement.

Les ordinateurs moléculaires consomment extrêmement peu d'énergie : un joule suffit, en principe, pour effectuer 2×10^{19} opérations de liaison. C'est remarquable, car le deuxième principe de la thermodynamique fixe la limite à 34×10^{19} opérations irréversibles par joule à la température ambiante.

Les supercalculateurs existants en sont très loin : ils ne dépassent pas 10^9 opérations par joule.

De nombreux théoriciens et expérimentateurs étudient aujourd'hui les ordinateurs moléculaires. Réussiront-ils à construire des ordinateurs moléculaires qui rivaliseront avec les ordinateurs électroniques? De gigantesques investissements en hommes et en argent ont fait de l'ordinateur électronique une merveille de notre époque ; il sera difficile à battre.

Cependant, ce serait une erreur de considérer seulement l'intérêt pratique des ordinateurs moléculaires. Mon expérience est la première d'un nouveau domaine des sciences. Partout, cette nouvelle « science moléculaire » fait des émules. Par exemple, Gerald Joyce, qui travaille à l'Institut Scripps, en Californie, et Laura Landweber, de l'Université Princeton, élèvent des milliards de molécules d'ARN génération après génération, jusqu'à ce que les « meilleures » aient les propriétés de catalyse désirées (voir *L'évolution moléculaire dirigée*, par Gerald Joyce, *Pour la Science*, février 1993). À l'Institut de technologie du Massachusetts, Julius Rebek crée des molécules qui peuvent se reproduire, ce qui nous donne des indications sur la façon dont la vie est apparue sur Terre (voir *Qu'est-ce que la vie?*, par Julius Rebek, *Pour la Science*, septembre 1994). À l'Institut de technologie de Californie, Erik Winfree synthétise des complexes moléculaires « intelligents », qui peuvent être « programmés » pour s'auto-assembler en des structures prédéterminées de complexité arbitraire (voir l'encadré de la page 61). Le potentiel de la biochimie est considérable.

La biologie et l'informatique, qui se sont épanouies durant le dernier demi-siècle, progresseront encore beaucoup et seront à l'origine de développements industriels importants au siècle prochain. Entre la biologie et l'informatique, entre la vie et le calcul, de grandes découvertes restent à faire.

les autres billes intermédiaires, Rennes dans notre exemple. Après une journée complète de travail au laboratoire, je terminai cette procédure itérative ; c'était la partie la plus fastidieuse de l'expérience.

L'étape 2c de l'algorithme se termine avec la fin de la séparation par affinité : dans le tube se trouvent alors les molécules d'ADN qui codent le chemin hamiltonien. Ainsi, si le tube contenait un seul type de molécule, je pouvais en conclure qu'un chemin hamiltonien existait dans le graphe sinon, un tel chemin n'existait pas. Comment le savoir? En utilisant une nou-

Leonard A. ADLEMAN travaille au département d'informatique de l'Université de Californie du Sud.

James D. WATSON, *Biologie moléculaire* (avec F. Crick), InterÉditions, 1978.

Leonard M. ADLEMAN, *Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems*, in *Science*, vol. 266, pp. 1021-1024, 11 novembre 1994.

David K. GIFFORD, *On the Path to Com-*

putation with DNA, in *Science*, vol. 266, pp. 993-994, 11 novembre 1994.

Richard J. LIPTON, *DNA Solution of Hard Computational Problems*, in *Science*, vol. 268, pp. 542-545, 28 avril 1995.

Jean-Paul DELAHAYE, *Les lois du tout ou rien*, in *Pour la Science*, juillet 1995.

D'autres informations sur les ordinateurs à ADN peuvent être trouvées sur notre site : <http://www.pourlascience.com/>

Le Gondwana

ROLAND TROMPETTE

Le supercontinent du Gondwana, père de la plupart des continents actuels, a vécu 400 millions d'années. Les géologues retracent l'histoire de son assemblage, de sa fragmentation et reconstituent les climats qui y régnaient.

Le Gondwana est une entité géologique réelle qui évoque, dans notre imaginaire, le mythe du continent disparu. Le Gondwana n'a pas été englouti par les flots, au contraire de la disparition légendaire de l'Atlantide, mais s'est déchiqueté pour donner la plupart des continents actuels. Les récents travaux des géologues qui peuvent remonter sûrement dans le passé permettent de reconstituer l'histoire du Gondwana, de sa création à sa disparition.

Le Gondwana réunissait, il y a 500 millions d'années, cinq continents : Afrique, Amérique du Sud, Antarctique, Australie et Inde, plus la péninsule Arabique, les grandes îles de Ceylan, Madagascar, de la Nouvelle-Zélande et de l'Asmanie. La preuve de l'existence du Gondwana réside dans la présence d'une succession de roches particulières qui ont été trouvées sur toutes les terres qui constituaient le Gondwana et qui se sont déposées durant l'intervalle Carbonifère-Jurassique supérieur (entre 360 et 150 millions d'années).

Les géologues de la fin du XIX^e siècle ont été fascinés par cette association de roches. Celles-ci occupaient des milliers de kilomètres carrés sur chacun des cinq continents (en Europe, elles étaient cependant peu connues). Épaisses de plusieurs milliers de mètres et restées à peu près horizontales, elles formaient de spectaculaires falaises. La séquence débutait par de beaux faciès glaciaires et se poursuivait par des couches de charbon renfermant une abondante flore constituée notamment de belles fougères et, quelquefois, d'une jolie faune de petits reptiles, puis par des grès et des argilites rouges associés à des faciès évaporitiques (gypse et anhydrite, qui sont des sulfates de calcium, et halite, qui est un

chlorure de sodium). À la partie sommitale affleuraient d'épaisses et massives coulées de basaltes qui, en Afrique du Sud, couronnaient les fameux plateaux du Karoo.

Le concept du Gondwana

Ce terme a été utilisé pour la première fois au début de 1875, en Inde, pour désigner des roches essentiellement sédimentaires sub-horizontales, affleurant dans la portion centrale de la péninsule et discordantes sur un socle très ancien. Ces roches, la plupart continentales, étaient datées par des faunes et des flores de l'intervalle Carbonifère-Jurassique supérieur. Aussi le terme de Gondwana dérive-t-il du nom d'une peuplade indienne, les Gonds qui, du XII^e au XVIII^e siècle, dominèrent cette partie de l'Inde avant d'être refoulés dans les montagnes de l'ouest de l'Inde. Le terme de Gondwana est, à l'origine, une dénomination géographique indienne.

Les géologues travaillant dans l'hémisphère Sud constatèrent que cette séquence caractéristique n'était pas particulière à l'Inde. Elle se retrouvait en

Afrique du Sud, en Australie et en Amérique du Sud : plus tard, elle sera identifiée en Antarctique. Pour rendre compte de ces similitudes, le géologue autrichien Eduard Suess suggéra, dans un ouvrage publié autour de 1900 (titre français : *La face de la Terre*) que, durant l'intervalle Carbonifère-Jurassique, les cinq continents énumérés précédemment avaient été réunis en un méga-continent austral ou Gondwanaland. Aujourd'hui séparés par des océans, ces cinq continents représentaient, selon Suess, les vestiges de ce méga-continent dont la majeure partie se serait enfoncée dans les océans.

L'idée de Suess est reprise par le météorologiste allemand Alfred Wegener, inventeur de l'hypothèse de la mobilité des continents. Mais celui-ci ne peut admettre l'engloutissement même partiel de ce méga-continent. La

composition chimique moyenne est celle d'un granite, est légère, sa densité est voisine de 2,7 ; la croûte océanique de composition basaltique est plus lourde, sa densité est de l'ordre de 2,9. Aussi les continents légers ne peuvent-ils s'enfoncer dans la croûte océanique ; ils sont insubmersibles et

1. LE SUPER-CONTINENT DE RODINIA (en haut) est l'ancêtre du Gondwana. Il s'assemble autour de 1 200-1 100 millions d'années, époque où les collisions entre les divers blocs engendrent les chaînes dites Grenville, dont la continuité est utilisée pour reconstituer l'architecture du Rodinia. Le premier épisode de fracturation individualise le Rodinia occidental de petite taille. L'épisode principal, autour de 800 millions d'années, sépare le vaste Rodinia oriental du Rodinia central. Les Rodinia occidental et central, après dérive et rotation dans le sens horaire, entrent en collision et formeront l'essentiel du Gondwana. Une partie du Rodinia oriental, après une longue dérive et une rotation anti-horaire, constituera le flanc Ouest du Gondwana.

LE MEGA-CONTINENT DU GONDWANA (en bas) s'est assemblé autour de 600 millions d'années. Il est reconstitué en dessinant l'Afrique dans sa position actuelle. En réalité, l'Afrique est, à cette époque, renversée, avec l'Afrique du Nord à proximité du pôle Sud. Deux mégachaines de montagnes panafricaines représentent les cicatrices des deux collisions principales assurant l'aggrégation du Gondwana. La mégachaine orientale, joignant l'Arabie saoudite au Mozambique, est la trace de la collision, autour de 700-600 millions d'années, entre les Gondwana central et oriental. La mégachaine occidentale, reliant l'Afrique de l'Ouest à la côte atlantique de l'Afrique du Sud, marque la collision autour de 600 millions d'années des Gondwana central et occidental. Immédiatement après l'assemblage du Gondwana, le Laurentia se détache de l'Amérique du Sud. La fragmentation du Gondwana se produit, à partir de 170 millions d'années, suite à l'ouverture des océans atlantique, indien et péri-antarctique.

CHAINES GRENVILLE
EDIFIEES ENTRE 1200 ET 500
MILLIONS D'ANNÉES

FRAGMENTATION MAJEURE
ENTRE 900 ET 700 MILLIONS D'ANNÉES

BLOCS QUI CONTRIBUERONT
À LA FORMATION
D'UN MÉGA-CONTINENT
DE LAURASIA

RODINIA CENTRAL :
FUTUR GONDWANA ORIENTAL

FRAGMENTATION
ENTRE 900 ET 800 MILLIONS D'ANNÉES

AFRIQUE DU
NORD-EST

AFRIQUE DU
NORD-EST
+ NORD-EST BRÉSIL

ANTARCTIQUE

AMÉRIQUE DU NORD
OU LAURÉNTIA

FRAGMENTATION TARDIVE
AUTOUR DE 550 MILLIONS D'ANNÉES
APRÈS L'ASSEMBLAGE DE GONDWANA

AMÉRIQUE DU SUD

AFRIQUE
DE L'OUEST

RODINIA OCCIDENTAL :
FUTUR GONDWANA CENTRAL

RODINIA ORIENTAL :
FUTUR GONDWANA OCCIDENTAL

ROTATION HORLAIRE
DE RODINIA OCCIDENTAL

ROTATION ANTI-HORLAIRE
DE RODINIA ORIENTAL

CICATRICE DE LA COLLISION ENTRE GONDWANA
CENTRAL ET OCCIDENTAL

CICATRICE DE LA COLLISION ENTRE GONDWANA
CENTRAL ET ORIENTAL

CHAÎNES PRÉ-ALPINES JEUNES
(550 MA) DE GONDWANA OCCIDENTAL

CHAÎNES PRÉ-ALPINES CONTEMPORAINES
DE L'ASSEMBLAGE DE GONDWANA (600 MA)

CARTONNÉ DU PRÉCAMBRIEN

AFRIQUE
DE L'OUEST

GONDWANA
CENTRAL
D'HOMEYDES

AMÉRIQUE DU SUD

AMÉRIQUE DU SUD
AMPUTÉE DU NORD-EST BRÉSIL

NORD-EST
BRÉSIL

AFRIQUE AMPUTÉE
DE LA PORTION OUEST
AUGMENTÉE DU
NORD-EST BRÉSIL

GONDWANA
OCCIDENTAL

INDES
PRÉ-DE GONDWANA

GONDWANA
ORIENTAL

ANTARCTIQUE

AUSTRALIE

SÉPARATION TARDIVE
DE LAURÉNTIA

OUVERTURE OCÉANIQUE AU NORD-EST DU SUD ET CENTRAL

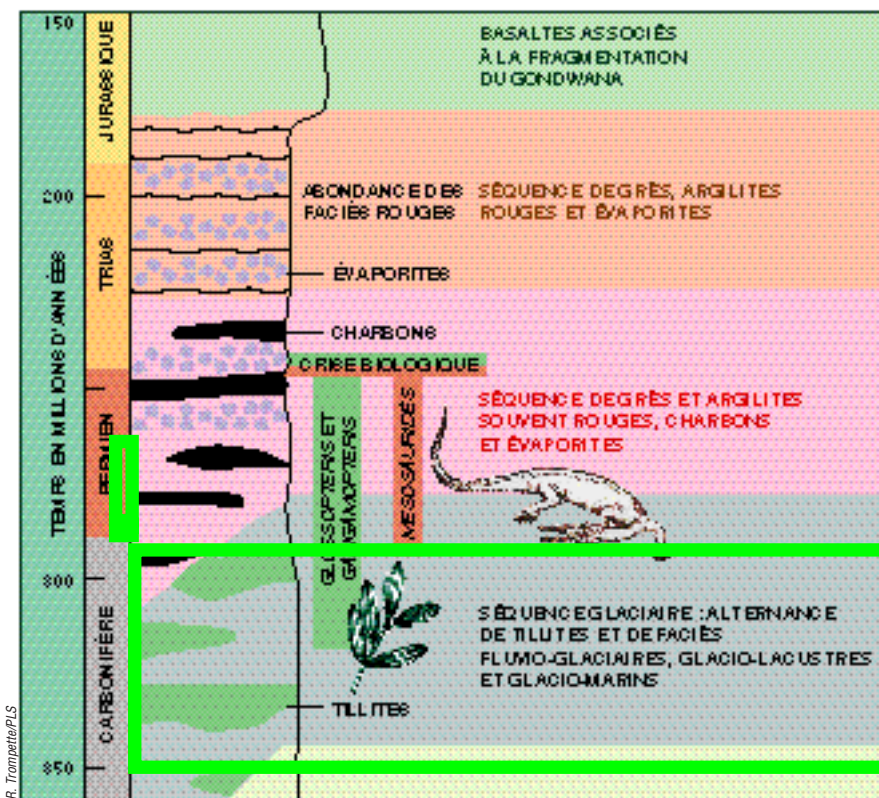
OUVERTURE OCÉANIQUE PERI-ANTARCTIQUE

R. Trampette/PLS



R. Trompette

2. FALAISE DU CAP DE BONNE-ESPÉRANCE. À la partie inférieure, des roches métamorphiques redressées et des granites appartiennent à la chaîne de Malmesbury une des chaînes panafricaines plissée autour de 600 millions d'années lors de la collision entre les deux blocs de Rodinia Ouest et Rodinia Est. À la partie supérieure, les couvertures du groupe de la Montagne de la Table scellent l'assemblage du Gondwana. Ces grès se sont déposés autour de 500 millions d'années. Le contact entre ces deux unités est plan et horizontal : ainsi, la chaîne de Malmesbury était complètement rabotée au moment du dépôt des grès. La route suit la limite entre les deux unités lithologiques. Les séquences permo-carbonifères (tillite de Dwyka, charbons) ne sont pas visibles.



R. Trompette/PLS

3. LA SÉQUENCE TYPE DU GONDWANA EST LA SIGNATURE DE CE CONTINENT ANCIEN. Couvrant la période Carbonifère-Jurassique (350-150 millions d'années), elle est essentiellement continentale. La formation inférieure glaciaire débute au Carbonifère inférieur et se prolonge jusqu'au Permien, en Australie. La majorité des charbons se déposent à hautes latitudes sous des climats humides et froids ; ils sont contemporains de grès et d'argilites souvent rouges et d'évaporites formées à plus basses latitudes, en climat chaud et aride. La flore à *Glossopteris* et *Gangamopteris* caractérise le Carbonifère supérieur et le Permien, alors que les reptiles Méso-sauridés se rencontrent dans le Permien du Brésil et d'Afrique du Sud. Les basaltes, couronnant la séquence, marquent le début de la fragmentation du Gondwana.

forment des entités géologiques permanentes, archives de l'histoire de notre planète. Wegener propose l'existence, entre 300 et 200 millions d'années, d'une seule masse continentale, la Pangée issue de la jonction du Gondwana, le méga-continent austral, et du Laurasia, le méga-continent septentrional. Les continents actuels seraient issus de sa fragmentation. Contrairement aux vues fixistes de Suess, ils occuperaient leurs positions actuelles après une longue dérive. On sait que, devant l'incapacité de Wegener à imaginer des forces susceptibles de déplacer de telles masses continentales, sa théorie fut rejetée par la plupart des géologues et par la totalité des géophysiciens. Ce que l'on sait moins, c'est que des géologues de l'hémisphère Sud, et notamment le Sud-Africain Alexander Du Toit, très fin connaisseur de la géologie de l'Afrique du Sud et de l'Amérique du Sud, continuèrent à croire en la réalité d'un super-continent du Gondwana.

L'hypothèse du Gondwana rendait compte des similarités des séquences Carbonifère-Jurassique observées sur les divers continents. Et notamment celles des flores de fougères et des faunes de Méso-sauridés, petits reptiles qui sont localisés, soit au-dessus des carbonates comme dans le bassin du Parana au Brésil, soit en dessous comme dans le bassin sud-africain du Karro.

Les adversaires de cette hypothèse devaient montrer beaucoup d'imagination pour expliquer ces ressemblances : transport de graines par le vent ou des organismes volants ; animaux migrant le long d'éphémères et interminables (plusieurs milliers de kilomètres) isthmes transocéaniques ou bien traversant les mers en sautant d'île en île. À moins que ne soient invoquées des évolutions identiques s'accomplissant au même moment en des points très éloignés.

Le Gondwana reconstitué

Comment replace-t-on les continents actuels au sein du Gondwana ? Tout d'abord, en s'aidant du tracé des côtes ou plutôt de la base de la pente continentale qui, *à grosso modo*, correspond à la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique. Souvenons-nous que c'est d'ailleurs l'emboîtement quasi parfait des côtes sud-américaine et africaine qui a mis Wegener sur la piste de l'hypothèse de la dérive des continents. Ensuite, en alignant les principales

chaînes panafricaines fragmentées lors de la dislocation du Gondwana, par exemple lorsque l'Atlantique Sud s'est ouvert. Ainsi la chaîne brésilienne du Sergipe est-elle prolongée par la chaîne africaine des Oubanguides quand on emboîte les côtes africaine et sud-américaine ; ces deux chaînes représentent les deux morceaux d'une méga-chaîne, qui s'est formée lors des collisions responsables de l'édification du Gondwana à partir de la fragmentation du supercontinent Rodinia plus ancien (voir la figure 1).

Enfin les études paléomagnétiques renseignent sur les positions géographiques successives occupées par un continent. L'inclinaison du champ magnétique terrestre varie avec la latitude : horizontale à l'équateur, elle est verticale aux pôles. Il est possible de mesurer ces paléo-inclinaisons imprimées dans les roches sédimentaires et magmatiques et d'en déduire à quelle latitude ces roches se sont mises en place.

L'agrégation du Gondwana

Une fraction de la communauté géologique a longtemps cru que le Gondwana s'était formé au Précambrien, autour de 2 000 Ma. C'est encore la position défendue dans l'édition 1996 du *The New Penguin Dictionary of Geology*. Pourtant, dès 1981, le paléomagnéticien américain Michael McWilliams avait suggéré que le Gondwana s'était constitué plus tardivement, autour de 600 millions d'années, lors de l'orogénèse panafricaine. Il résultait, selon lui, de la collision de deux blocs, l'un oriental et l'autre occidental.

La cicatrice de cette collision était marquée par une méga-chaîne de montagnes qui traverse l'Arabie saoudite, l'Éthiopie, le Kenya, la Tanzanie, le Mozambique et écorne l'Est de l'Antarctique. Toutefois, une seconde méga-chaîne de montagnes panafricaine, parallèle à la précédente et traversant l'Afrique de l'Ouest, le Brésil et se prolongeant jusqu'en Afrique du Sud, indique que la construction du Gondwana a été plus complexe que ce que suggérait McWilliams. Le Gondwana résulterait d'une double collision entre trois blocs principaux : le Gondwana oriental, tel qu'il a été défini par McWilliams, le Gondwana central, composé de l'Afrique amputée de sa

portion Ouest, mais augmentée du Nord-Est du Brésil, et le Gondwana occidental qui englobe le reste de l'Amérique du Sud et l'Afrique de l'Ouest. Au sein des blocs, la plupart des chaînes panafricaines intérieures résultent de collisions secondaires.

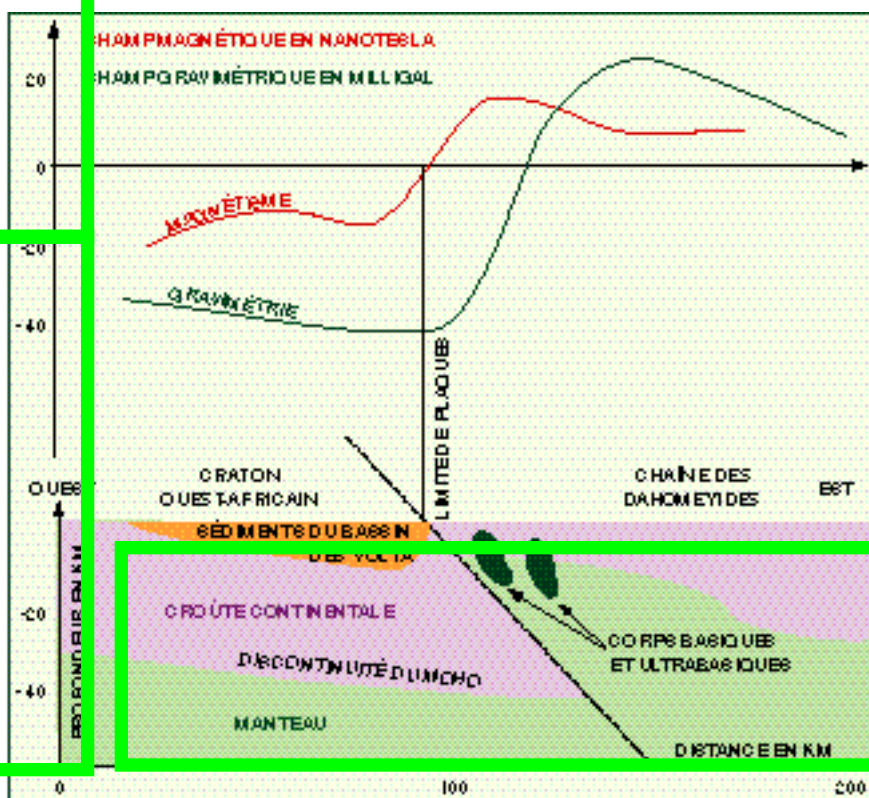
Les chaînes panafricaines, étroites et souvent allongées sur des centaines, voire sur un millier de kilomètres, sont d'excellents marqueurs du collage des blocs constitutifs du Gondwana. De la même façon, elles permettent d'apprécier l'ampleur des déplacements qui accompagnent sa fragmentation. La reconstitution du tracé des chaînes panafricaines est donc fondamentale.

Bien sûr, ce ne sont pas les reliefs, érodés depuis bien longtemps, qui permettent d'identifier ces chaînes, mais, par exemple, les vestiges de paléoocéans panafricains engloutis (on dit subduits) dans le manteau, lors du rapprochement des blocs. La géophysique permet également de localiser ces zones de collision. Les deux blocs qui s'affrontent ont toutes les chances

d'avoir une structure profonde différente qui apparaîtra dans les cartes ou/et dans les profils sismiques, gravimétriques ou magnétiques. C'est ainsi que Yvonne Crenn, géophysicienne à l'ORSTOM (Office français de Coopération et de Recherche Scientifique Outre-mer), a montré dès 1957, avant l'avènement de la tectonique des plaques, que la chaîne des Dahomeyides du Togo et du Bénin représentait une zone d'affrontement entre deux blocs – on dirait aujourd'hui deux plaques lithosphériques – dont les structures internes, révélées par les études gravimétrique et magnétique, étaient différentes.

De Rodinia au Gondwana

Les ophiolites, ou restes de croûte océanique panafricaine, les plus anciennes sont radiométriquement datées d'environ 900 millions d'années, indiquant que des océans panafricains existaient à ce moment-là. Les blocs continentaux qui constituent le Gondwana provien-



1. STRUCTURES GRAVIMÉTRIQUE ET MAGNÉTIQUE de la suture entre les plaques lithosphériques du craton ouest-africain et de la chaîne panafricaine des Dahomeyides. Dans l'interprétation du profil gravimétrique, les densités choisies, respectivement pour le manteau, la croûte continentale et les sédiments, sont de 3,1, 2,7 et 2,7. L'anomalie positive de la plaque orientale traduit un excès de masse imputable à la remontée du manteau dense, l'anomalie négative de la plaque occidentale signale un déficit de masse induit par le bassin sédimentaire des Voltas et la croûte continentale épaisse (et peu dense). L'anomalie magnétique positive est associée aux intrusions de roches basiques et ultrabasiques, riches en magnétite, mises en place au dos de la suture.

ment de la fragmentation, probablement entre 1 000 et 800 millions d'années, d'un supercontinent plus ancien dénommé Rodinia. Rodinia dérive de l'infinitif russe *roditi* qui signifie croître, engendrer. Le Rodinia est le père de nos continents actuels. Sur les marges des blocs issus de sa fragmentation vont apparaître, à la fin du Protérozoïque, les plus anciennes faunes du globe, en particulier la fameuse faune d'Ediacara. Les travaux récents, notamment ceux du Canadien Paul Hoffman, ont permis de proposer des scénarios conduisant de Rodinia à Gondwana.

Le Rodinia, qui s'est assemblé autour de 1 200-1 000 millions d'années, se fragmente en trois masses principales. Celles-ci, après une dérive de plusieurs centaines de millions d'années, se réunissent pour former, au Sud, le Gondwana et, au Nord, le Laurasia (Amérique du Nord, Europe du Nord-Est et Asie). Le méga-continent Laurasia prend forme tardivement, au Paléozoïque supérieur, par aggrégation à Laurentia et Baltica des fragments asiatiques et de la Sibérie. Ce que nous venons de décrire illustre le cycle des supercontinents, dont la durée est de l'ordre de 450 millions d'années : 40 millions d'années pour la fragmentation, 160 millions d'années pour l'expansion

océanique, autant pour la fermeture océanique, qui voit la disparition ou subduction de la croûte océanique, et environ 80 millions d'années représentant la durée des collisions augmentée de celle de la survie du supercontinent.

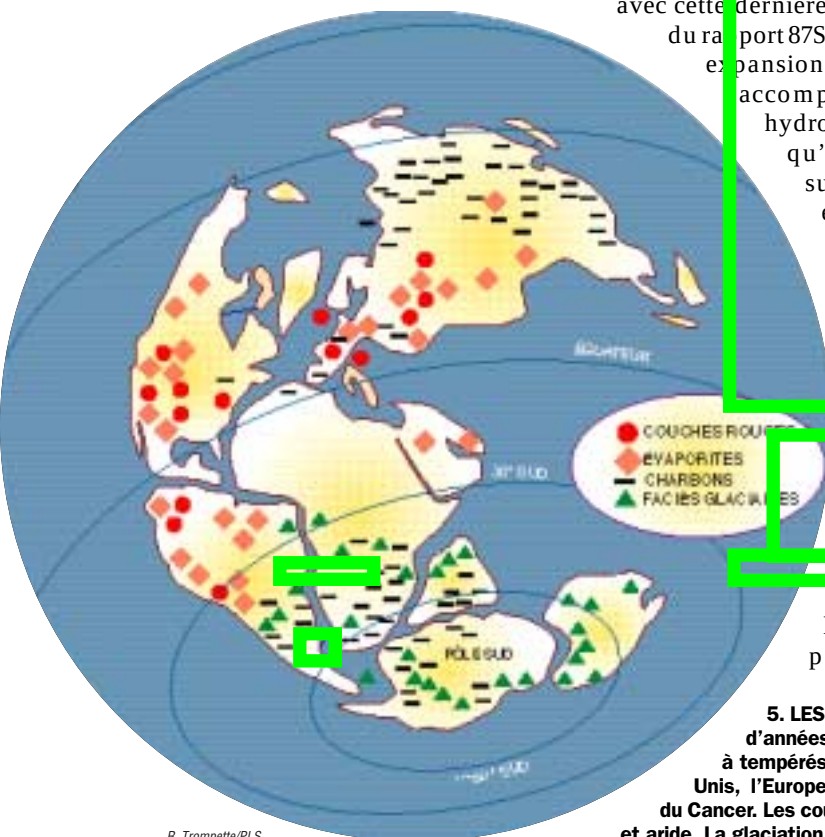
L'histoire de la fragmentation du Rodinia à partir de 1 000 millions d'années et de l'aggrégation du Gondwana autour de 600 millions d'années est lisible sur la courbe d'évolution du rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ des carbonates marins (Sr désigne le Strontium). Quelle est la signification géologique de ce rapport ? Sur les marges actives, la fusion partielle des péridotites du manteau des plaques lithosphériques plongeantes engendre des magmas qui, par cristallisation fractionnée, donnent naissance à la croûte continentale, dont la composition est voisine de celle des granites. Fusion partielle et cristallisation fractionnée concentrent dans la croûte continentale les alcalins et donc 87Rb (Rb désigne le Rubidium) ; 87Sr , issu de la désintégration de 87Rb , y est aussi concentré et le rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ y est élevé, voisin de 0,720. En revanche, il est faible et aujourd'hui voisin de 0,704 dans les basaltes de la croûte océanique pauvre en 87Rb .

Dans le cas de mer ou dans les carbonates marins, en équilibre isotopique avec cette dernière, une faible valeur du rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indique une expansion océanique rapide accompagnée d'un fort hydrothermalisme, alors qu'une forte valeur suggère une intense érosion des continents. Ce rapport, mesuré dans les carbonates déposés durant le cycle panafricain (entre 900 et 800 millions d'années) atteint 0,706, sa valeur la plus basse de l'histoire de la Terre, ce qui souligne l'intensité de l'expansion océanique

panafricaine. Sa brutale remontée, autour de 600 millions d'années, jusqu'à 0,709 l'une des valeurs les plus élevées de l'histoire du Globe, marque l'érosion des volumineux reliefs des chaînes panafricaines engendrées lors de l'aggrégation du Gondwana. Nous examinerons maintenant ce que nous enseignent les divers types de roches déposés sur le Gondwana.

Glaciation du Permio-Carbonifère

Vers 1870, une quarantaine d'années après la mise en évidence, dans le Jura, de la glaciation plio-quaternaire européenne par le Suisse Louis Agassiz, la glaciation permio-carbonifère de Dwyka (nom d'une rivière) était découverte en Afrique du Sud. L'identification des dépôts glaciaires, récents ou anciens, est délicate. Des figures d'abrasion telles que des surfaces planes et lisses comme des miroirs, des stries et cannelures, des indices d'arrachement de matière, des formes en dos de baleine – on dit moutonnées – par comparaison avec les perruques en laines de graisse de mouton qui étaient utilisées à la cour des rois de France – sont attribuées à une érosion par la glace. Quant aux faciès continentaux grossiers déposés par les glaces – on parle de moraines ou de tills pour les glaces actuels et de tillites dans les formations anciennes –, ils sont également difficiles à caractériser. Une tillite est composée de blocs de taille variable qui flottent dans une matrice fine, constituée de grains très fins de minéraux et de roches. Ces tillites ressemblent à des conglomérats particuliers, où les blocs ne seraient pas contigus. Pour déposer les blocs, il faut que des forces importantes soient mises en œuvre, mais alors, sous l'effet de ces forces, les particules fines sont balayées ! À l'inverse, un milieu peu énergétique, compatible avec le dépôt de la matrice, est incapable de transporter les blocs ! En domaine continental, les tillites résultent du transport de matériaux grossiers à la base, au sein du glacier ou sur son toit. Toutefois, des courants boueux de forte densité, comme ceux qui descendent les pentes continentales conduisent aux grands fonds



5. LES CLIMATS DANS LE GONDWANA. Au Permien, il y a environ 300 millions d'années, la majorité des charbons du Gondwana témoignent de climats froids à tempérés et humides. Toutefois, les charbons, dans ce qui sera l'Est des États-Unis, l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord, se déposent entre l'équateur et le tropique du Cancer. Les couches rouges et les évaporites colonisent la zone intertropicale chaude et aride. La glaciation est cantonnée dans l'hémisphère Sud.

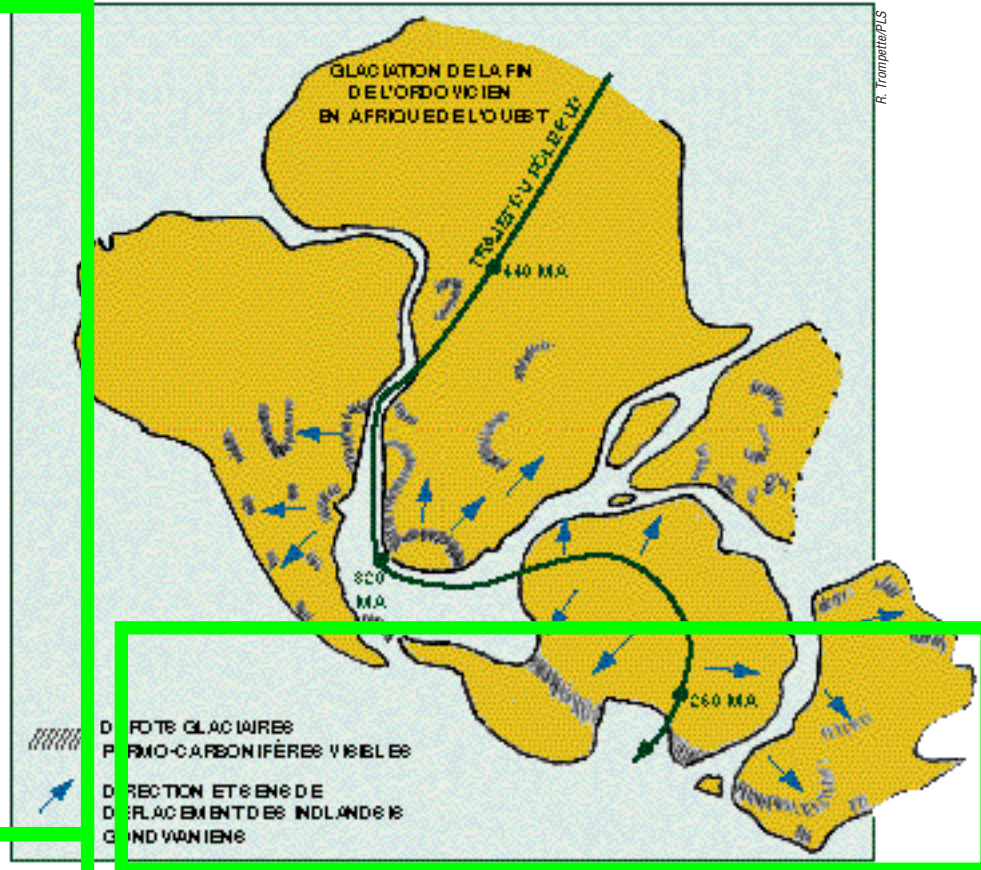
océaniques, ou la liquéfaction de masses rocheuses engendrent des faciès similaires aux tillites. D'où les difficultés et les polémiques soulevées par l'identification de celles-ci. Sur les continents, cannelures, stries, figures d'arrachement et moutonnements permettent de reconstituer direction et sens de cheminement des glaces.

Les faciès glaciaires permo-carbonifères sont représentés sur les cinq continents gondwaniens. Ils sont vieux de 330 à 250 millions d'années, la plupart d'entre eux étant d'âge carbonifère supérieur à permien inférieur (320-255 millions d'années). À l'exception de ceux de l'Antarctique, ils sont actuellement localisés à de basses latitudes, le plus souvent en zone intertropicale. Cela posait problème aux géologues qui, au début du siècle, défendaient l'idée de la fixité des continents. Si, en suivant le géologue Nord-américain John Crowell, nous les reportons sur une reconstitution du Gondwana de l'époque, nous constatons que la plupart de ces sédiments glaciaires se sont déposés à de hautes latitudes (40-90°). Au cours du temps, ils ont accompagné le déplacement du pôle Sud qui longe les côtes de Namibie, puis celles d'Afrique du Sud, infléchit sa trajectoire vers l'Est pour entrer en Antarctique non loin de la mer de Weddell et en ressortir, au Permien supérieur (255-245 millions d'années), à proximité de la mer de Ross.

Aussi les errements du pôle Sud, expliquent-ils la distribution des dépôts glaciaires : carbonifères (360-290 millions d'années), voire dévoniens (410-360 millions d'années), en Amérique du Sud et sur le flanc Ouest du Sud de l'Afrique, plutôt permien en Australie et en Antarctique. Cela explique également l'étalement dans le temps (180 millions d'années) de la glaciation permo-carbonifère, alors que celle-ci n'a, en aucun lieu, duré aussi longtemps.

Charbon du Gondwana

Le charbon est essentiellement d'âge permien (290-245 millions d'années), débordant sur le Carbonifère et le Trias (245-210 millions d'années). Il se développe dès le Carbonifère en Amérique du Sud, là où la glaciation s'achève précocement. Ce charbon n'est pas propre au Gondwana, il existe sur toute la Pangée et dans l'hémisphère Nord, il est généralement plus ancien et d'âge carbonifère



6. GLACIATION DU PERMO-CARBONIFÈRE. Entre 500 et 250 millions d'années, le pôle Sud, dont le trajet est retracé (en vert) à l'aide de données paléomagnétiques, traverse le Gondwana du Nord au Sud. Autour de 440 millions d'années (Ordovicien supérieur), il se situe au milieu du Sahara induisant une glaciation en Afrique de l'Ouest. Entre 360 et 250 millions d'années (Carbonifère et Permien), il longe les côtes occidentales de l'Afrique du Sud et traverse l'Antarctique. La glaciation engendrée est la plus importante que la Terre ait connue. Elle se prolonge en suivant fidèlement le déplacement du pôle. Par commodité graphique, les géologues représentent les déplacements du pôle. En réalité celui-ci est quasi fixe, et ce sont les continents qui sont mobiles et viennent traverser la zone polaire. Les dépôts glaciaires sont plus étendus que ceux figurés ; ils sont en partie masqués par les couvertures plus récentes.

supérieur : ce sont les terrains du Houiller du Nord de la France. Le taux d'accumulation du carbone organique est, durant la période carbonifère supérieur-permienne (320-245 millions d'années), le plus important de l'histoire de la Terre, près de 10^{19} moles de carbone par million d'années, soit le double de la moyenne. Les sous-bois des forêts sont colonisés par des fougères – dont *Glossopteris* et *Gangamopteris* – qui, bien qu'apparus au Silurien (440-410 millions d'années), prolifèrent au Permo-Carbonifère.

Durant l'intervalle Carbonifère supérieur-Trias inférieur, les végétaux se développent dans des zones marécageuses, mal drainées, périodiquement envahies par la mer, qui frangent la Pangée, mais aussi dans des bassins endoréiques intérieurs. Au Permien, les charbons s'accumulent majoritairement aux hautes latitudes sous des climats

froids, tempérés et humides ; cela est net dans le Gondwana. Dans l'hémisphère Nord (Europe et partie orientale des États-Unis), les charbons se déposent à basses latitudes, entre l'équateur et le tropique du Cancer, sous des climats chauds et plus ou moins humides, fréquemment dans des bassins fermés installés au pied des reliefs jeunes des montagnes hercyniennes. Pour constituer de grosses accumulations de charbon, il faut non seulement produire beaucoup de carbone organique, mais aussi qu'il soit enfoui rapidement, avant d'être oxydé.

Les charbons du Gondwana sont scellés, soit par les dépôts de transgressions marines engendrées par des fluctuations du volume des inlandsis (masses glaciaires continentales), soit par des apports fluviaux périodiques provenant de la destruction de reliefs avoisinants.

Climat chaud et aride du Permo-Trias

Durant cette période qui s'étend de 290 à 210 millions d'années, le Gondwana est intégré au supercontinent de la Pangée, qui regroupe l'ensemble des continents et qui est entouré par un océan unique dénommé Panthalassa. La croûte continentale conduisant mal la chaleur géothermique, celle-ci s'accumule à sa base. La Pangée est soulevée, les zones côtières y sont étroites, les mers intérieures sont rares. Cette massivité engendre un climat aride, sauf dans les zones côtières baignées par l'océan périphérique. À côté des charbons, qui persistent jusqu'au Permien inférieur, les roches caractéristiques du Permo-Trias sont des grès éoliens qui conservent parfois des structures d'anciennes dunes, des grès ou argilites rouges et des évaporites.

Les surfaces occupées par les évaporites du Permo-Trias sont les plus importantes de toute l'histoire de la terre. Les évaporites se déposent lorsque le taux d'évaporation est supérieur à la hauteur des précipitations, conditions que l'on rencontre dans les déserts chauds, mais aussi dans certains déserts froids, ces derniers étant toutefois rares. Ce sont des roches exceptionnelles. Elles ne nécessitent aucun apport détritique extérieur, ne font appel à aucune intervention biologique ; en général, elles précipitent directement à partir de l'eau de mer. Il faut évaporer 80 pour cent de l'eau de mer pour précipiter du gypse (sulfate de calcium), 90 pour cent pour l'halite (chlorure de sodium), qui est de loin le sel marin le plus abondant, et quasi 100 pour cent pour les sels de magnésium et de potassium. Dans certains bassins sédimentaires, les évaporites du Permo-Trias, avec de minces intercalations d'argilites noires, atteignent 1 500 mètres d'épaisseur. Pour précipiter une telle épaisseur d'évaporites, il faudrait imaginer des bassins profonds de 1 500 kilomètres entièrement remplis d'une eau contenant 35 grammes de sel au litre. Cela est bien sûr impossible. Il faut faire intervenir une recharge en eau salée assurée par des entrées marines périodiques.

Les grès et argilites rouges sont des faciès continentaux colorés par de très petites quantités (0,1 pour cent) d'oxyde de fer ferrique (Fe^{+++}). Ce fer provient de l'altération de minéraux comme des amphiboles et des pyroxènes ferrifères ou de la biotite. Les

couches rouges se forment en abondance dans des climats tropicaux à saison contrastée et dans les zones semi-désertique à désertique où les oxydes de fer sont libérés. Dans le Permo-Trias, l'association couches rouges grès éoliens-évaporites est caractéristique d'un climat chaud et semi-aride. L'abondance des évaporites atteste de précipitations, réduites mais non nulles.

À la limite Permien et Trias se situe l'une des crises biologiques les plus dramatiques de l'histoire du Globe : 75 à 80 pour cent des espèces vont disparaître. En mer, trilobites, tetracoraliaires, graptolites, entre autres, disparaissent à jamais, alors que les brachiopodes, les bryozoaires et les crinoïdes sont décimés.

Extrême stabilité du Gondwana

La séquence type du Gondwana que nous venons d'examiner est, pour le géologue européen, surprenante. Elle dure longtemps, environ 200 millions d'années (360-150 millions d'années), est essentiellement continentale et peut être identifiée sur cinq continents, où elle couvre de vastes surfaces. Elle traduit une remarquable stabilité du Gondwana. On est loin de la stratigraphie européenne complexe et rythmée par les incessants va et vient de la mer et par les échecs des déformations successives qui conduisent à la surrection de la chaîne Hercynienne.

Le méga-continent du Gondwana est né il y a de 600 millions d'années, alors que la séquence sédimentaire gondwanienne qui le caractérise s'est déposée entre 360 et 150 millions d'années. Que se passe-t-il durant la période 600-360 millions d'années ? De vastes bassins cratoniques stables se forment. Les caractères de la sédimentation y dépendent d'une compétition entre la lente montée du méga-continent et les variations du niveau marin. Les hauts niveaux marins déposent des séquences marines peu profondes. Lors des bas niveaux s'accumulent des séquences continentales. La vitesse de sédimentation reste faible (un peu plus de dix mètres par million d'années pour le Paléozoïque inférieur du bassin africain de Taoudeni), traduisant un relief arasé, une subsidence réduite. La longévité du Gondwana contredit quelque peu la notion de cycle des supercontinents, qui prédit qu'une

masse continentale étendue ne peut survivre plus de 100 millions d'années, l'accumulation de chaleur à sa base aboutissant à l'ouverture de rifts précurseurs des océans. Le Gondwana traverse, quasi intouché, 400 millions d'années. Il constitue un méga-continent surélevé où les sédimments continuent à s'accumuler. En position polaire durant le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur, il va être le cadre idéal pour le développement de la plus grande glaciation continentale que le Globe ait connue.

Localisation des coupures ?

La localisation des zones précises des coupures, lors de la fragmentation du Gondwana à partir de 170 millions d'années, reste énigmatique. Les zones d'ouverture océanique recoupent indifféremment les chaînes panafricaines et les cratons précambriens, sauf dans le cas de l'Atlantique Sud, dont l'ouverture est guidée par la collision d'un chapelet de chaînes panafricaines. Dans la dispersion du Gondwana, l'héritage tectonique semble peu important : l'orientation des dorsales des océans actuels paraît souvent indépendante des structures montagneuses panafricaines.

Roland TROMPETTE est chercheur CNRS au CEREGE (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement), Université d'Aix-Marseille III, Europôle méditerranéen de l'Aubert, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04.

A. BLEICK, J. FERRIÈRE et M. WATERLOT, *Une mise au point sur la géologie des continents issus du Gondwana*, in *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 3, 2^e série., pp. 41-63, 1994.

J.C. CROWELL, *Gondwana Glaciation, Cycloclimes, Continental Positioning and Climate Change*, in *American Jour. Sci.*, 278, pp. 1315-1372, 1978.

R. TROMPETTE, *Geology of Western Gondwana (2 000-500 Ma)*, Balkema, 350 pages, 1991.

R. UNRUG, *Geodynamic Map of Gondwana Supercontinent Assembly*, Publ. Council for Geoscience, Pretoria, South Africa and Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 1996.

M. de WIT, M. JEFFERY, H. BERGH et L. NICOLAYSEN, *Geological Map of Sectors of Gondwana Reconstructed to their Position ~150 Ma*, Publ. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, USA, 1988.

La pollution spatiale

NICHOLAS JOHNSON

Les nombreux objets mis en orbite autour de la Terre, en même temps que des satellites, menacent aujourd'hui la sécurité des missions spatiales.

En juillet 1996, le mâât du satellite militaire français *Cerise* a été percuté à près de 54 000 kilomètres-heure par un fragment d'une fusée européenne qui avait explosé dix ans plus tôt. Les contrôleurs du satellite ont heureusement réussi à le conserver en état de marche. C'était la première collision accidentelle connue entre deux gros objets envoyés par l'homme en orbite autour de la Terre.

En février 1997, lors de la deuxième mission de maintenance du *Télescope spatial Hubble*, la navette *Discovery* a manœuvré pour éviter un fragment de fusée dont la trajectoire s'approchait à moins de 1,5 kilomètre. Les astronautes ont aussi remarqué des perforations sur l'équipement de *Hubble* et un trou dans l'une de ses antennes, qui aurait été percé lors d'une collision avec un débris spatial avant 1993.

Depuis 40 ans, plus de 20 000 tonnes de matériaux ont été mis en orbite autour de la Terre. Il en reste aujourd'hui 4 500, réparties surtout entre près de 10 000 objets détectables par les radars et par les télescopes militaires ; seulement cinq pour cent de cette masse correspondent aux satellites opérationnels. Des millions de débris plus petits circulent aussi entre quelques centaines de kilomètres et plus de 10 000 kilomètres d'altitude.

S'ils se déplaçaient en ordre, comme les cailloux et les glaçons qui tournent à peu près tous à la même vitesse dans les anneaux de Jupiter et de Saturne, ces satellites artificiels de la Terre formeraient un bel ensemble, mais ils semblent plutôt se mouvoir dans des directions aléatoires, telles des abeilles dont on aurait dérangé la ruche. Leur densité est en fait assez faible selon les normes terrestres, mais leurs mouvements désordonnés conduisent à des vitesses relatives qui peuvent atteindre 60 000 kilomètres-heure. À ces vitesses, un satellite serait détruit par une collision avec un caillou de un centimètre

de diamètre, et même un grain de un millimètre l'endommagerait gravement.

Les débris en orbite sont variés : satellites hors d'usage, étages de fusées abandonnés, déchets de lancements, morceaux de satellites disloqués, rejets de fusées, combustible solide, matériaux de surface arrachés et, même, gouttelettes issues de réacteurs nucléaires. Des objets ont aussi été délibérément lâchés dans l'espace : en mai 1963, une expérience de télécommunications du ministère américain de la Défense consistait à larguer 80 paquets d'épingles ; la pression de radiation exercée par la lumière solaire devait tater les 400 millions de minuscules épingles, mais une défaillance du système de déploiement eut pour résultat de les regrouper sur des orbites jusqu'à 6 000 kilomètres d'altitude.

Pendant les 25 premières années de l'ère spatiale, les responsables du lancement des satellites se sont peu occupés de ces débris. Aujourd'hui, les incidents se multiplient. Ainsi, la navette spatiale manœuvre de temps en temps, nous l'avons vu, pour esquiver de gros débris. En moyenne, une fenêtre sur huit doit être remplacée après chaque mission en raison des impacts de poussières. Les ingénieurs qui programment les missions tiennent désormais compte des risques d'impacts : comme les débris frappent plutôt dans le plan de l'orbite de la navette, de 30 à 45 degrés à gauche et à droite de la direction du mouvement, les surfaces les plus sensibles de la navette sont placées dans d'autres directions chaque fois que les opérations à réaliser le permettent.

Tous les engins spatiaux sont aussi à la merci d'objets de un à dix centimètres de large, assez grands pour en perforer les parois, mais indétectables pour les systèmes terrestres de surveillance, car trop petits. Le risque qu'un satellite soit ainsi percuté pendant sa durée de fonctionnement est encore

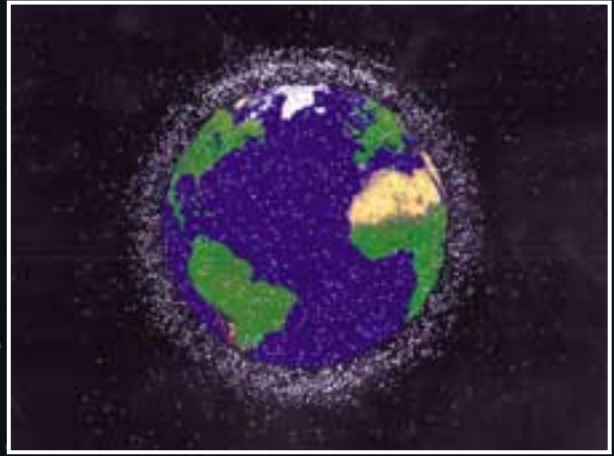
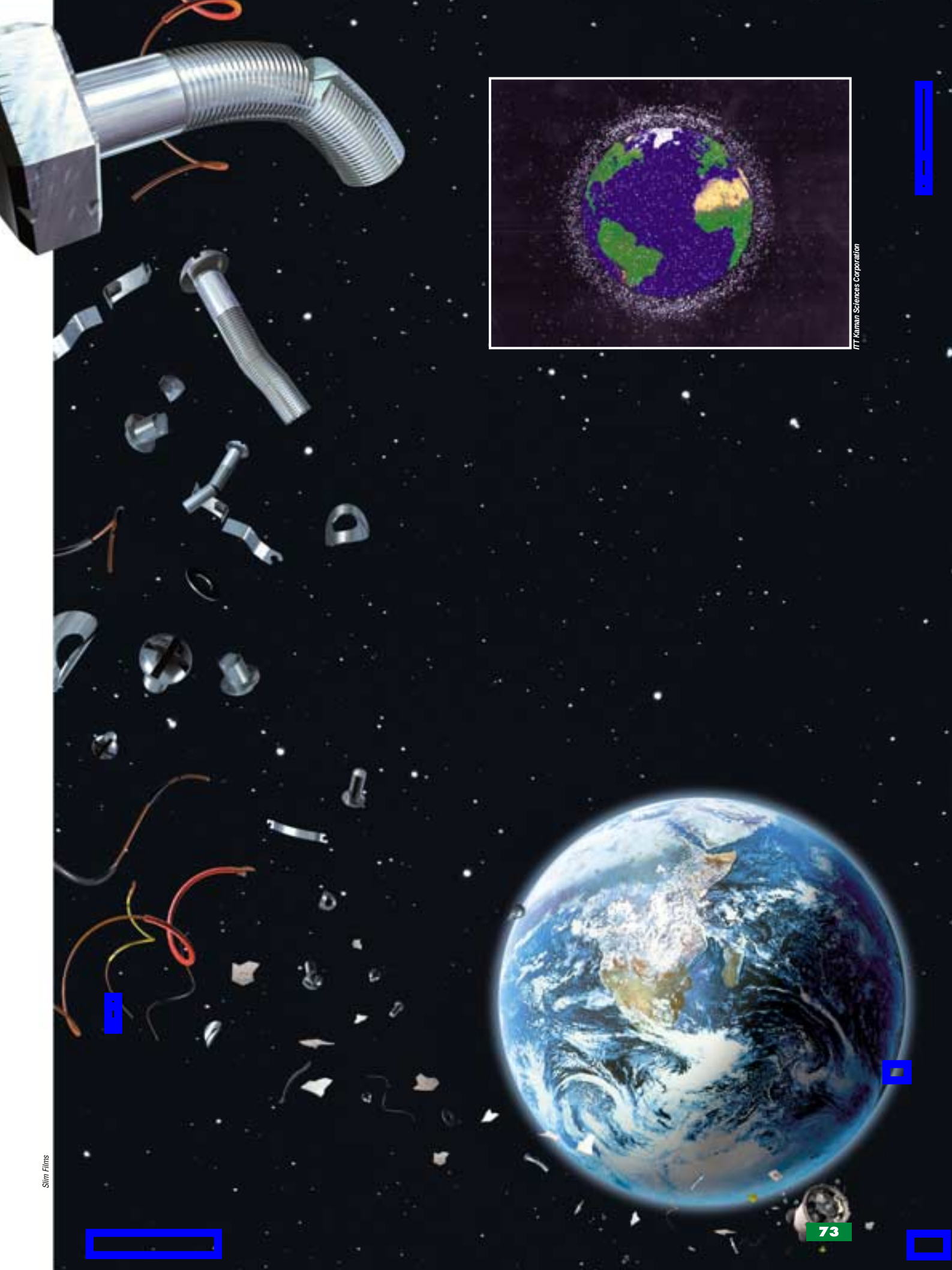
faible, mais il augmente inexorablement. La collision de *Cerise* a créé très peu de débris supplémentaires, mais une collision de ce type pourrait produire des milliers de fragments assez grands pour pulvériser d'autres satellites qui produiraient leur tour des fragments, et ainsi de suite. Ce type de réaction en chaîne pourrait devenir la principale source de débris en orbite terrestre.

Des débris variés

Les débris spatiaux les plus gros sont d'anciens satellites : sur les 4 800 satellites placés en orbite, environ 2 400 y sont encore. Les autres sont retombés dans l'atmosphère terrestre, car celle-ci est assez dense jusqu'à 1 500 kilomètres d'altitude pour ralentir les objets en orbite en perdant de l'énergie, ceux-ci retombent vers la Terre selon une spirale dérivée de plus en plus vite (le frottement augmente avec la vitesse et avec la densité de l'atmosphère). Sur ces 2 400 satellites restants, 75 pour cent ont terminé leur mission et ont été abandonnés. La plupart pèsent entre un kilogramme et 20 tonnes.

Ensuite, la mise sur orbite d'un satellite est accompagnée de celle de un ou de plusieurs étages de propulsion vides : au début de 1998, environ 1 500 de ces objets inutilisés tournaient au-dessus de nos têtes. Ainsi, le lancement du satellite météorologique japonais *Himawari 3*, en 1984, a mis en orbite trois étages de fusée : un en orbite basse, entre 170 et 535 kilomètres d'altitude ; un près de la destination du satellite, l'orbite géosynchrone circulaire, à 35 785 kilomètres ; et un sur une orbite intermédiaire très

1. DES ÉCROUS, DES BOULONS, DES COLLIERES ET DES BOUTS DE FILS sont aujourd'hui sur les mêmes orbites que les satellites. Des radars et des télescopes militaires surveillent les objets les plus gros (dans le cartouche de droite, les points blancs qui représentent ces objets ne sont pas à l'échelle).



NTT Kanam Sciences Corporation

elliptique entre 175 et 36 720 kilomètres. Deux de ces morceaux de fusée sont heureusement retombés sur la Terre depuis, en 1984 et en 1994, se consumant dans l'atmosphère.

En plus des satellites et des étages de fusées, des petites pièces ont régulièrement été éjectées dans l'espace : boulons explosifs, colliers de serrage et ressorts libérés lors de la séparation des satellites et de leurs lanceurs, couvercles de capteurs ou dispositifs de contrôle d'attitude largués après l'arrivée sur l'orbite. Une série de missions spatiales russes ont ainsi rejeté chacune plus de 60 objets sur diverses orbites.

Les vols habités produisent aussi des débris. En 1965, au cours de la première sortie dans l'espace d'un Américain, l'astronaute de *Mercury 4* Edward White a perdu un gant qui a continué sa route à 200 kilomètres-heure. Plus de 200 objets, des plaques de peinture, des sacs de nourriture, ont ainsi été

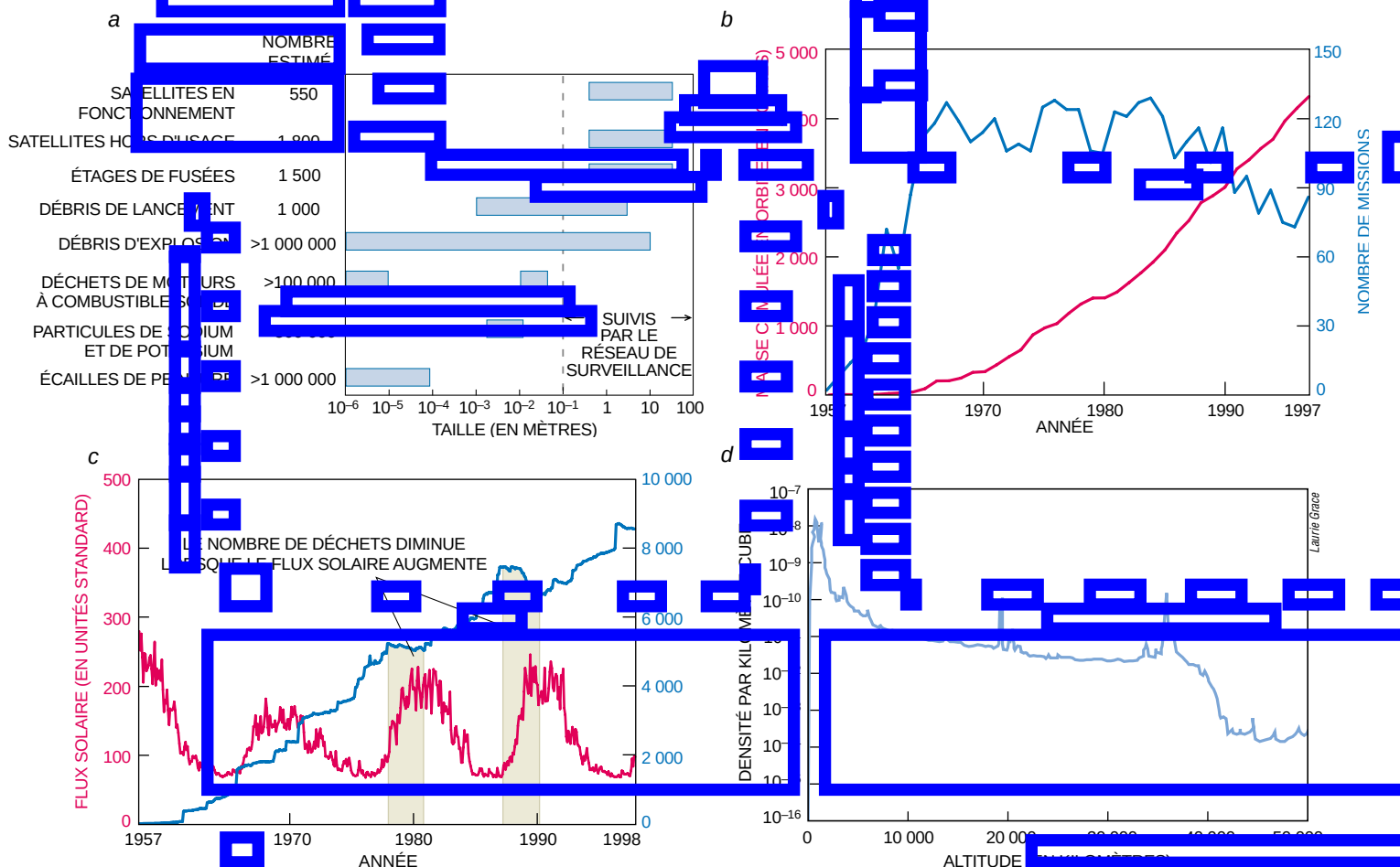
largués par la station *Mir* pendant ses dix premières années en orbite.

Des satellites disloqués

La principale source de débris plus petits est, de loin, la dislocation de satellites et de fusées. Depuis 1961, plus de 150 satellites ont explosé ou se sont disloqués, accidentellement ou délibérément. Toutes les épaves de fusées peuvent exploser : les résidus de carburant qu'elles contiennent peuvent s'enflammer lors d'une surpression ou d'un allumage intempestif, jusqu'à plus de 20 ans après le lancement. Ainsi, l'étage supérieur d'une fusée *Pégase* lancée en 1994 a explosé le 3 juin 1996, engendrant le plus grand nuage de débris recensés : plus de 700 objets d'au moins dix centimètres de diamètre, qui tournent aujourd'hui entre 250 et 2 500 kilomètres d'altitude (voir la figure 3). Cette explosion a doublé le risque de collision

du télescope spatial *Hubble*, qui gravite à peine 25 kilomètres plus bas.

En 1989, le Laboratoire de propulsion spatiale (JPL) de la NASA a détecté au radar un grand nuage de gouttelettes de sodium et de potassium, vers 900 kilomètres d'altitude. Ces observations ont été confirmées par l'Institut de technologie du Massachusetts, qui a compté plus de 70 000 sphères de un centimètre de diamètre, contenant du sodium et du potassium. Ces matériaux, utilisés comme fluides réfrigérants dans les réacteurs nucléaires qui équipaient des satellites soviétiques, avaient fui lors de l'éjection du combustible nucléaire à la fin de la vie des satellites. Cette éjection avait été décidée après la chute accidentelle en 1978, dans le Nord du Canada, du satellite *Kosmos 954*, qui contenait 30 kilogrammes d'uranium enrichi : au lieu de tomber en un seul bloc, le combustible devait ainsi être incinéré en entrant dans l'atmosphère.



2. DES OBJETS VARIÉS sont en orbite autour de la Terre. Leur taille varie de un millième de millimètre, pour des écailles de peinture, à 30 mètres, pour la station spatiale *Mir* (a). La fréquence des lancements spatiaux a diminué depuis une dizaine d'années, mais la masse cumulée des matériaux en orbite a continué de croître, parce que les satellites modernes sont plus gros (b). Les systèmes militaires de surveillance ne suivent que les objets de plus de dix centimètres

de diamètre aux orbites basses et de plus de un mètre de diamètre aux orbites élevées. Le nombre de ces objets augmente chaque année, sauf lors des maxima d'activité solaire, responsables de la chute de nombreux débris (c). La densité de ces objets visibles présente trois maxima autour des orbites les plus fréquentées, à 850, 1 000 et 1 500 kilomètres d'altitude, ainsi qu'aux orbites semi-synchrone (20 000 kilomètres) et géosynchrone (36 000 kilomètres) (d).

Aucun satellite nucléaire ne fonctionne plus en orbite depuis 1988, mais les gouttelettes sont toujours là.

Les objets de moins de 0,1 millimètre de diamètre ne sont pas aussi dangereux que les débris plus grands, mais ils sont si nombreux qu'ils endommagent fréquemment des engins spatiaux. Ils sont principalement issus des fusées à combustible solide : les moteurs à combustible solide engendrent une quantité considérable de particules microscopiques d'oxyde d'aluminium (jusqu'à 100 milliards de milliards). Bien que l'on utilise de moins en moins ces moteurs, la quantité totale de déchets engendrés annuellement a augmenté : les engins spatiaux modernes, plus lourds, nécessitent des moteurs plus puissants qui rejettent plus de particules.

Enfin, les matériaux des engins spatiaux se dégradent naturellement : le voisinage de la Terre est maintenant envahi de millions de minuscules écailles de peinture, et des traînées de flocons minuscules accompagnent la plupart des satellites et des débris de fusées. Des éléments plus gros sont parfois observables, tels des fragments de boucliers thermiques et des composants à base de carbone. Par exemple, le satellite *COBE* de la NASA a inexplorablement rejeté au moins 80 objets.

Entrevu dans les années 1960 et 1970, le risque associé à la croissance du nombre d'objets en orbite avait initialement été négligé. Ainsi, dès 1966, la NASA avait évalué les risques de collision orbitale pour les vols habités, mais ces calculs ne prenaient en compte que les objets assez gros. La question n'a été abordée dans son ensemble qu'au début des années 1980.

Plus de 100 000 objets de un à dix centimètres graviteraient autour de la Terre, en compagnie de dizaines de millions de particules de un millimètre à un centimètre. Ces objets artificiels sont plus nombreux que les météorites de même taille. Dans la gamme de taille comprise entre 0,01 et un millimètre, les nombres de météorites et de débris de satellites sont égaux. Aux tailles inférieures, les débris artificiels redeviennent plus nombreux.

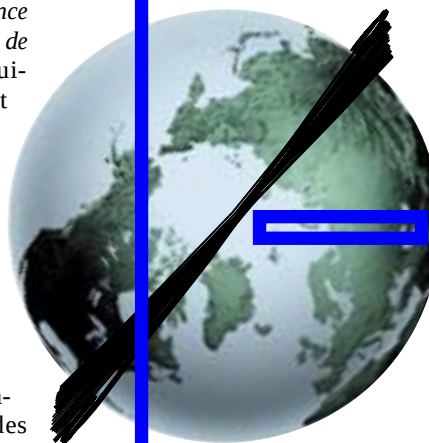
satellites espions construits pendant la guerre froide : le *Réseau de surveillance spatiale* des États-Unis et le *Système de surveillance spatiale* de l'ex-URSS, équipés de détecteurs radar, optiques et opto-électroniques, réalisent 150 000 observations quotidiennes, en moyenne, de 10 000 objets spatiaux officiellement répertoriés.

La densité de ces débris varie avec l'altitude : elle est maximale autour de 350, 1 000 et 1 500 kilomètres avec, en moyenne, un objet par 100 millions de kilomètres cubes. Au-dessus de 1 500 kilomètres, la densité décroît avec l'altitude, sauf près des altitudes semi-synchrone (20 000 kilomètres) et géosynchrone, où elle est localement supérieure. Les débris s'accroissent à ces altitudes, car elles sont les plus fréquentées par les satellites : le danger est d'autant plus grand pour les engins en fonctionnement.

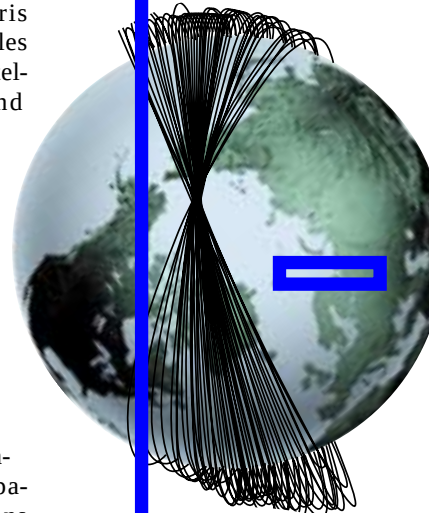
Depuis 20 ans, le nombre d'objets suivis en orbite terrestre a augmenté en moyenne de 175 par an, soit une croissance totale de 70 pour cent. Plus du quart de cette augmentation résulte de la dislocation de satellites, et le reste de nouveauxancements : depuis 1957, 120 satellites ont été lancés chaque année en moyenne, avec un maximum de 129 en 1984. La disparition de l'URSS a réduit l'activité spatiale : la Russie n'a lancé que 28 missions spatiales en 1997, contre 95 en 1987 pour l'URSS. Toutefois, cette diminution concerne surtout les orbites basses, et elle a eue peu de répercussions sur le nombre de débris à long terme. En 1996, 73 lancements seulement ont été effectués, le plus petit nombre depuis 1963, mais 86 en 1997 dont dix rien que pour la constitution d'ensembles de satellites d'observation.

Jusqu'en 1984, les objets de moins de dix centimètres de diamètre sont restés invisibles : ils sont indétectables au télescope, car ils brillent trop peu, et ils échappent aussi aux radars militaires de surveillance, car ils sont plus petits que les longueurs d'onde

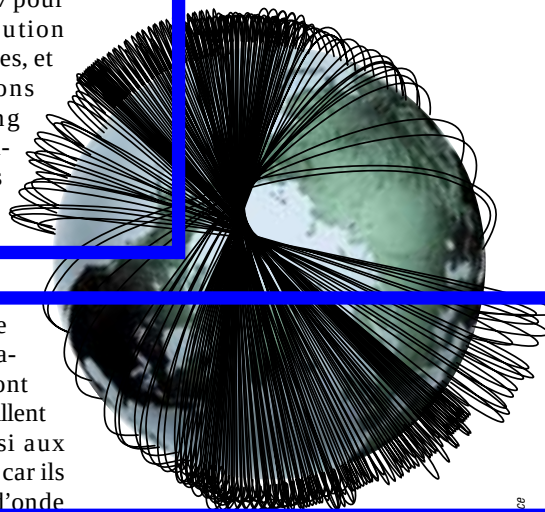
JUIN 1996



SEPTEMBRE 1996



MARS 1997

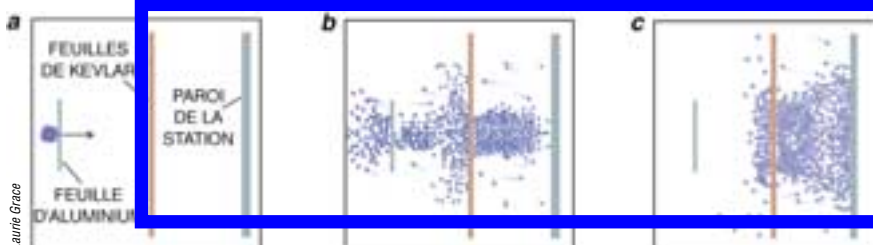


Laure G.

Les débris spatiaux

Les plus grands débris spatiaux (de plus de dix centimètres à basse altitude et de plus de un mètre à l'altitude géosynchrone) sont observables grâce aux systèmes de détection de missiles et de

LES ORBITES DES DÉBRIS se dispersent rapidement après la dislocation d'un satellite. Trois semaines après l'explosion d'une fusée *Pégase*, en juin 1996, les débris étaient concentrés dans une bande étroite (*en haut*). Après trois mois, la légère asymétrie du champ gravitationnel de la Terre avait déjà commencé à séparer les orbites (*au centre*). Après neuf mois, les orbites se répartissaient tout autour de la Terre (*en bas*). Simultanément, les objets se sont dispersés sur chaque orbite. Les spécialistes des débris doivent prendre en compte ce processus quand ils évaluent les risques pour un engin spatial tel que la navette : tant que les débris sont groupés, il suffit de suivre leur position ; lorsqu'ils sont dispersés, le risque d'impact dans différentes directions doit être évalué statistiquement.



Laurie Grace

4. DES BOCLIERS protégeront les éléments principaux de la *Station spatiale internationale* contre la plupart des objets trop petits pour être suivis, mais assez grands pour perforent les parois de la station. Quand le projectile s'approche, il rencontrera d'abord une feuille d'aluminium de deux millimètres d'épaisseur, qui le fera éclater (a). Les fragments seront ralentis par une ou plusieurs couches de Kevlar (b), puis rebondiront sur la paroi de la station (c). Des essais (photographies en haut) où l'on envoie une sphère d'aluminium de 0,95 centimètre de diamètre sur un bouclier à 25 000 kilomètres-heure montrent que quatre feuilles de céramique (à gauche) protègent mieux qu'une seule feuille d'aluminium (à droite).

utilisées. Aujourd'hui, les objets d'au moins deux millimètres sont dénombrés pendant des centaines d'heures chaque année, avec des radars scientifiques en mode bistatique : une antenne envoie des signaux dont les échos sont recueillis par une autre antenne, très grande et très sensible. Le calibrage de ces capteurs a été réalisé avec des cibles spéciales en forme de sphères et d'épingles déployées en 1994 et en 1995 à partir de la navette spatiale. Puis ces observations ont révélé la présence de 300 000 objets de plus de quatre millimètres.

Les objets plus petits sont étudiés par l'inspection des surfaces érodées et perforées. Les engins spatiaux rapportés sur Terre dans la soute de la navette. L'*Installation pour les expositions de longue durée* (LDEF) de la NASA a ainsi été percutée par des dizaines de milliers de débris artificiels et de météorites, entre 1984 et 1990. D'autres cibles

intéressantes ont été le *Transporteur européen récupérable* (EuReCa), l'*Élément de vol spatial* (SFU) japonais, des éléments du *Télescope spatial Hubble* et de la *Mission maximum solaire* (SolarMax), ainsi que, naturellement, la navette spatiale elle-même. En raison du rayon d'action limité de la navette, toutes ces cibles étaient toutefois à des altitudes inférieures à 620 kilomètres. Pour les altitudes supérieures, les chercheurs doivent faire des modèles théoriques. Comme les petites particules restent peu longtemps aux basses altitudes, le fait qu'il y en ait beaucoup implique que ces orbites sont alimentées par de grands réservoirs à plus haute altitude.

Nettoyage de l'espace

Comment éliminer les déchets spatiaux ? Les satellites situés sur des orbites basses (jusqu'à 1 500 kilomètres d'altitude) peu-

vent être corrigés en fin de vie vers l'atmosphère, où ils se consomment en grande partie, ou être récupérés par la navette spatiale. De toute façon, les objets situés à ces altitudes retombent assez vite sur la Terre. À moins de 600 kilomètres d'altitude, les satellites ne sont maintenus en orbite que par de fréquentes corrections de leur trajectoire à l'aide de leurs moteurs. Ainsi, tous les objets rejetés par les missions habitées, qui restent entre 250 et 1 000 kilomètres d'altitude, tombent rapidement et se consomment dans l'atmosphère : le gant d'E. White n'est resté qu'un mois en orbite.

Pendant les maxima d'activité solaire, tous les 11 ans, l'atmosphère reçoit plus d'énergie et se dilate, ce qui augmente la résistance aérodynamique. Lors du dernier maximum solaire, en 1989 et 1990, trois objets en moyenne sont retombés sur Terre chaque jour (contre seulement un par jour habituellement) : plus de 560 tonnes de matériel ont ainsi été éliminées des orbites basses en un an, parmi lesquelles la station spatiale *Aliot 7*, prédécesseur de *Mir*, retombée au début de 1991. En 1979 et 1980, le précédent maximum d'activité solaire avait provoqué la chute prématurée de la station spatiale américaine *Skylab*.

Cette chute naturelle des débris en orbite n'empêche toutefois pas la croissance de leur nombre. Le frottement atmosphérique est négligeable sur les orbites supérieures. Aussi, les nations spatiales ont-elles, depuis une dizaine d'années, commencé à se concerter : le Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux rassemble aujourd-

d'hui des représentants des États-Unis, de la Russie, de la Chine, du Japon, de l'Inde, de l'Agence spatiale européenne, de la France, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. En 1994, le Sous-Comité scientifique et technique des Nations unies pour les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a finalement inscrit les débris spatiaux à son ordre du jour, avec la volonté d'en achever l'évaluation pour 1999. Ces comités doivent encore décider du type d'actions à entreprendre, de leur mise en œuvre, et trouver un compromis entre les risques et les coûts de ces actions.

En attendant, les agences spatiales tentent de produire moins de débris. En France, le Centre national d'études spatiales a mis en place, depuis 1992, un groupe de travail chargé de mener les études techniques d'évaluation du risque et de déterminer des mesures préventives. De telles mesures sont d'ores et déjà appliquées. Par exemple, après l'injection des satellites en orbite, le dernier étage des fusées Ariane est passivé pour éliminer tout risque d'explosion ultérieure : les réservoirs de carburant sont vidangés et la pression est réduite dans tous les circuits. À l'altitude géosynchrone les dangers de collision sont moindres, mais la place commence à manquer afin d'éviter les collisions éventuelles avec les satellites opérationnels. Les satellites dont la mission se termine sont transférés sur une orbite cimetière située à environ 300 kilomètres au-dessus de l'orbite géostationnaire.

La NASA et la NASDA, l'agence spatiale japonaise, ont utilisé des pièges à boulons et des attaches spéciales : elles vidangent aussi le carburant et éteignent les systèmes électriques des satellites hors service et elles recommandent que les nouveaux satellites et les étages de fusées laissés à basse altitude soient guidés vers l'atmosphère moins de 25 ans après la fin de leur mission.

Après l'explosion de la fusée *Pégase*, en 1996, la Société *Orbital Sciences*,

concepteur et opérateur de cet engin, a redessiné l'étage supérieur avant de reprendre les missions en décembre 1997. Certains des nouveaux réseaux de téléphonie par satellite prévoient de faire retomber dans l'atmosphère des satellites devenus inutiles. En janvier 1998, le gouvernement américain a présenté à l'industrie aéronautique, pour commentaires, un projet de norme de limitation des débris.

Ces procédures, toutefois, ne concernent pas les débris déjà en orbite. La seule protection possible aujourd'hui contre les collisions, en particulier avec les multiples objets de moins d'un centimètre de diamètre, est l'ajout sur les satellites de boucliers qui limitent les conséquences des collisions et réduisent le nombre de débris secondaires. La *Station spatiale internationale* sera équipée de tels boucliers autour des compartiments d'habitation, des conduits de carburant, des gyroscopes de contrôle et d'autres zones vitales (voir la figure 4). Pour les éléments impossibles à protéger, tels les panneaux solaires, les concepteurs d'engins spatiaux doivent tenir compte de leur détérioration progressive sous l'effet de petites collisions.

L'élimination des débris reste un défi technique et économique. Certains ont pensé utiliser la navette spatiale, mais cette opération serait trop complexe et trop dangereuse. La NASA et les ministères américains de la Défense et de l'Énergie ont étudié le projet *Orion*, qui utiliserait les lasers au sol pour vaporiser certains matériaux : ils détourneraient ainsi les débris de leur trajectoire et accéléreraient leur chute. D'autres projets sont à l'étude, telles des balles de mousse géantes : une particule pénétrant la mousse perdrait de l'énergie et retomberait plus tôt sur Terre.

Verrons-nous un jour des robots nettoyeurs autour de la Terre ? Si nous ne réduisons pas rapidement le nombre de débris en orbite, nous manquerons bientôt d'espace... dans l'espace.

Nicholas JOHNSON travaille au Centre spatial Johnson de la NASA, à Houston.

N.L. JOHNSON et D.S. MCKNIGHT, *Artificial Space Debris, Collier, 1994*.
Preservation of Near Earth Space for Future Generations, sous la direction de J.A. Simpson, Cambridge University Press, 1994.

Orbital Debris : A Technological Assess-

ment, Committee on Space Debris, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1995.

Protecting the Space Station from Meteoroids and Orbital Debris, Committee on International Space Station Meteoroid / Orbital Debris Risk Management, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1997.

Fusion nucléaire et striction axiale

GEROLD YONAS

Un dispositif nommé machine à striction axiale déclenchera la fusion nucléaire contrôlée à l'aide de bouffées de rayons X intenses et brèves.

Quand maîtrisera-t-on la fusion nucléaire, en laboratoire ? En 1979, après déjà 30 ans de recherches, l'ignition n'avait été obtenue que dans la bombe à hydrogène ; toutefois j'écrivis dans *Pour la Science* que la fusion pourrait être obtenue en laboratoire en moins de dix ans et que la construction de centrales électriques à fusion suivrait de peu. À l'époque comme aujourd'hui, les physiciens savaient qu'un dé à coudre d'hydrogène lourd liquide engendre, par fusion, autant d'énergie que 20 tonnes de charbon ; d'où la question : comment récupérer cette énergie ?

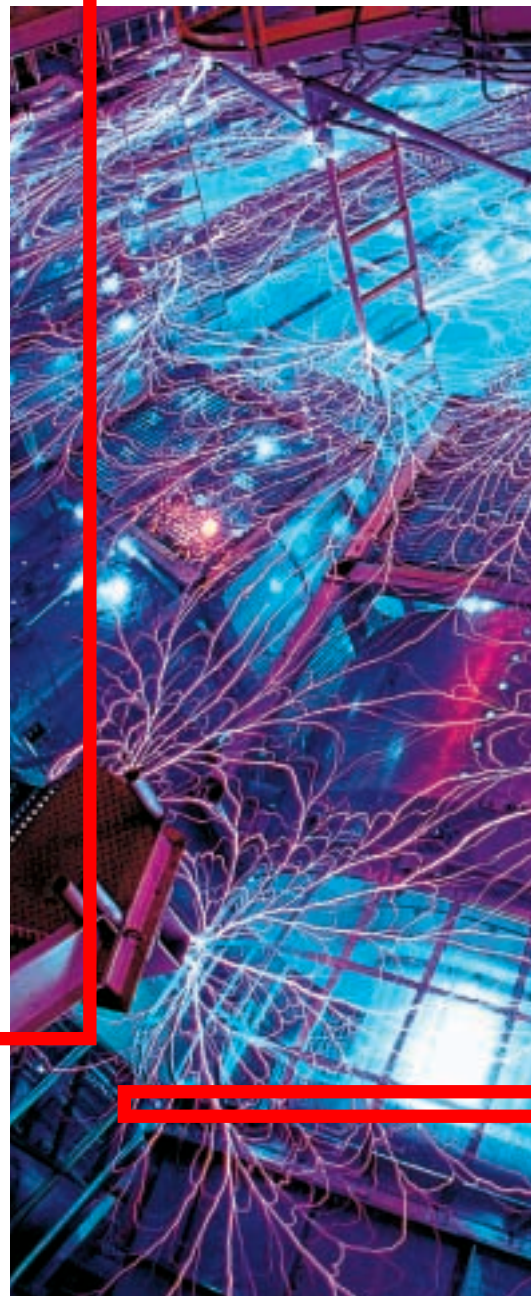
Vingt ans ont passé, les physiciens courent toujours après le Graal de la fusion, et l'ignition, pensent-ils, est encore pour dans dix ans. La crise de l'énergie des années 1970 est oubliée, et les contribuables s'impatientent. Il y a moins de trois ans, j'envisageais même d'interrompre nos recherches sur la fusion, aux Laboratoires *Sandia*, car nous produisons une puissance encore 50 fois inférieure à celle qui déclencherait la fusion. Puis tout a basculé : ma confiance a été rétablie par les succès obtenus dans la production de puissantes impulsions de rayons X à l'aide d'un nouveau dispositif, le générateur Z. Je crois que la fusion thermonucléaire

sera déclenchée en laboratoire dans moins de dix ans.

La bombe à hydrogène (ou bombe H) est la démonstration terrifiante que la fusion thermonucléaire est possible. Dans ce dispositif, le rayonnement issu de l'explosion d'une bombe à fission (une bombe A) agit comme un détendeur, il chauffe et comprime un combustible composé de deutérium et de tritium, des formes d'hydrogène dont les noyaux contiennent respectivement un proton et un neutron, et un proton et deux neutrons (contre un proton seulement pour l'hydrogène). En pratique, la réaction de fusion de ces noyaux d'hydrogène lourd en un noyau d'hélium commence uniquement si la compression est quasi symétrique ; la fusion des noyaux d'hydrogène en hélium libère alors une énergie considérable.

Lors des premières décennies de recherche sur la fusion, la fabrication d'une petite bombe H en laboratoire paraissait inaccessible. Aussi les physiciens ont-ils essayé de déclencher la fusion par confinement magnétique, à l'aide de puissants champs magnétiques qui piègent un mélange chaud (un plasma) de deutérium et de tritium. En 1991, la fusion du deutérium et du tritium fut ainsi obtenue à Culham (GB) dans une machine nommée Tokamak ; plus tard, elle a été reproduite à Princeton (TFTR). La prochaine étape de cette approche est le projet international ITER (*International Thermonuclear Experimental Research*, soit « Recherche expérimentale internationale thermonucléaire »), auquel participent l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Russie. Les dépenses d'avant-projet, les difficultés techniques, ainsi que les tergiver-

1. LE FONCTIONNEMENT DU GÉNÉRATEUR Z est spectaculaire. Les lignes de transmission sont immergées dans l'eau pure pour être isolées électriquement. Une très faible proportion de l'énergie produite s'échappe à la surface de l'eau sous la forme de longues décharges électriques. L'événement dure seulement quelques microsecondes. Un appareil photographique avec l'obturateur ouvert enregistre les décharges rapides sous forme d'un réseau de traces brillantes.



sations quant à sa localisation ont déjà ralenti la phase de conception.

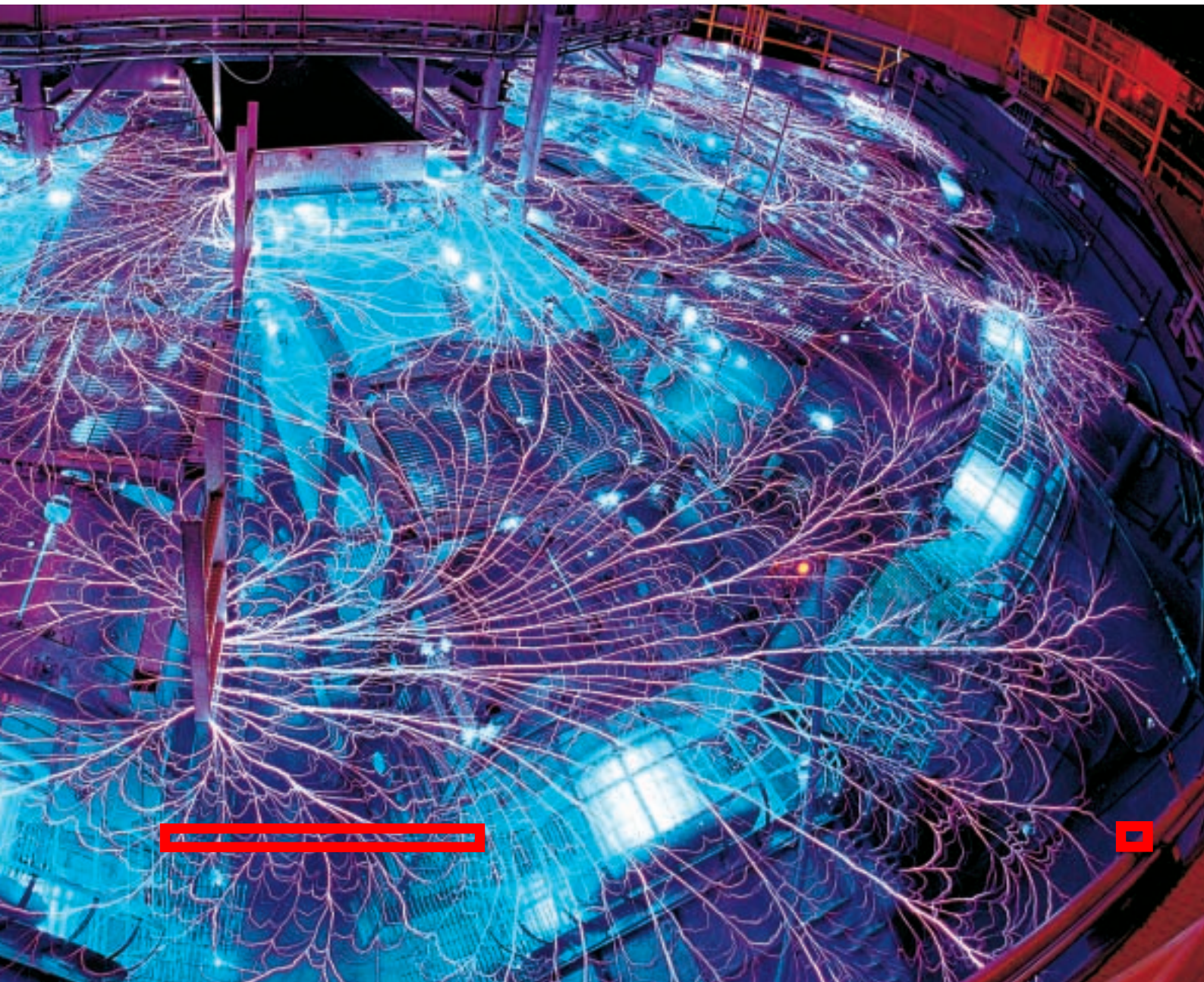
Dès le début des années 1970, des équipes explorèrent une autre voie, celle du confinement inertiel. Dans cette approche, qui reprend le principe de la bombe H, on cherche à utiliser des rayonnements pour comprimer une petite capsule contenant de l'hydrogène. Alors que la bombe H est déclenchée par le rayonnement dû à l'explosion d'une bombe A, les premières tentatives de fusion inertielle en laboratoire utilisaient d'intenses faisceaux laser ou d'électrons pour faire imploser la capsule de combustible.

À l'époque, on avait largement

sous-estimé la puissance nécessaire pour assurer l'ignition. En 1978, on supposait que la fusion se déclencherait si l'on fournissait un mégajoule en dix nanosecondes sur la surface d'une capsule de la taille d'un grain de poivre. Cette puissance de 100 térawatts (100 000 milliards de watts) équivaut à la consommation électrique de un million de foyers pendant plusieurs heures, concentrée en une fraction de seconde. Pour l'obtenir, quelques équipes ont exploré une nouvelle technique : la haute tension pulsée.

Dans cette technique, l'énergie électrique est stockée dans des condensateurs à eau, qui la libèrent en brèves

impulsions. Afin d'obtenir une puissance encore supérieure, on raccourcit la durée des impulsions et on les comprime spatialement pour accroître la densité de puissance. Ces bouffées d'énergie électromagnétique sont alors converties en impulsions intenses de particules chargées, en rayonnement X, ou utilisées pour le pilotage d'autres systèmes. Dans la fusion par laser, en revanche, des impulsions électriques beaucoup plus longues sont amplifiées et contractées dans une ligne laser. La haute tension pulsée semble être une meilleure solution que le laser, en raison d'un meilleur rendement et d'un coût peu élevé.



Cette technique, d'abord apparue en Grande-Bretagne en 1964, fut ensuite étudiée en Union soviétique et aux États-Unis. La puissance résultante était alors limitée, ce qui lui donnait peu de chances dans la course à la fusion. Du coup, on l'utilisait surtout pour tester, en laboratoire, les effets des rayonnements nucléaires sur les composants des systèmes d'armes.

Depuis le début des programmes de recherche sur la fusion inertielle, en 1973, les physiciens ont considérablement progressé dans l'obtention des hautes puissances et dans les connaissances des conditions de l'ignition, par laser ou par rayonnement X pulsé. Les analyses de décennies d'expériences effectuées à l'aide de lasers puissants ont guidé la mise au point des capsules thermonucléaires. Aujourd'hui, les simulations

à l'aide de superordinateurs montrent qu'il faut deux millions de joules, durant quatre nanosecondes, soit presque 500 térawatts, pour allumer le combustible.

Les lasers peuvent atteindre ces paramètres : après 13 ans de recherches avec le laser Nova, dont l'énergie est de 30 kilojoules, le Laboratoire Lawrence Livermore construit un nouveau laser beaucoup plus puissant, le NIF (l'acronyme de *National Ignition Facility*, soit « Installation nationale pour l'ignition »). S'il fonctionne comme prévu, le NIF récupérera au moins autant d'énergie de fusion que le laser apportera d'énergie électromagnétique à la cible. Ce remarquable résultat sera toutefois insuffisant, car l'énergie libérée par le laser restera 100 fois inférieure à l'énergie utilisée pour le faire fonctionner. Autrement dit, le NIF sera la prochaine

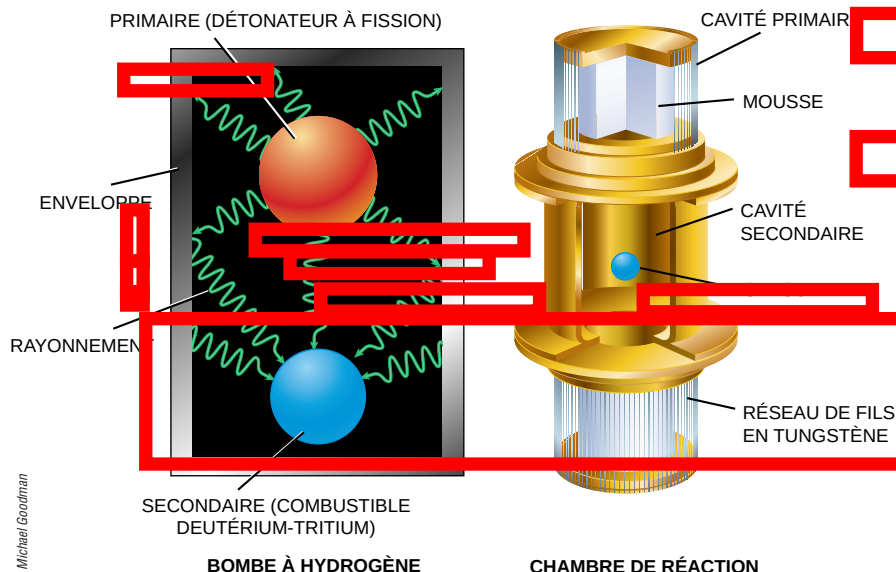
étape vers des rendements élevés, mais il ne sera pas le prototype du système de fusion nucléaire contrôlée.

Renaissance de la striction

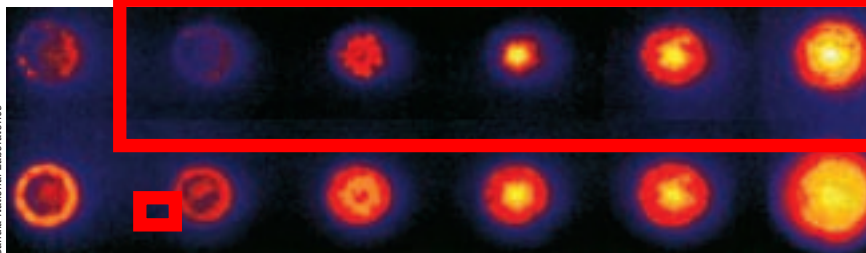
Il y a seulement quelques années, le système à hautes puissances pulsées des Laboratoires Sandia restait très insuffisant, de sorte que nous avons hésité à prolonger nos études. Notre persévérance fut récompensée : la puissance engendrée a crû considérablement. Alors que dans les années 1960, la puissance pulsée ne fournissait qu'un minimum de térawatts de rayonnement, nous avons récemment produit 290 térawatts de puissance rayonnée avec le générateur Z. Nous prévoyons d'obtenir prochainement la fusion à gain élevé avec des impulsions de rayonnement X de 1 000 térawatts.

Nous avons également amélioré la focalisation du rayonnement X sur la petite cible contenant le combustible. Dans les années 1970, notre système chauffait la cible par l'intermédiaire de faisceaux d'électrons ; puis, dans les années 1980, nous avons remplacé les électrons par des ions légers, afin d'obtenir des températures supérieures. Cependant, on focalise difficilement les ions légers vers une cible. Les rayons X, en principe, sont plus intéressants : ils remplissent uniformément l'espace autour de la capsule, de la même manière que la chaleur d'un four enveloppe un poulet en train de rôti. L'étude de la fusion à l'aide d'une petite chambre de réaction où l'on libère de puissantes bouffées de rayons X a été récemment mise en œuvre grâce à une technique ancienne : la striction magnétique axiale.

L'idée de cette technique date des années 1950. En ces débuts de la recherche sur le confinement magnétique, des physiciens avaient pensé déclencher la fusion en faisant passer un courant électrique très intense dans du deutérium gazeux. Le courant devait ioniser le gaz et engendrer un champ magnétique qui « pincerait » le plasma résultant, créant de fortes densités et des températures élevées selon l'axe du courant (on nomme cette technique *Z-pinch* en anglais, car l'axe du courant est l'axe z). À l'époque, la technique ne comprimait pas le plasma de manière uniforme : des instabilités divisaient le plasma en paquets insuffisamment chauffés. La compression du plasma engendrait jusqu'à 1 000 électronvolts, sous la forme de rayons X. Pendant 30



2. LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL utilise le principe de la bombe H (à gauche) : le rayonnement d'une bombe à fission (détonateur) comprime et chauffe le combustible – du deutérium et du tritium – contenu dans la cavité (secondaire). De même, les chambres de confinement inertiel (à droite) permettent d'immerger symétriquement la capsule, de la taille d'un grain de poivre, dans le rayonnement issu du détonateur. Lorsque l'énergie est concentrée sur la capsule, celle-ci implode symétriquement.



3. DES RAYONS X sont produits quand le plasma issu de la vaporisation d'un grand nombre de fils de tungstène implode sur une fibre en deutérium et en carbone, disposée sur l'axe d'une machine à striction. Ici on a représenté les étapes successives de cette implosion vue de dessus, à intervalles de trois nanosecondes. La série d'images supérieure correspond à des rayons X d'énergie supérieure à 800 électronvolts, celle du bas est obtenue avec des rayons X de 200 électronvolts.

ans, les physiciens utilisèrent la striction pour les expériences de durcissement, c'est-à-dire pour tester l'influence des radiations nucléaires sur les matériaux et les circuits électroniques des armes nucléaires.

Aujourd'hui, la striction axiale renaît, parce qu'elle semble être un bon système de déclenchement de la fusion inertielle. Dans les trois dernières années, nous avons montré qu'en combinant l'efficacité et le coût peu élevé de la puissance pulsée rapide avec la simplicité et l'efficacité de la striction axiale comme source de rayonnement X, nous pouvions atteindre l'ignition avec des rayons X d'énergie inférieure à un kiloelectronvolt, qui comprime- raient une cible d'hydrogène. De sur- croît, l'accessibilité d'une source de puissance pulsée de rayons X doit per- mettre d'aller plus loin, c'est-à-dire jus- qu'à la fusion efficace du combustible, avec un rendement élevé.

Pour déclencher la fusion, la stric- tion doit se dérouler dans une chambre de réaction, ou cavité, qui piège les rayons X. Dans une configuration que nous avons testée, la striction s'effectue dans une cavité primaire, et le com- bustible est placé dans une cavité secon- daire, plus petite. Dans une autre configuration, la capsule de combus- tible est dans une mousse en matière plastique, au centre de la cavité primaire. Les rayons X produits lors de la stric- tion du plasma baignent uniformément la capsule, de la même façon que l'en- veloppe d'une bombe H piège le rayon- nement provenant de la bombe A. Des expériences entreprises depuis trois ans ont montré que les deux configurations doivent fonctionner, car nous savons maintenant créer une striction uniforme et stable suffisamment longtemps pour obtenir l'efficacité requise.

Le secret de la réussite

Pourquoi avons-nous tant progressé ces trois dernières années? Parce que nous avons mieux compris les instabi- lités. Thomas Edison essaya un mil- lier de matériaux avant de trouver le secret de l'ampoule électrique; de même, nous avons finalement décou- vert que l'instabilité qui rend la stric- tion axiale inefficace peut être réduite si les bouffées X sont très brèves.

L'instabilité qui détruit la symé- trie du pincement est analogue à celle qui fait descendre irrégulièrement au fond d'un bol une couche de vinaigre

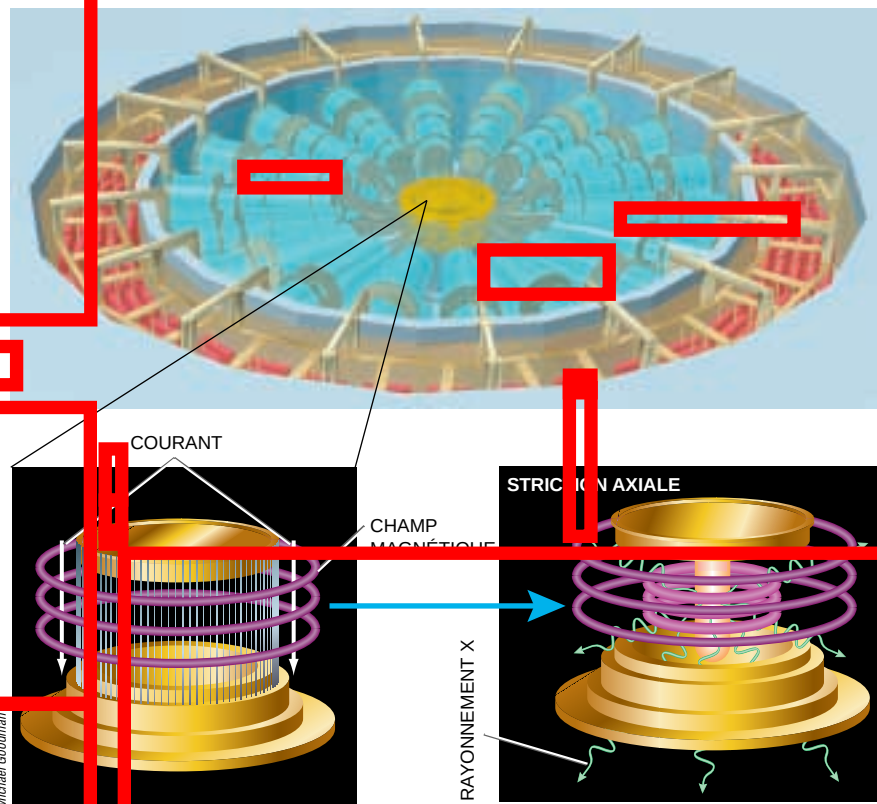
soigneusement déposée sur de l'huile. Elle gêne la fusion, mais des simula- tions numériques ont montré que, plus le plasma initial est uniforme, plus la striction est régulière le long de l'axe du champ magnétique, lors de la pro- duction de rayonnement X.

Les tentatives d'uniformisation du plasma ont rencontré peu de succès jusqu'à l'adoption, en 1995, d'une chambre de réaction munie de fils d'aluminium, puis de 400 minces fils de tungstène. La striction axiale avec des fils avait déjà été utilisée à la fin des années 1970: la *Société Physics Inter- national* avait employé cette configura- tion afin d'augmenter l'énergie du rayonnement X résultant de un à cinq kiloelectronvolts. Toutefois, les géné- rateurs de courant d'alors ne pouvaient fournir suffisamment de puissance électrique pour assurer l'implosion d'un grand nombre de fils.

Aujourd'hui les générateurs pro- duisent suffisamment de courant.

Quelle est la succession des opérations? L'impulsion de courant, dont la durée est de 100 nanosecondes, «vaporise» d'abord les fils qui se transforment en un plasma. Ces fils individuels coales- cent en un tube de plasma. Puis, à mesure que le courant continue d'aug- menter, le tube de plasma se com- prime violemment en un plasma cylindrique uniforme. Des expériences ont montré que la cavité cylindrique située le long de l'axe z est chauffée lorsque le plasma est ainsi comprimé. De surcroît, contrairement à ce qu'in- diquaient les simulations, des expé- riences de l'Université Cornell ont montré que chaque fil ne devient pas instan- tément un plasma, mais qu'un cœur métallique froid demeure au centre du fil, entouré par un plasma. Ainsi, le cou- rant continue de circuler, ce qui accroît l'efficacité de la striction.

Les premiers tests de ces idées s'ef- fectuaient, il y a trois ans, auprès du générateur SATURN, qui fournit un



4. DANS UN DISPOSITIF A HAUTE TENSION PULSEE, la concentration de la puissance débute avec l'allumage d'un dispositif circulaire de 36 générateurs de Marx, où une source de haute tension (90 kilovolts) charge une batterie de condensateurs de 5 000 mètres cubes en deux minutes. Les impulsions électriques des 36 générateurs passent dans des condensateurs intermédiaires, isolés par de l'eau pure. La durée des impulsions y est réduite à 100 nano- secondes. Traversant un gaz interrupteur commandé par laser, les 36 impulsions sont syn- chronisées à moins d'une nanoseconde près. L'impulsion résultante est transférée au dispositif à fils (en bas, à gauche), via 4 lignes de transmission isolées magnétiquement pour minimi- ser les pertes en énergie. Lorsque les fils, dont le diamètre est égal au dixième de celui d'un cheveu, sont parcourus par des courants dont l'intensité atteint plusieurs milliers d'am- pères, la striction magnétique du plasma se produit (en bas, à droite).

Le projet SYRINX

Au Centre d'études de Gramat (CEG), dans le Lot, la Délégation générale pour l'armement (DGA) met au point des générateurs de puissance en vue de concevoir des sources intenses de rayonnement X par striction magnétique axiale de plasma (*Z-pinch*). Les ingénieurs français explorent des voies innovantes pour optimiser le rapport du coût avec la performance de tels moyens. Au début des années 1990, des expériences menées à l'École polytechnique par le CEG et le Laboratoire de physique des milieux ionisés de Palaiseau ont aidé à comprendre comment limiter les instabilités des plasmas en phase de compression : le rayonnement de *Z-pinch* est ainsi rendu plus efficace. Ces résultats ont conduit à retenir la striction magnétique axiale comme source radiative.

Contrairement aux générateurs à stockage capacitifs utilisés depuis 20 ans dans d'autres expériences, nous avons préféré les générateurs à stockage inductifs. Ce choix est fondé sur un potentiel d'innovation plus intéressant, aussi bien du point de vue technique que du coût. Dans le stockage capacitif, l'énergie électrique est stockée dans des lignes à eau, des condensateurs qui sont déchargés par la fermeture d'un interrupteur de puissance (un éclateur). La quantité d'énergie stockée est ainsi limitée par la rigidité diélectrique de l'eau. Le volume des lignes à eau du générateur Z est déjà de 5 000 mètres cubes.

Avec le générateur X1, on atteint des volumes énormes. En revanche, avec le stockage inductif, on emmagasine l'énergie dans une bobine, sous la forme d'un champ magnétique. Pour un volume donné, la quantité d'énergie stockée est bien supérieure.

L'utilisation d'un générateur de stockage inductif nécessite la mise en œuvre de générateurs de courant primaires rapides (décharge en moins d'une microseconde), de lignes de transmission à très basse impédance (pour limiter les pertes par effet Joule) et de amplificateurs de puissance. Ces derniers, constitués de commutateurs à ouverture de plasma (qui servent de fusible pour transmettre le courant vers le dispositif de striction), compriment l'impulsion électrique avec un front de montée d'une durée inférieure à 100 nanosecondes. Grâce à ce temps de montée, les effets des instabilités de plasma sont fortement limitées pendant la phase de compression de la striction magnétique.

Pour que le générateur soit efficace, on doit supprimer les inductances inutiles. En effet, le ren-

dement d'un générateur inductif dépend directement du rapport d'inductance entre la partie primaire du générateur et celle de la striction magnétique (qui est en général voisine de dix nanohenrys avant implosion). Plus on réduit l'inductance primaire, meilleure est l'efficacité de compression et de rayonnement. Nous avons mis au point ces générateurs de 160 kilojoules avec un temps de montée de 700 nanosecondes, ce qui est presque deux fois plus rapide que les générateurs utilisés habituellement. De même, les interrupteurs de puissance, capables de commuter un courant de un million d'ampères et d'inductance inférieure à dix nanohenrys, ont été mis au point en collaboration avec l'Institut des courants intenses de Tomsk, en Russie.

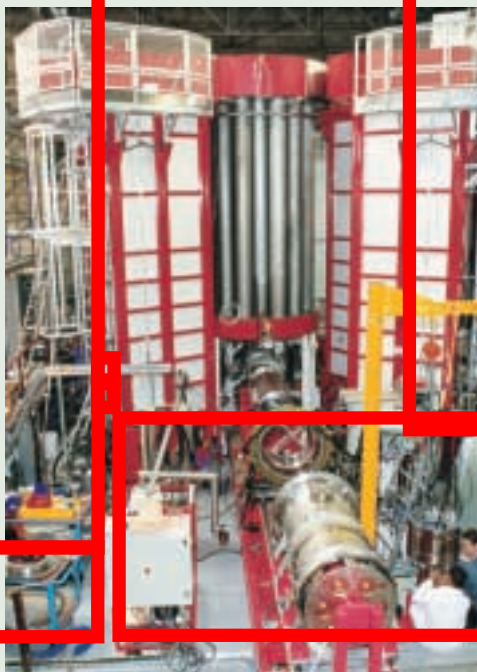
Trois architectures électriques différentes sont à la base de trois générateurs de 640 kilojoules dont les performances sont en cours d'analyse. Si les performances sont celles que l'on attend, un démonstrateur, nommé MAG3, stockant 6,4 mégajoules, capable de délivrer au moins dix millions d'ampères en 100 nanosecondes dans un dispositif à striction magnétique axiale, sera étudié en 1998 et construit en l'an 2000. Jusqu'ici, les générateurs à stockage inductifs confirment leur intérêt économique.

Pour optimiser la conception de notre machine, nous utilisons des simulations numériques qui nous renseignent sur l'évolution des champs électriques et magnétiques dans des géométries complexes. Ces simulations nous aident également à concevoir des lignes isolées magnétiquement qui transportent des intensités de plusieurs millions d'ampères et des tensions de l'ordre du mégavolt. Des simulations en deux dimensions sont aussi élaborées en vue de l'exploitation et de la conception des expériences de striction magnétique.

La métrologie, enfin, enregistre les paramètres utilisés dans les simulations. Des capteurs mesurent les intensités et les tensions sur les électrodes du générateur et à proximité de la zone de striction : des techniques d'imagerie rapide (interférométrie laser, caméras rapides...) révèlent la dynamique de l'implosion du plasma.

En quelques années, le Centre d'étude de Gramat acquerra compétence dans le domaine des hautes tensions pulsées. L'avenir nous dira si nos choix ont été judicieux.

Francis KOVACS, DGA,
Centre d'études de Gramat



Un des prototypes de 640 kilojoules mis au point au Centre d'études de Gramat. On distingue les générateurs de Marx qui se déchargent dans une ligne de transmission à eau. Cette dernière transmet un courant de deux millions d'ampères dans une ligne à vide qui sert de stockage inductif, puis dans le commutateur à ouverture de plasma contrôlé magnétiquement qui amplifie la puissance vers la cible (au premier plan).

courant de 10 millions d'ampères. Depuis octobre 1996, elles se poursuivent sur le générateur-Z, qui produit un courant de 20 millions d'ampères. Cette machine est celle qui fournit les bouffées de plus énergiques et les plus puissantes : lors des expériences, on produit deux mégajoules de rayonnement X en quelques nanosecondes, soit une puissance rayonnée supérieure à 200 térawatts.

En novembre 1997, nous avons accru la puissance de rayonnement X de 45 pour cent atteignant 290 térawatts, à l'aide de deux réseaux de fils concentriques. Le courant vaporise les fils extérieurs en un plasma que le champ magnétique accélère vers le cylindre central. Le plasma externe, plus rapide, frappe alors le cylindre central de fils. Les parties plus lentes se mélangent au cylindre de plasma central, qui, à son tour, implode. Cette structure réduit les instabilités de l'implosion et, lorsque les matériaux vaporisés entrent en collision sur l'axe z, ils créent une impulsion X plus courte que celle d'un dispositif à un seul cylindre. À l'aide de ce système à double détente, on atteint une température de 1,8 million de degrés (soit 164 électronvolts).

D'autres expériences sur le générateur-Z, avec un dispositif constitué de couches de mousse entourant un tube de beryllium à l'intérieur d'un dispositif à simples fils, ont produit une implosion plus lente et aussi plus symétrique du plasma résultant de la striction axiale.

Il aura fallu 40 ans pour atteindre 40 térawatts de puissance X à l'aide d'une striction axiale, mais les trois dernières années sont celles qui nous ont fait le plus progresser, et nous approchons du but : une température de la cavité centrale de trois millions de degrés, nécessaire à l'obtention de la fusion avec un gain élevé, engendrée par un rayonnement X de 16 mégajoules et de 1 000 térawatts. Nos expériences ont confirmé que la puissance pulsée est plus efficace et moins coûteuse que le confinement par laser : notre dispositif à striction axiale produit une énergie de rayons X totale égale à 15 pour cent de l'énergie électrique initialement injectée, alors que l'efficacité du laser Nova n'est que de 0,1 pour cent. Avec le NIF, la prochaine génération de lasers, on atteindra peut-être une efficacité de 0,5 pour cent, mais l'inefficacité des lasers ne permettra pas d'aller beaucoup plus loin.

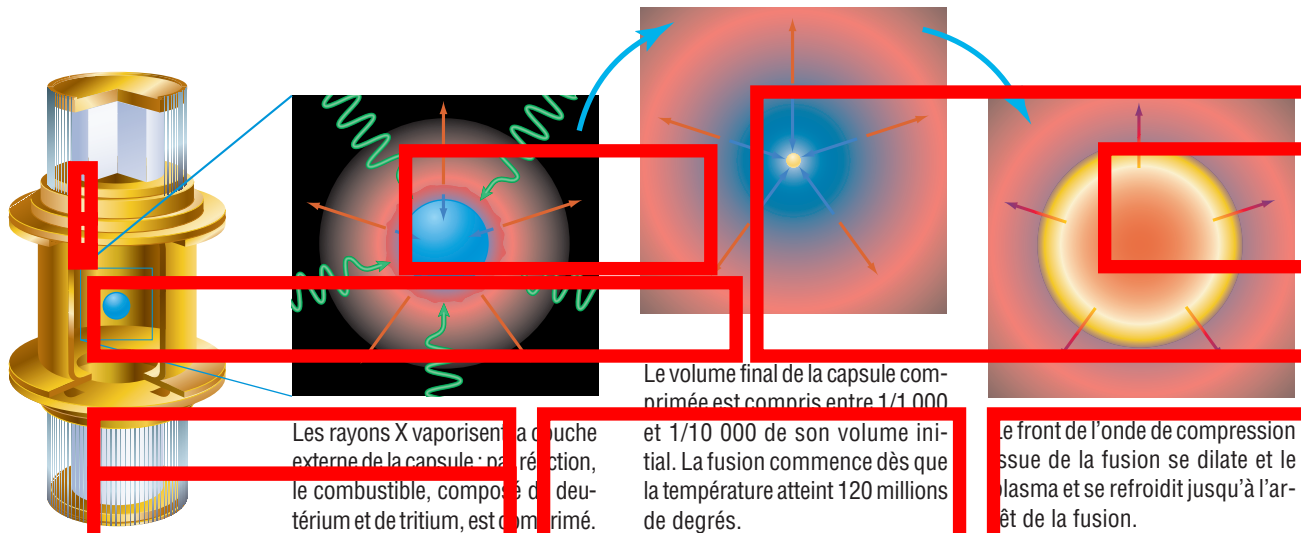
Gagner un facteur trois

Les impulsions intenses de rayons X ont de nombreuses applications autres que le confinement inertiel. Les énergies et les puissances accessibles par la machine autorisent déjà la mesure en laboratoire de propriétés des matériaux, ainsi que l'étude de la propagation des rayonnements à des densités et à des températures qu'on n'atteignait que par des explosions nucléaires souterraines. Les têtes nucléaires sont soumises à une irradiation permanente de la part du plutonium qu'elles contiennent. L'étude de l'influence du rayonnement sur les bombes permet d'étudier leur vieillissement des machines à courant intense garantissant ainsi la sûreté et la fiabilité des bombes nucléaires vieillissantes.

Les astrophysiciens sont également intéressés par la striction axiale, car les plasmas engendrés par le générateur-Z sont similaires à ceux des couches externes des étoiles. Le comportement de certaines étoiles variables, telles les Céphéides, est maintenant mieux compris grâce aux données obtenues par les expériences de striction axiale. Des expériences ultérieures éclaireront d'autres phénomènes cosmiques, telles les supernovae. Les plasmas de laboratoire offrent également la possibilité de nouvelles études en physique atomique et sur les lasers à rayons X.

La striction axiale est une source de rayons X remarquablement efficace et reproductible : expérience après expérience, on obtient toujours les mêmes énergies sous forme de rayons X, même si l'on ignore encore le détail des phénomènes. On observe que, chaque fois qu'on double le courant, l'énergie X résultante est quadruplée, et le rayonnement thermique croît avec la racine carrée de l'intensité électrique, conformément à la théorie. Si ces lois restent vraies à haute énergie, une augmentation d'un facteur trois de l'intensité électrique, portant celle-ci à 60 millions d'ampères, permettrait d'atteindre l'énergie, la puissance et la température requises pour déclencher une fusion avec un gain élevé.

Quels problèmes devons-nous résoudre afin d'obtenir la fusion ? Nous devons d'abord nous assurer que l'on peut contenir le courant dans la cavité. Des résultats obtenus à l'Institut Kurchatov, il y a 30 ans, et des confirmations de la Société *Physics International* et des Laboratoires *Sandia*, indiquent qu'une énorme concentration de puis-



5. LES RAYONS X issus de la striction compriment le combustible contenu dans la capsule et déclenchent la fusion dans sa cavité interne. Dans la machine X-1, dont la conception devrait bientôt commencer, la capsule est comprimée, en moins de dix nanosecondes, en un plasma de la taille du point qui termine cette phrase.

sance dans de petites cavités à striction axiale est sans doute possible.

Les champs électriques intenses tendent à couper les courants qui les créent : notamment des décharges (des claquages) risquent de dissiper l'énergie électrique entre les fils et la paroi latérale de la cavité. On utilise le phénomène d'isolement magnétique pour transmettre de puissantes impulsions électriques le long d'un canal, entre deux surfaces métalliques, sans claquage et presque sans perte d'énergie : le champ magnétique de la puissante impulsion électrique s'oppose à la tendance au claquage du courant. En avril 1998, mon collègue John Porter a observé qu'il n'y avait pas de claquage dans l'intervalle de 1,5 millimètre entre le réseau de fils et le mur de la cavité, même avec d'intenses décharges électriques, ce qui a permis à la température de la cavité d'atteindre 1,7 million de degrés.

Dans les dispositifs utilisés, le courant circule dans un sens dans les fils et revient le long de la paroi de la cavité. Aussi, dans l'inductance formée par l'espace étroit entre les fils et la paroi, une puissance de 50 térawatts est stockée ; la densité de puissance atteint alors 25 térawatts par centimètre carré. Si l'on augmente la puissance jusqu'à 150 térawatts, avec un courant de 60 millions d'ampères, la densité de puissance atteindra 75 térawatts par centimètre carré. Cette augmentation pose de nouvelles questions, car la pression exercée sur le métal de l'enceinte est alors comprise entre 150 et 300 gigapascals, soit 1,5 à 3 millions d'atmosphères. Les parois résisteront-elles à

ces pressions colossales ? Les simulations suggèrent que la fusion requiert une grande symétrie. Cette symétrie et l'efficacité de conversion de l'énergie de 15 pour cent seront-elles conservées dans les nouvelles conditions ?

Les simulations devront être également améliorées. Les simulations actuelles, au fonctionnement, à deux dimensions seulement, ont déjà fourni de nombreuses informations sur le mécanisme de la striction axiale. Bien que restreints à deux dimensions, ces calculs nécessitent une capacité de calcul considérable. La description tridimensionnelle, incluant les déplacements de matière et les émissions des rayonnements, demeure encore inaccessible, mais les avancées en informatique et en imagerie X sont rapides. En 1998, nous avons mis en service l'ordinateur Janus, dont la capacité de calcul est égale à 1,8 téraflop ($1,8 \times 10^{12}$ opérations par seconde en mode virgule flottante, soit plus de 10 000 fois la capacité d'un ordinateur individuel). L'utilisation de nouveaux programmes de simulations sur la nouvelle génération de superordinateurs fera rapidement progresser la technique de striction axiale pour la fusion contrôlée.

Nous préparons maintenant la prochaine grande étape. À la fin de mars 1998, le Département américain de l'énergie nous a autorisés à concevoir le générateur X-1, qui succédera au générateur-Z : il devrait fournir 16 mégajoules avec un gain élevé. Son coût devrait être de l'ordre de 2,4 milliards de francs. Rappelons que le

générateur Z, le générateur X-1 et le nouveau laser NIF demeurent des outils de recherche : le générateur Z pourrait atteindre les conditions de la fusion, le laser NIF devrait produire l'ignition, et le générateur X-1, construit grâce aux enseignements du laser NIF, pourrait conduire à des gains élevés. Cependant, aucun de ces dispositifs ne sera une centrale électrique à fusion contrôlée.

Paraphrasant Bernard Shaw, on doit convenir qu'« il est difficile de faire des prédictions, notamment sur l'avenir ». Toutefois, si la prochaine étape démarre rapidement, nous pensons réellement atteindre l'objectif, c'est-à-dire la fusion, dans les dix prochaines années.

Gerolamo YONAS est vice-président de la Division « Systèmes, science et technique » aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque (Nouveau-Mexique).

G. YONAS, *La fusion contrôlée par faisceaux de particules*, in *Pour la Science*, janvier 1979.

S. CRAXTON, R. MCCRORY et J. SOURES, *Des progrès dans la fusion nucléaire par laser*, in *Pour la Science*, octobre 1986.

H. FUETH, *La fusion nucléaire*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

Jacques COMBES, *Le laser Mégajoule*, in *Pour la Science*, décembre 1997.

M.K. MATZEN, *Z-Pinches as Intense X-Ray Sources for High-Energy Density Physics Applications*, in *Physics of Plasmas*, vol. 4, n° 5, 2^e partie, pp. 1519-1527, mai 1997.

Les jeux mathématiques

MARTIN GARDNER

Encore trop méconnus, les jeux mathématiques sont à la fois des moteurs pour l'enseignement et pour la recherche. Certaines de leurs applications sont imprévues.

Ma rubrique de Jeux mathématiques commença en 1956, dans la revue *Scientific American* ; à partir de 1977, elle fut également publiée dans la revue *Pour la Science*. Mon premier article présentait les hexaflexagones, que l'on obtient en pliant une bande de papier en un hexagone, puis en collant ensemble les extrémités (voir la figure 2). Les objets obtenus peuvent se retourner plusieurs fois de suite, révélant les faces cachées par le repliement ; si l'on numérote chacun des triangles, les transformations des hexaflexagones sont associées à des cycles curieux. Inventés en 1939 par des étudiants de l'Université de Princeton, les hexaflexagones montrent bien que les jeux mathématiques sont indissociables des mathématiques « sérieuses » : un de leurs créateurs était Richard Feynman, qui devint ensuite l'un des plus célèbres physiciens théoriciens de ce siècle.

Quand j'ai commencé ma chronique, les livres de jeux mathématiques étaient rares. Pour se procurer un classique du genre, *Essais et récréations mathématiques*, par W. Rose Ball (1892), on devait écrire au géomètre canadien H. Coxeter. On disposait de *La mathématique des jeux*, du théoricien des nombres Maurice Kraitchik, mais c'était bien peu ! En un quart de siècle, tout a changé : de nombreux livres de jeux mathématiques ont été écrits, de nombreux ouvrages classiques ont été réédités, tels les *Problèmes plaisants et délectables*, de Bachet de Méziriac. Dans les jour-

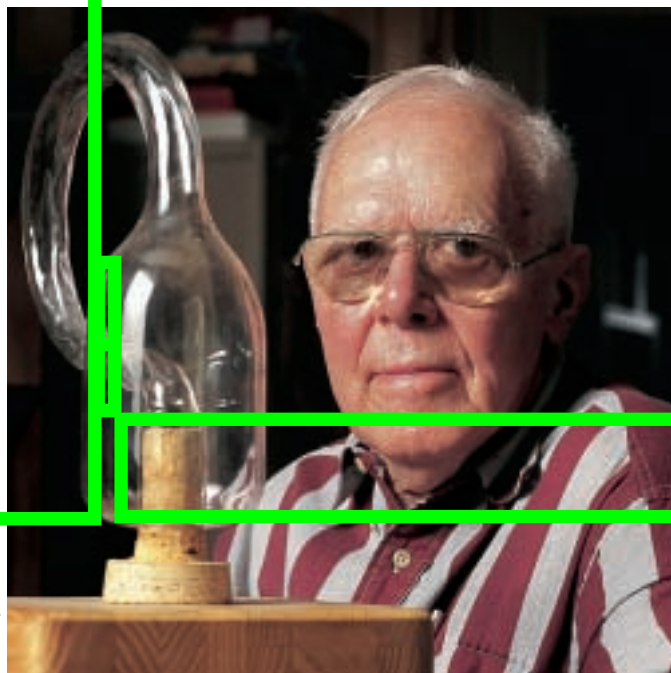
naux, les rubriques de mathématiques récréatives fleurissent : les lecteurs de *Pour la Science* connaissent celles de Ian Stewart ou de Jean-Paul Delahaye, et le Jeu-Concours de Pierre Tougne, qui publie de nombreux articles de jeux mathématiques en alternance avec A. Devdrey ou D. Hofstadter. Mieux encore le *Journal of Recreational Mathematics* (« Journal de récréations mathématiques ») est publié tous les trimestres depuis 1978.

La frontière entre les mathématiques amusantes et les mathématiques sérieuses est des plus floues. De nombreux mathématiciens professionnels considèrent leur travail comme une sorte de jeu, et ils classent dans les mathématiques récréatives tous les problèmes susceptibles d'amuser les non-mathématiciens. C'est le cas des

problèmes élémentaires dont les solutions sont surprenantes ou élégantes ; c'est aussi le cas des paradoxes, des jeux de société, des tours de magie, des curiosités géométriques ou topologiques, tels le ruban de Möbius (une bande que l'on referme sur elle-même, après l'avoir tordue d'un demi-tour) ou la bouteille de Klein (une bouteille dont on étire le col pour le ressouder au fond, après lui avoir fait traverser la paroi : son intérieur et son extérieur sont alors confondus). La plupart des branches des mathématiques ont des parties qui peuvent être considérées comme récréatives. La page ci-contre présente quelques exemples amusants.

Le morpion

Si les revues scientifiques contiennent souvent des jeux mathématiques, les enseignants n'ont pas encore tous pris l'habitude d'utiliser ces jeux pour leurs cours. Depuis 40 ans, je m'efforce de convaincre les professeurs de mathématiques des écoles, collèges et lycées que les mathématiques récréatives sont indispensables, parce qu'elles initient sans prétention aux mathématiques. Je me souviens d'un cours de mathématiques, au collège où j'avais terminé le travail qui m'avait été demandé et où, sur une feuille à part, je cherchais à résoudre un problème qui me préoccupait. Je trouvais une stratégie qui permette au premier joueur de gagner à coup sûr, au jeu de morpion ? Lorsque le professeur me vit écrire, il s'empara de ma feuille et me dit : « Mon-

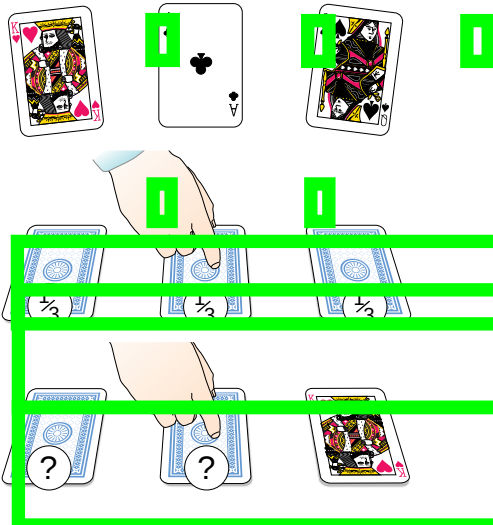


1. MARTIN GARDNER a toujours collectionné les jeux mathématiques. Âgé de 83 ans, il vit aujourd'hui à Hendersonville, en Caroline du Nord. Il pose ici à côté d'une bouteille de Klein, un objet dont l'intérieur se confond avec l'extérieur.

Donna Bise, Gamma Liaison

Quatre jeux mathématiques (Les solutions sont données en page 92)

1



Un ami pose trois cartes face contre table. L'une d'elles est un as, et les deux autres sont des figures. Vous posez le doigt sur une carte et vous pariez que c'est l'as. La probabilité que vous ayez raison est égale à $1/3$. Votre ami jette un rapide coup d'œil à chaque carte.

Comme il n'y a qu'un as parmi ces trois cartes, l'une au moins de celles que vous n'avez pas désignées doit être une figure. Il retourne une de ces cartes et vous la montre. Quelle est alors la probabilité que votre doigt soit maintenant sur l'as ?

2

28	26	30	27	29	25
34	32	36	33	35	31
16	14	18	15	17	13
2	6	3	5	1	
10	8	12	9	11	7
22	20	24	21	23	19

La matrice ci-dessus est un curieux type de carré magique. Entourez 11 de ses nombres, puis barrez tous les nombres de la même ligne et de la même colonne. Entourez alors un autre nombre qui n'a pas été barré et, de nouveau, barrez les nombres de la même ligne et de la même colonne. Continuez de la sorte jusqu'à ce que vous ayez entouré six nombres.

Quels que soient les nombres choisis, la somme des six nombres entourés sera toujours égale... à combien ? Et pourquoi obtient-on ce curieux résultat ?

3

Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre.
Or la terre était vague et vide, les ténèbres
couvraient l'abîme, l'esprit de Dieu planait sur
les eaux.

Dieu dit : "Que la lumière soit" et la lumière fut.

Dieu vit que la lumière était bonne, et Dieu

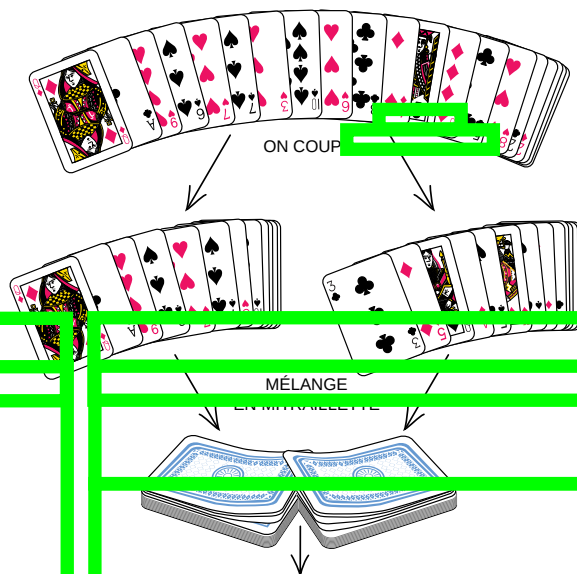
sépara la lumière et les ténèbres.

Dieu appela la lumière "jour" et les ténèbres "nuit".

Il y eut un soir et il y eut un matin : premier jour.

Les premiers versets de la Genèse sont reproduits ci-dessus. Choisissez l'un des mots du premier verset : «Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre.» Comptez le nombre de lettres de ce mot et nommez x ce nombre. Puis allez au mot qui se trouve x mots plus loin (par exemple, si vous choisissez "Dieu", allez jusqu'au mot «et»). Comptez alors le nombre y de lettres de ce nouveau mot, puis avancez de y mots. Continuez de la sorte jusqu'à ce que vous arriviez à la fin du cinquième verset. Quel est le dernier mot obtenu ? Est-ce une divine surprise que ce mot qui concerne le premier jour de la Genèse soit précisément celui qui en indique le nombre ?

4



Un magicien dispose un jeu de cartes de sorte que des cartes de couleur rouge et noire alternent. Il coupe le jeu en deux parties environ égales, en s'assurant que les premières cartes de chaque moitié sont de couleurs différentes. Puis il vous demande de battre en mitraille.

Il passe ensuite sa main sur le paquet, «afin de rétablir l'ordre» prétend-il, et il tire les cartes deux par deux : elles sont toujours de couleurs différentes. Naturellement sa passe magique n'a rien changé, mais pourquoi le mélange n'a-t-il pas perturbé l'ordre des couleurs ?

sieur Garner, lorsque vous êtes dans ma classe je veux que vous fassiez des mathématiques, et rien d'autre!» Pourtant ce problème aurait intéressé toute la classe, et il aurait fait une superbe introduction à la combinatoire, à la théorie des jeux, à la symétrie ou aux probabilités. En effet, tous les élèves jouent auorpion, et tous ont envie de gagner : si des mathématiques simples leur donnent une stratégie, ils sont preneurs. Plus généralement, les mathématiques récréatives sont un merveilleux tremplin pour la présentation des mathématiques.

Dans l'enseignement, la mode est aujourd'hui aux «mathématiques modernes/modernes», que je nomme ainsi pour les distinguer des mathé-

matiques modernes qui s'imposèrent il y a 10 à 20 ans. Les didacticiens des mathématiques recommandent de diviser les classes en petits groupes qui doivent résoudre des problèmes par des raisonnements élaborés en commun. L'«enseignement interactif» se substitue au cours. Ces nouvelles méthodes ont des avantages, mais pourquoi néglige-t-on encore tant les mathématiques récréatives, qui imposent tout naturellement un raisonnement interactif? Imaginez que vous soyez professeur : vous demandez à chaque groupe d'élèves de penser à un nombre quelconque de trois chiffres ABC . Puis vous demandez ensuite de taper le nombre deux fois de suite dans une calculette. Si les élèves choisissent

le nombre 237, par exemple, ils tapent 237237. Demandez-leur alors que vous avez le pouvoir psychique de prédire que, s'ils divisent le nombre tapé par 13, le reste sera nul. Ils le vérifieront facilement. Puis demandez-leur de diviser le quotient trouvé par 11 : le reste sera encore nul. Enfin demandez-leur de diviser le nouveau quotient par 7 : cette fois, le reste est encore nul, et le quotient déterminé est le nombre initial!

Le tour s'explique simplement quand on observe que $ABCABC$ est égal au produit de ABC par 1001; or 1001 est égal à $13 \times 11 \times 7$. Existe-t-il une meilleure introduction à la théorie des nombres et aux propriétés des nombres premiers?

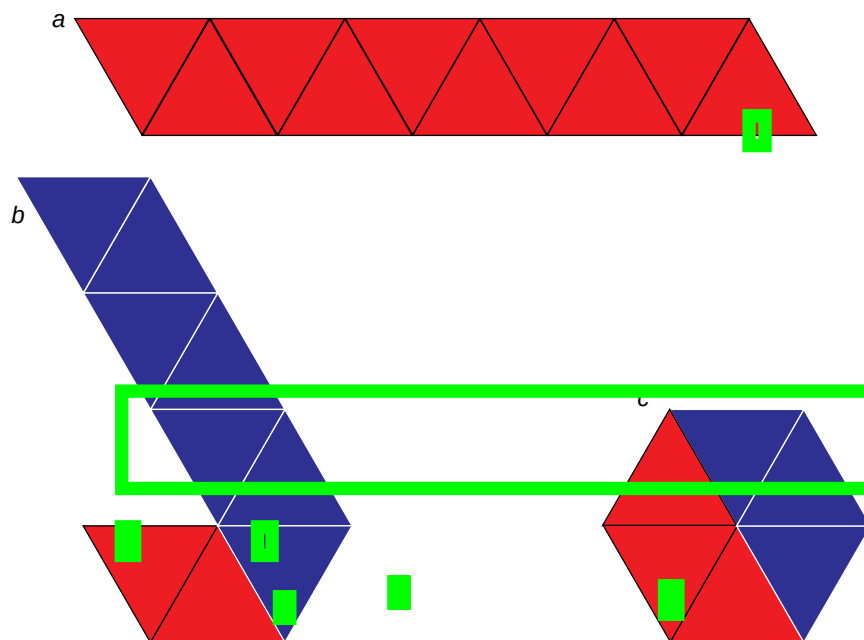
Polyominos et Jeu de la vie

J'ai eu plusieurs fois l'occasion de faire connaître des mathématiciens originaux. Alors que je n'étais qu'amateur de mathématiques, ma rubrique m'a valu un abondant courrier de lecteurs du monde entier, de sorte que la matière des articles fut variée et passionnante. Solomon Golomb, de l'Université de Californie du Sud, est un des premiers mathématiciens qui m'aidèrent ainsi. En mai 1977, j'exposai ses travaux sur les polyominos, des formes que l'on obtient en accolant des carrés identiques par leurs arêtes. Le domino, avec deux carrés, n'a qu'une seule forme, mais il existe plusieurs triominos, tétramino, pentominos, etc. : en L, en T, en carrés...

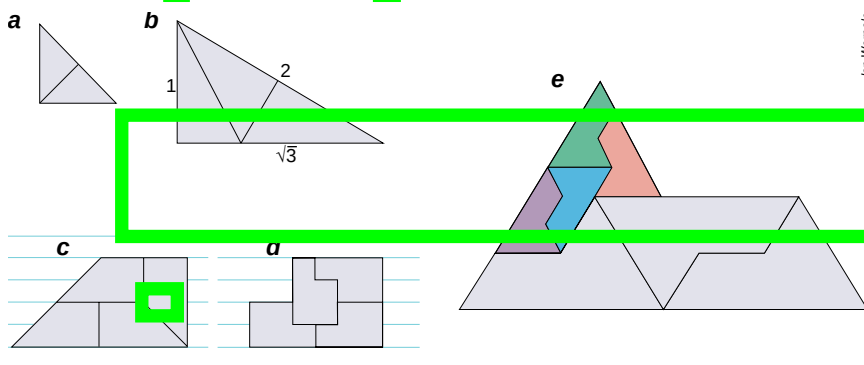
S. Golomb chercha d'abord si un ensemble de polyominos pouvait recouvrir complètement un damier. L'étude des polyominos se développa rapidement, engendrant une branche nouvelle des mathématiques récréatives. Arthur Clarke, le célèbre auteur de science-fiction, est un de ceux qui se passionnèrent pour les polyominos.

S. Golomb me signala également une classe de figures qu'il nommait les rep-tiles : ce sont des polygones qui, convenablement accolés, pavent une réplique agrandie de l'un d'entre eux (en anglais, *tile* signifie «pavage»). Un des rep-tiles est le sphinx, un pentagone irrégulier dont la forme rappelle celle du monument égyptien (voir la figure 3). Quatre sphinx conven-

ablement disposés redonnent un sphinx deux fois plus grand. Les rep-tiles ont la particularité qu'on peut les associer en rep-tiles plus grands, que l'on peut eux-mêmes associer en rep-tiles encore plus grands, et ainsi de suite.

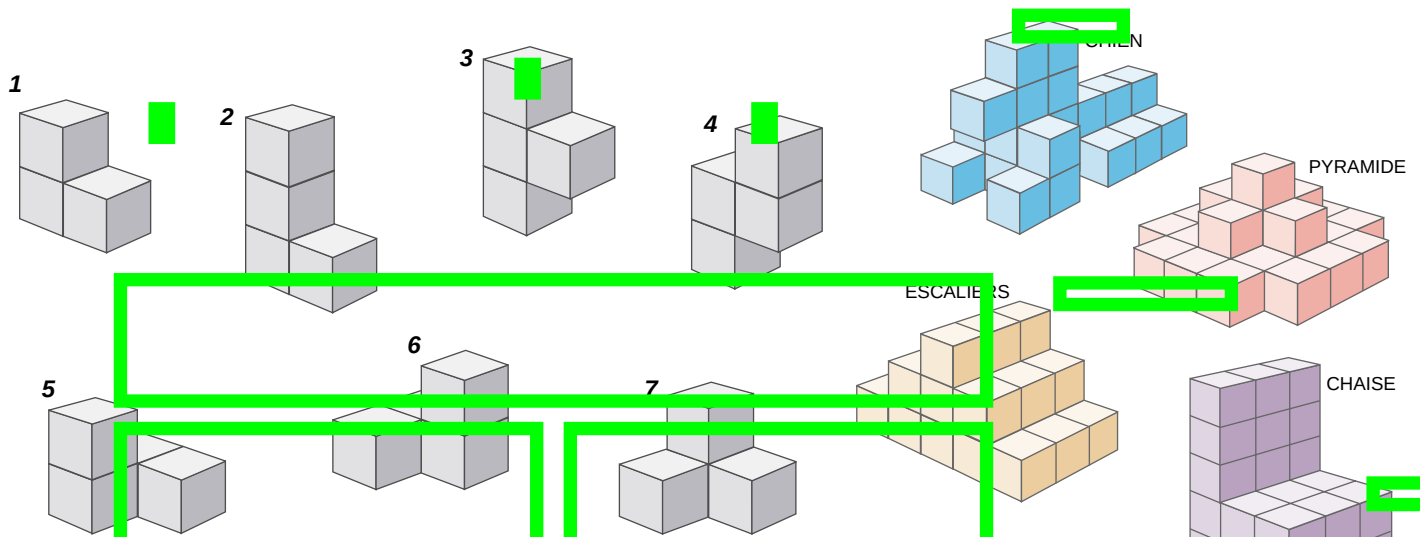


2. LES HEXAGLEXAGONES s'obtiennent à partir d'une bande de papier (a) par le pliage indiqué ici par les couleurs rouge et bleue, qui distinguent les deux faces. Quand on déforme l'hexaglexagone obtenu (c) pour obtenir un nouvel hexaflexagone, des faces qui étaient cachées apparaissent.



3. QUAND DES REP-TILES d'ordre inférieur s'assemblent, ils forment des répliques grossies d'eux-mêmes. Le demi-carré (a) est une rep-2 figure : deux demi-carrés s'assemblent pour former un demi-carré plus grand. Il faut trois rep-3 triangles rectangles (b) pour former un triangle rectangle de surface trois fois supérieure. En (c) et en (d) apparaissent respectivement un rep-4 quadrilatère et un rep-4 hexagone. Le sphinx (e) est le seul rep-4 pentagone connu.

Ian Worple



4. LES SEPT POLYCUBES DE SOMA sont composés de trois ou quatre cubes identiques (*ci-dessus*). Comment les assembler pour former un cube de trois cubes de côté, ou cube de Soma? Ce problème a 240 solutions différentes. On peut également assembler les polycubes de Soma pour former toutes les constructions de droite... sauf une : laquelle ? La réponse est donnée en page 92.

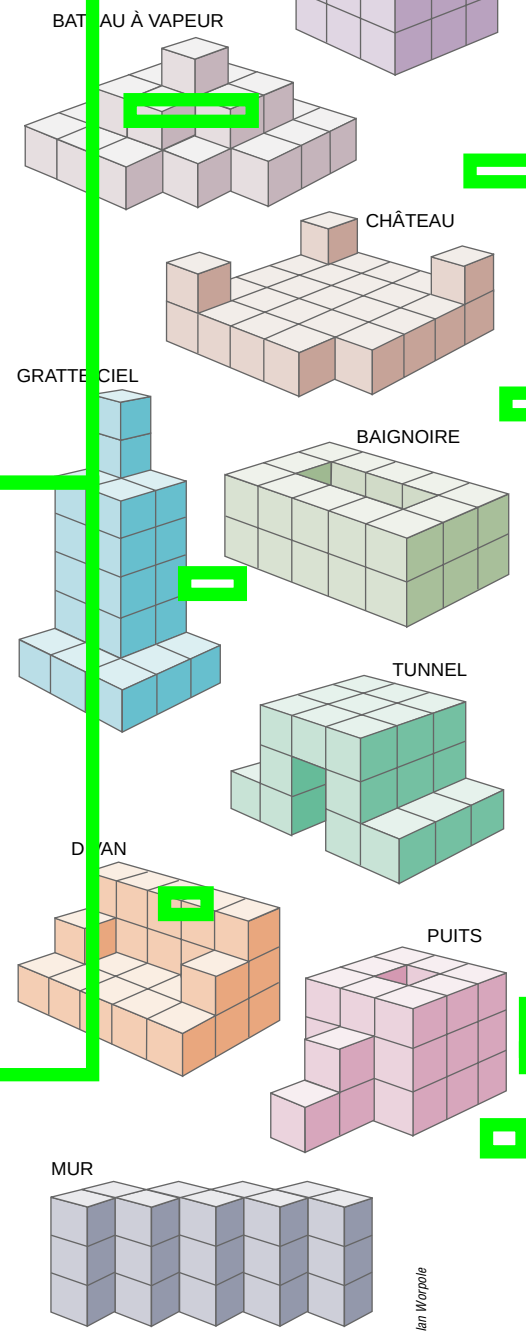
Le poète danois Piet Hein me communiqua également quelques-unes de ses inventions. En 1957, je présentai son jeu d'hex, un jeu topologique qui se joue sur un damier en forme de losange composé d'hexagones. À tour de rôle, les joueurs placent une pièce (noire pour un des joueurs, blanche pour l'autre) sur les hexagones vides et ils essaient de former une chaîne continue qui joigne un côté du damier au côté opposé ; une fois posée, une pièce ne peut être ni déplacée ni prise.

Hein inventa également le cube de Soma, dont j'ai présenté les particularités à trois reprises. Le nom provient probablement du roman d'Aldous Huxley *Le meilleur des mondes*, où une drogue nommée Soma met ses utilisateurs dans un état d'oubli qui est celui que l'on retrouve avec le jeu de Hein. Le jeu utilise sept polycubes différents : les polycubes sont les analogues de polyominoes à trois dimensions : on les obtient en assemblant des cubes identiques par leurs faces). Les polycubes de Soma peuvent être assemblés en un cube de Soma de 240 manières. On peut aussi les utiliser pour réaliser des formes variées : pyramide, baignoire, chien, etc.

Un autre mathématicien que j'ai eu le privilège de rencontrer est John Conway, qui me rendant visite en 1970, me demanda à brûle-pourpoint si j'avais un grand damier. Il me montra alors son jeu de simulation, aujourd'hui célèbre : le Jeu de la vie. Il plaça plusieurs pions sur le damier, puis enleva ou ajouta des pions en se conformant

à trois règles simples : tout pion entouré de 2 ou 3 autres pions reste en place (on considère les pions de toutes les cases adjacentes par un côté ou par un sommet) ; tout pion ayant 0, 1, 4, 5, 6, 7 ou 8 pions voisins est éliminé ; on ajoute un pion dans les cases vides quand elles sont entourées de trois pions exactement. En appliquant ces règles itérativement, les motifs initiaux évoluent, grossissent parfois, meurent aussi dans certains cas. Décrit pour la première fois dans la rubrique d'octobre 1970, ce jeu eut tant de succès parmi les utilisateurs d'ordinateurs que de nombreux laboratoires publics et privés furent paralysés pendant des mois : les informaticiens détournaient le matériel informatique de ses utilisations normales, afin de tester le Jeu de la vie.

J. Conway collabora ensuite avec Richard Guy et Elwyn Berlekamp, à qui l'on doit l'une des plus belles œuvres de mathématiques récréatives de ce siècle : le livre *Winning Ways* («Stratégies gagnantes»), publié en 1982. Les deux tomes de cet ouvrage contiennent notamment la présentation d'un jeu remarquable nommé Phutball, qui se joue à deux sur un plateau de go avec des pions qui sont tous de la même couleur. La «phutballe» est initialement placée au centre du damier, et les joueurs, qui jouent à tour de rôle, peuvent soit placer un jeton sur une intersection vide, soit déplacer la phutballe en la faisant sauter par-dessus une chaîne continue de jetons alignés dans n'importe quelle direction horizontale, verticale ou diagonale ; les



jetons par-dessus qui la phutballe a sauté sont alors retirés du damier. Comme aux dames, des sauts peuvent s'enchaîner si la configuration s'y prête. Le but du jeu est de faire franchir à la phutballe la ligne de but adverse.

De nombreux autres mathématiciens m'ont aidé. Frank Harary, de l'Université d'État du Nouveau-Mexique, m'a invité à faire connaître son jeu de morpion généralisé : au lieu de chercher des alignements de X ou de O sur un réseau 3×3 , les joueurs doivent réaliser un polyomino spécifié, tel un L ou un carré. De même, Ronald Rivest, de l'Institut de technologie du Massachusetts, m'a encouragé à révéler le système de codage à clef publique qu'il inventa avec M. Shamir et L. Adel-

man : ce système, qui révolutionna la cryptologie, est aujourd'hui utilisé dans la majorité des systèmes électroniques.

J'ai également fait connaître les œuvres de Maurits Escher en 1961, ainsi que les pavages non périodiques de Roger Penrose, physicien et mathématicien d'Oxford. Penrose découvrit ses pavages en s'amusant, mais ils eurent ensuite une application insoupçonnée. Il conçut initialement deux sortes de formes, les oiseaux et les flèches, avec lesquelles il parvint à couvrir le plan, mais seulement de manière non périodique : aucune partie du dessin ne se répète. Plusieurs années après la découverte de ces pavages, la physique du solide découvrit des structures chimiques nouvelles, dont la description imposa l'usage de pavages tridimensionnels de Penrose. Depuis, les physiciens ont publié des centaines de textes sur ces objets, qui ont des propriétés mécaniques si remarquables qu'on en fait maintenant des poêles anti-attachantes et très résistantes. Cette découverte de mathématiques récréa-

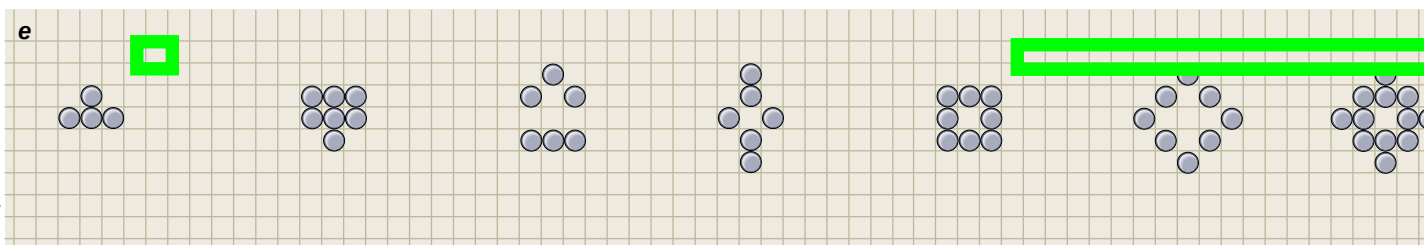
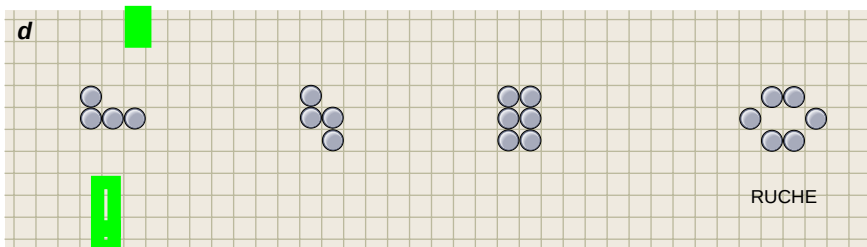
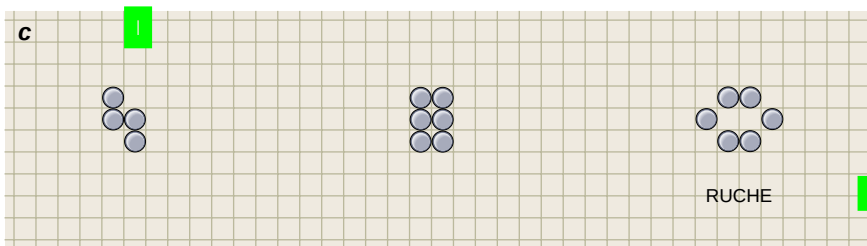
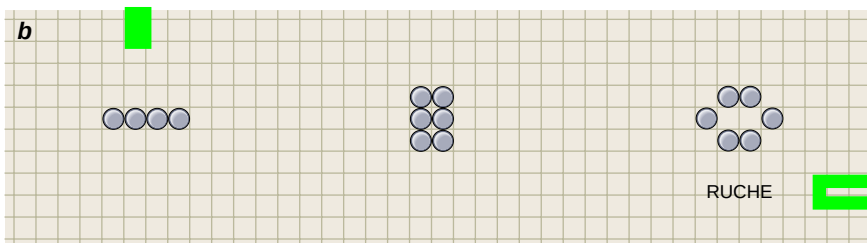
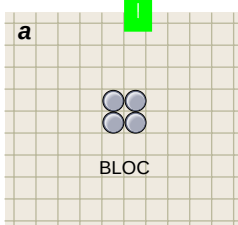
tives est ainsi devenue la base d'une partie importante de la physique du solide.

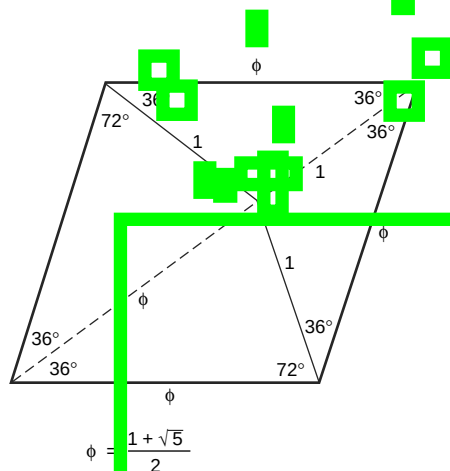
La chasse d'eau de Léonard

Les deux articles qui m'ont valu le plus de courrier sont ceux du 1^{er} avril 1975 et celui où je présentai le paradoxe de Newcomb. Dans ma chronique d'avril, je me plaignais de l'importance que les journaux consacrent aux phénomènes paranormaux et je prétendais présenter de grandes avancées scientifiques qui auraient pâti du désintérêt pour les sciences. Parmi les découvertes les plus remarquables, je mentionnais une réfutation de la théorie de la relativité et la découverte de la chasse d'eau par Léonard de Vinci. J'indiquais aussi une ouverture d'échecs que je prétendais gagnante, et j'écrivais que le nombre e (la base des logarithmes, égal à 2,718...) élevé à la puissance $\pi \times \sqrt{163}$ était un nombre entier (262 537 412 640 768 744).

À ma grande surprise, des milliers de lecteurs prirent cet article au sérieux. Il contenait notamment une carte compliquée, où je signalais que quatre couleurs ne suffisaient pas pour que deux régions adjacentes soient toujours de couleurs différentes. Des centaines de lecteurs m'envoyèrent leurs coloriages de la carte, avec quatre couleurs seulement, mais je n'en fus pas étonné : le

5. DANS LE JEU DE LA VIE, inventé par le mathématicien John Conway, des formes évoluent en raison de l'application répétée de trois règles simples, qui conduisent à l'ajout ou à la suppression d'un pion : tout pion entouré de deux ou trois autres pions reste en place (on considère les pions de toutes les cases adjacentes par un côté ou par un sommet) ; tout pion ayant 0, 1, 4, 5, 6, 7 ou 8 pions voisins est éliminé ; on ajoute un pion dans les cases vides quand elles sont entourées de trois pions exactement. Avec ces règles, on observe qu'un bloc carré (a) reste stable, parce que chacun de ses quatre pions a exactement trois voisins et qu'aucune case vide n'a trois voisins. Les trois formes indiquées en b, c et d évoluent vers la « ruche », qui est stable. Le cinquième arrangement évolue en dix étapes pour former un clignotant.



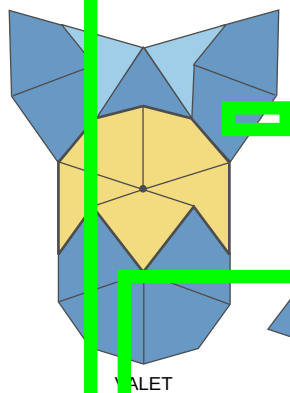


6. ON RÉALISE UN DES PAVAGES DE PEN-ROSE en divisant un losange en deux pièces que l'on nomme «oiseau» et «flèche», de sorte que le rapport de leurs diagonales soit égal à ϕ , le nombre d'or, égal à $(1 + \sqrt{5})/2$ (voir le schéma ci-dessus). Quand on juxtapose cinq flèches, on obtient une étoile (en jaune, sur la figure en haut à droite). Si on place alors dix oiseaux autour de l'étoile et si l'on étend le pavage symétriquement, on construit une structure étoilée infinie. On peut aussi paver le plan à l'aide du deux, du valet et de la reine (en bas à droite).

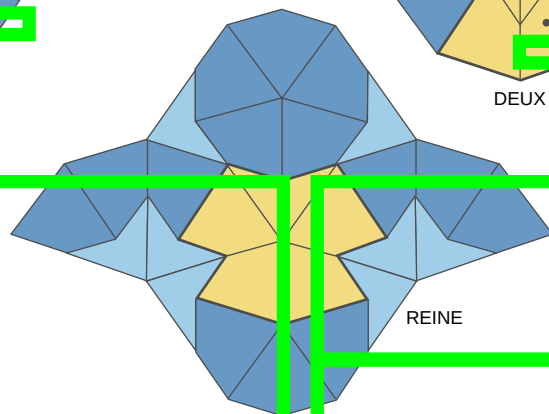
théorème des quatre couleurs avait été démontré l'année précédente.

Le physicien William Newcomb, d'autre part, inventa le paradoxe qui porte aujourd'hui son nom et qui fut publié pour la première fois par le philosophe Robert Nozick, de l'Université Harvard. Imaginons deux boîtes fermées, A et B, qui contiennent respectivement 1 000 francs et soit 0, soit un million de francs. Vous avez deux possibilités : prendre seulement la boîte B ou prendre les deux boîtes. Avec des boîtes normales, le choix est vite fait : si vous prenez les deux boîtes, vous récupérerez à la fois le contenu de la boîte A et celui de la boîte B. Imaginons toutefois qu'un être supérieur puisse prévoir votre choix et modifier le contenu de la boîte B : s'il prévoit que vous choisirez les deux boîtes, il vide la boîte B, de sorte que vous n'avez finalement que les 1 000 francs de la boîte A ; s'il prévoit que vous choisirez seulement la boîte B, il y met un million de francs.

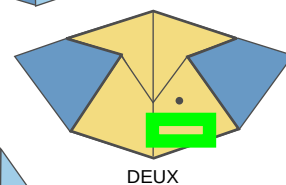
Si vous admettez que l'être supérieur ne se trompe pas, vous devez choisir



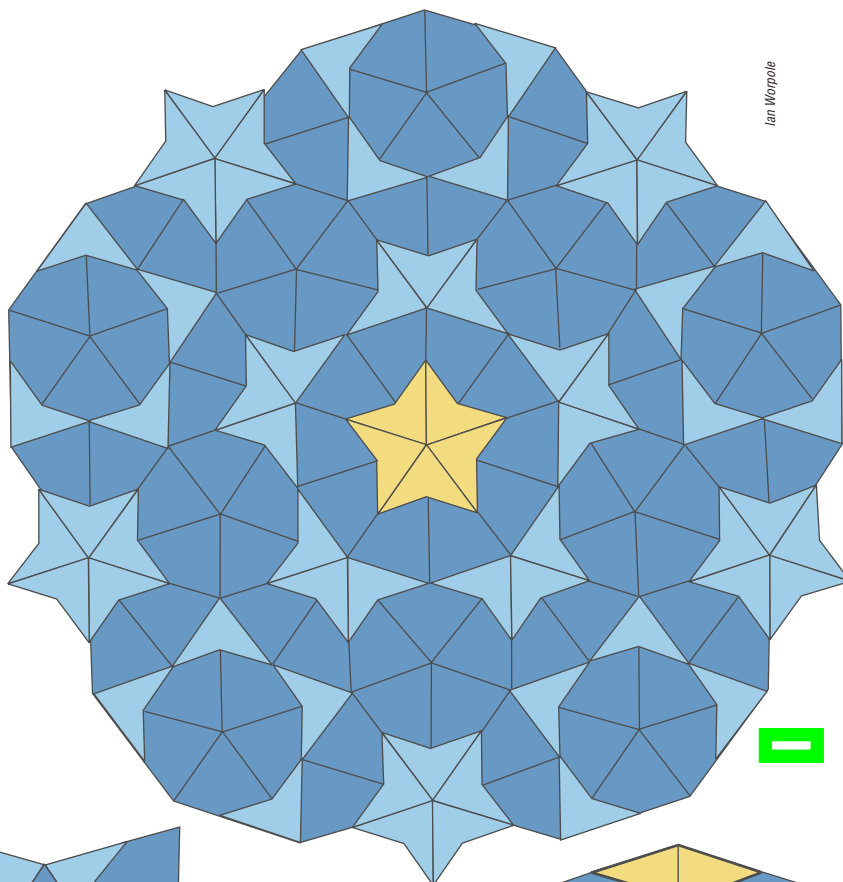
VALET



REINE



DEUX



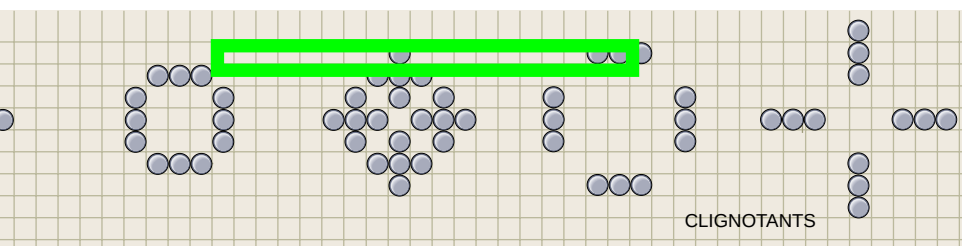
Ian Worpole

seulement la boîte B, afin de gagner un million de francs. Toutefois ce raisonnement simple est fautif : l'être supérieur fait sa prévision avant que vous ayez choisi, et il n'a pas le pouvoir de changer ensuite le contenu des boîtes. Au moment où vous choisissez, la boîte B est soit vide, soit pleine d'un million de francs. Si elle est vide, votre gain

est nul si vous choisissez seulement B, tandis que si vous prenez les deux boîtes, vous gagnez 1 000 100 francs si la boîte B contient un million de francs. Selon ce nouveau raisonnement, vous devez choisir les deux boîtes.

Les deux raisonnements semblent inattaquables, mais ils ne peuvent être tous les deux justes. C'est là le paradoxe de Newcomb, qui me valut tant de lettres de lecteurs que je ne pus y répondre : je dus les transmettre à R. Nozick, qui me donna la teneur d'une réponse collective. À ce jour, le paradoxe reste irrésolu. J'y vois personnellement l'impossibilité d'un être supérieur qui prévoirait nos décisions.

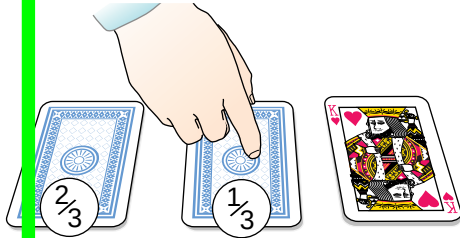
Si la logique est une branche importante des mathématiques récréatives,



CLIGNOTANTS

Réponses aux quatre problèmes de la page 87

1. La plupart des personnes qui examinent ce problème pensent que la probabilité passe de $1/3$ à $1/2$ quand on retourne une figure : deux cartes seulement sont retournées, et l'une doit être l'as. Pourtant la probabilité reste égale à $1/3$. En effet, la probabilité que vous n'ayez pas trouvé l'as reste égale à $2/3$, mais votre ami a éliminé une partie de l'incertitude en montrant une des cartes non choisies, qui n'est pas un as. Il reste donc une probabilité égale à $2/3$ que l'autre carte non choisie soit l'as. Si votre ami vous accorde la possibilité de changer votre choix, vous devez saisir



J'ai présenté ce problème en octobre 1959 sous une forme un peu différente : au lieu de trois cartes, je considérais trois prisonniers, dont un avait été gracié. En 1990, Marilyn vos Savant, l'auteur d'une chronique dans le magazine *Parade*, proposa une version différente du même problème, avec trois portes et une voiture derrière l'une d'elles. Elle donna la réponse exacte, mais reçut des milliers de lettres de lecteurs en colère (beaucoup étaient des mathématiciens), l'accusant d'ignorer la théorie des probabilités. L'affaire fit même la une du *New York Times*. Plus récemment, Jean-Paul Delahaye a également mentionné le problème dans un article intitulé *Persée, Piégasse et Andromède*, ajoutant une simulation numérique pour achever de convaincre les sceptiques.

2. La somme est 141, parce que la matrice est une table addition à l'ancienne. Elle est engendrée par deux ensembles de nombres : (3, 1, 5, 2, 4, 0) et (25, 31, 13, 1, 7, 19). Chaque nombre de la matrice est la somme d'un nombre du premier ensemble et d'un nombre du second ensemble. Lorsque vous choisissez les six nombres que vous enroulez, vous sélectionnez six paires de nombres, incluant les 12 générateurs. Aussi la somme de ces six nombres est toujours égale à celle des 12 générateurs.

	3	1	5	2	4	0
25	28	26	30	27	29	25
31	34	32	36	33	35	31
13	16	14	18	15	17	13
1	4	2	6	3	5	1
7	10	8	12	9	11	7
19	22	20	24	21	23	19

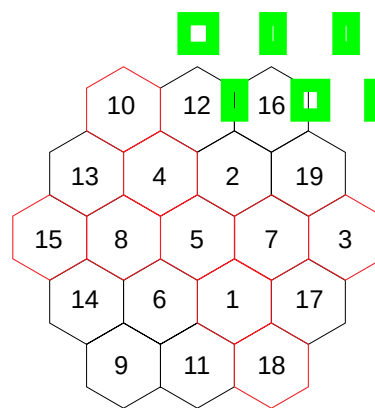
3. Toutes les chaînes de mots convergent. Ce résultat peut sembler providentiel, mais il n'est que la conséquence du principe découvert par le mathématicien Martin Krukal dans les années 1970. Lorsque le nombre total de mots est notablement supérieur au nombre de lettres du mot le plus long, les paires de chaînes de mots conduisent généralement au même mot final. Au-delà, toutes les chaînes sont identiques. Pour le vérifier, prenez de plusieurs mots et tracez les chaînes.

premier

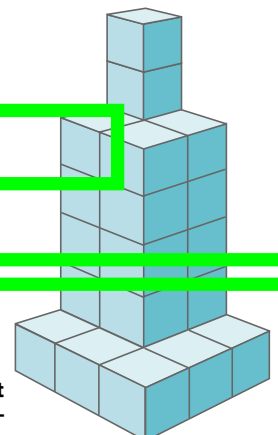
4. Pour simplifier, imaginez un jeu de dix cartes avec les couleurs noire (N) et rouge (R) alternées : NRNRNRNRNR. Si vous coupez comme indiqué, vous obtenez deux paquets de cinq cartes : NRNRN et RNRNR. Au début du mélange, les deux cartes au sommet des paquets sont de couleurs différentes. Si, par exemple, la première carte obtenue par le mélange est N (du premier paquet), les deux cartes à la base des deux paquets restants seront R, de sorte que la génération d'une nouvelle carte créera une paire RN. Si une carte R tombe en première, les deux cartes à la base seront N, de sorte qu'une paire NR se formera ensuite. On répète ensuite le raisonnement pour conclure que toutes les paires seront NR ou RN.



Ce phénomène résulte du principe de Gilbreath, d'après le nom de son découvreur, le magicien californien Norman Gilbreath. Les magiciens l'ont utilisé dans des centaines de tours de cartes.



CET HEXAGONE est "magique" : la somme des nombres de n'importe quelle ligne est égale à 38.



LE GRATTE-CIEL ne peut être formé à partir des poly-cubes de Soma.

les nombres, également, sont l'objet de problèmes variés. Les carrés magiques, notamment, intéressent les amateurs depuis très longtemps. Un carré est magique quand les nombres qui y figurent ont la particularité que leurs sommes, par ligne, par colonnes ou selon les deux diagonales, sont toutes égales. On utilise généralement des nombres entiers consécutifs, à partir de 1. Il n'existe qu'un seul carré magique d'ordre trois, avec les nombres entiers compris entre 1 et 9 dans un carré de trois cases de côté (aux symétries et aux rotations près). Toutefois, il existe 880 carrés magiques d'ordre quatre, et le nombre de solutions augmente rapidement avec l'ordre des carrés.

Pourquoi le cas des hexagones magiques est-il si différent? En 1963, Clifford Adams, un ancien employé de la Société des chemins de fer *Reading*, m'envoya un hexagone magique d'ordre trois que je transmis à Charles Trigg, mathématicien de Los Angeles : ce dernier prouva que cet hexagone est le seul hexagone magique d'ordre trois et qu'aucun hexagone magique d'un autre ordre n'existe.

Comment se transforme le problème des carrés magiques si l'on n'impose plus que les nombres qui remplissent les cases soient des nombres entiers consécutifs? Si la seule condition est qu'ils soient distincts, on peut construire de nombreux carrés magiques d'ordre trois. Par exemple, il en existe une infinité qui contiennent seulement des nombres premiers. Un carré magique d'ordre trois peut-il être formé de neuf carrés parfaits distincts? Il y a deux ans, dans la revue *Quantum*, j'ai offert 100 dollars à qui résoudrait ce problème, mais je n'ai pas encore dû récompenser quelqu'un qui aurait trouvé un tel «carré de carrés» ; personne n'a non plus, démontré qu'il n'en existait pas. Si un tel carré existe, ses nombres doivent être gigantesques, voire hors d'atteinte des ordinateurs les plus rapides. Pourquoi les mathématiciens s'acharneraient-ils à trouver une telle solution, sachant que sa connaissance ne servirait probablement à rien? Simplement parce qu'ils ne peuvent supporter de supputer l'existence d'une solution sans la démontrer.

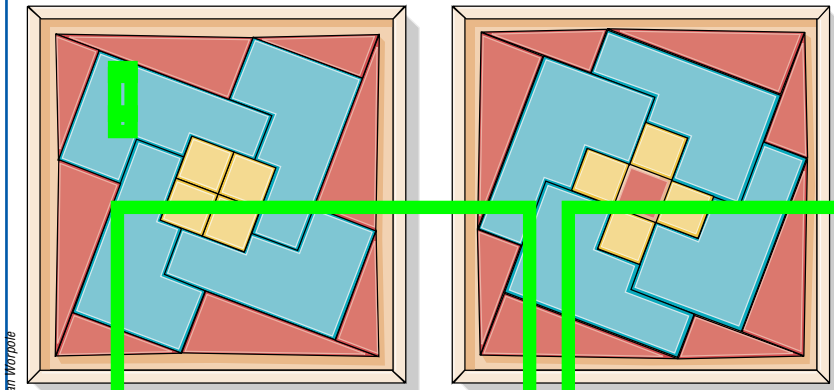
Cet intérêt général pour les nombres inspira certains articles (environ un par an) où j'évoquai mes rencontres avec un numérologiste que je nommai le docteur Irving Joshua Matrix. Ce personnage s'intéressait aux étranges

Le paradoxe de l'aire manquante

Considérons les deux pavages ci-dessous. Chacun est composé des mêmes 16 pièces : quatre grands triangles rectangles rouges, quatre petits triangles rectangles rouges, quatre octogones bleus et quatre carrés jaunes. Dans le pavage de gauche, les pièces s'assemblent parfaitement, mais, dans le pavage de droite, un petit carré n'est

pas recouvert, au centre. Comment cela est-il possible ? Pourquoi la surface recouverte est-elle plus grande à gauche qu'à droite ?

Le secret de ce paradoxe, montré dans un article de 1961, sera révélé dans la rubrique « Tribune des lecteurs » du prochain numéro de *Pour la Science*.



propriétés numériques des nombres ou des mots (notez le nombre 666 formé par les nombres de lettres des trois parties de son nom). De nombreux lecteurs ont supposé que le docteur Matrix et sa jolie fille Iva Toshivori étaient réels. Un lecteur japonais, en particulier, me signala que Toshivori était un nom de famille des plus curieux, parce qu'il signifie « le vieil homme », en japonais : effectivement j'avais trouvé ce mot sur une carte de Tokyo et je l'avais donné à la fille du docteur Matrix, parce que j'avais décidé que celle-ci serait japonaise par sa mère.

Je regrette que ma rubrique se soit achevée avant 1997 : je n'aurais pas manqué d'interroger le docteur Matrix à propos de ce grotesque best seller inti-

mulé *La Bible : le code secret*, et j'aurais démontré les prétentions de son auteur. Celui-ci prétend prévoir l'avenir à partir des combinaisons de lettres que l'on peut extraire du texte hébreu de l'Ancien Testament en partant d'une lettre, puis en sautant un nombre donné de lettres plus loin, puis en sautant encore du même nombre de lettres plus loin, et ainsi de suite. Ce système aurait plu au docteur Matrix, mais méfions-nous de la numérologie : elle permet, par des procédés analogues, de trouver des sens dans n'importe quel ensemble de données ; le système de *La Bible : le code secret*, notamment, conduit également à des prévisions quand on l'utilise pour explorer *Guerre et Paix* ou *La recherche du temps perdu* !

Martin GARDNER est l'auteur de plus de 70 livres de science, de mathématiques, de philosophie ou de littérature. C'est une figure de la lutte contre le paranormal.

W.W. ROUSE BALL et H.S.M. COXETER, *Mathematical Recreations and Essays*, 13th édition, Dover Publications, 1987.

La mathématique des jeux, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1990.

Visions géométriques, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1990.

Martin GARDNER, *Jeux mathématiques du Scientific American* (adapté par Yves Rousseau), Association pour le développement de la culture scientifique, Amiens, 1990.

Jean-Paul DELAHAYE, *Logique, informatique et jeux logiques*, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1990.

Yvon L'HOSPITALIER, *Énigmes et jeux logiques, résolution et construction*, éditions Eyrolles, Paris, 1998.

Bernard GERVAIS, *Les carrés magiques de 5*, éditions Eyrolles, Paris, 1998.

L'irrigation à l'eau de mer

EDWARD GLENN • JED BROWN • JAMES O'LEARY

La culture de plantes résistant au sel permettrait la production d'aliments pour le bétail dans des zones désertiques.

Que mangeront les populations des pays tropicaux et subtropicaux dans 30 ans ? Selon l'Organisation des Nations unies, ces pays devront cultiver environ 200 millions d'hectares supplémentaires (soit l'équivalent d'un peu moins du tiers de la France) pour satisfaire leurs besoins alimentaires. Ils ne disposent toutefois que de 93 millions d'hectares potentiellement cultivables, dont la plus grande partie est aujourd'hui couverte de forêts, qu'il conviendrait plutôt de protéger.

L'eau, également, risque de manquer. Or, bien que 97 pour cent de l'eau présente sur la Terre se trouvent dans les océans, aucune des cinq plantes qui nourrissent l'essentiel de la population mondiale (le blé, le maïs, le riz, la pomme de terre et le soja) ne tolère le sel : arrosées par de l'eau de mer, elles se ramollissent lamentablement, puis elles se flétrissent et meurent en quelques jours. L'agriculture classique nécessite l'eau douce des rivières, des lacs, des nappes aquifères ou au moins de la pluie.

Pourtant, de nombreuses plantes qui résistent au sel poussent sur des terrains salés ou en présence d'eau de mer. Nous en avons cultivé dans les sols salonneux de régions désertiques. Ce type de culture pourrait résoudre la fois les pénuries d'eau et de terre : 43 pour cent de la surface des terres émergées est aride ou semi-aride, et environ 15 pour cent des déserts salés ou semi-salés seraient cultivables avec une irrigation à l'eau de mer, soit 130 millions d'hectares de nouvelles terres agricoles.

De telles cultures seront rentables si le coût de pompage de l'eau de mer est compensé par la vente des produits de culture. En outre, l'irrigation à l'eau de mer est durable si elle ne dégrade pas les sols. Nous avons montré que, à certaines conditions, ces deux objectifs sont réalisables.

L'irrigation à l'eau de mer est une idée ancienne, mais elle n'a été sérieusement expérimentée qu'il y a 50 ans : en 1949, Hugo et Elisabeth Boyko vont à Eilat, au bord de la mer Rouge, pour créer des paysages qui attireraient de nouveaux colons en Israël. Manquant d'eau douce, ils irriguent leurs plantations avec l'eau saumâtre d'un puits et avec de l'eau de mer ; ils observent que de nombreuses plantes poussent dans un sol sableux, au-delà de leurs limites normales de salinité. Bien que les explications qu'ils donnent de ce résultat soient fausses, leur travail est le point de départ de nombreuses recherches agronomiques.

Pas d'acclimatation au sel

Ces recherches ont suivi deux directions : l'acclimatation au sel d'espèces déjà cultivées, et la domestication de nouvelles espèces résistant au sel. En 1979, Emmanuel Epstein et ses collègues de l'Université de Davis obtiennent de petites quantités d'orge en irriguant avec de l'eau de mer des variétés issues de plusieurs générations cultivées en présence de faibles concentrations de sel. Malheureusement, aucune sélection classique, ni par insertion de gènes de résistance au sel par génie génétique, n'a produit de plante réellement cultivable. La salinité maximale, pour l'irrigation à long terme des espèces cultivées les plus tolérantes, tel le palmier dattier, est environ cinq grammes par litre, alors que la concentration de l'eau de mer est normalement de 35 grammes par litre (et plutôt de 40 grammes par litre le long des déserts côtiers tels que ceux de la mer

Rouge du Nord du golfe de Californie et du golfe Persique).

Nous avons adopté l'autre approche : la domestication de plantes sauvages halophytes, c'est-à-dire tolérantes au sel. Cette approche nous semblait plus naturelle, car les plantes que nous cultivons aujourd'hui étaient initialement des espèces sauvages, et des populations se sont déjà nourries d'halophytes. Ainsi les indiens Cocopah, à l'embouchure du Colorado, dans le golfe de Californie, consommaient des graines de l'herbe de Palmer (*Distichlis palmeri*).

Quelque 2 500 espèces halophytes, de toutes tailles (graminées, buissons et arbres), occupent des habitats variés, des marais côtiers aux déserts continentaux salés. Après en avoir collecté plusieurs centaines, nous avons évalué

1. LES SALICORNES (ici, *Salicornia bigelovii*) poussent généralement dans des marais côtiers. On pourrait les cultiver, ainsi que d'autres plantes résistant au sel, dans les déserts côtiers pour nourrir le bétail et produire de l'huile.

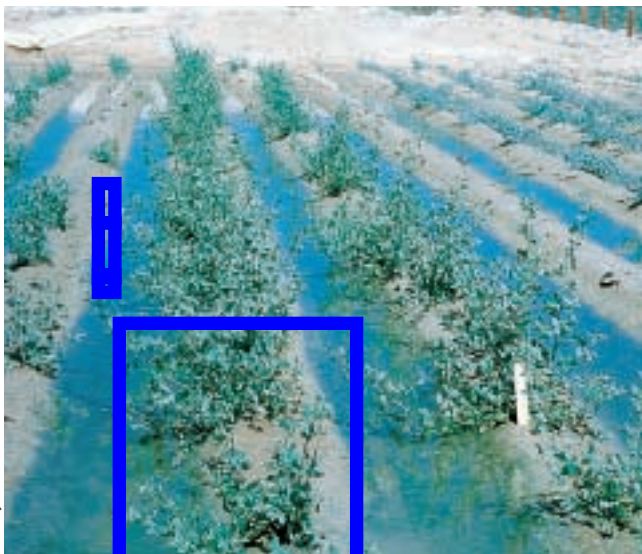


en laboratoire leur résistance au sel et leurs exigences nutritionnelles. Nous en avons retenu une douzaine, que nous avons tenté de cultiver, à partir de 1978, dans le désert côtier de Puerto Peñasco, sur la côte Ouest du Mexique. À l'aide d'eau de mer puisée directement dans le golfe de Californie, nous submergeons quotidiennement les champs : les 90 millimètres de pluie annuelle moyenne étaient négligeables devant les 20 mètres d'eau de mer apportés en un an. Nous avons obtenu ainsi jusqu'à deux kilogrammes de biomasse sèche par mètre carré, à peu près autant

que si nous avions cultivé de la luzerne en l'irriguant avec de l'eau douce.

Parmi les halophytes les plus productives et les plus tolérantes au sel, on trouve plusieurs espèces de salicornes (*Salicornia*), de soude maritime (*Suaeda*) et le buisson à sel (*Atriplex*), de la famille des Chénopodiacees (qui rassemble près de 20 pour cent de toutes les espèces halophytes). Nous avons aussi obtenu de bons résultats avec des espèces herbacées telles les *Distichlis* (de la famille des Poacées) et des espèces à tiges rampantes et à feuilles succulentes telles que les *Batis* (de la famille des Batidacées).





2. L'AGRICULTURE À L'EAU DE MER se fait par l'irrigation des champs (à gauche, pour une culture d'Atriplex, qui peut être transformée en fourrage pour le bétail) ou par aspersion (au centre) : on équipe alors les champs de tuyaux en plastique pour éviter la corrosion des parties métalliques, au contact de l'eau de mer. Avec de simples réglages, les moissonneuses-batteuses récoltent ensuite les graines de salicorne (à droite).



Ces plantes sont-elles utilisables pour l'alimentation ? De nombreuses halophytes sont riches en protéines et en sucre, mais, pour survivre dans l'environnement salin, elles accumulent aussi beaucoup de sel qui réduit leur valeur nutritive parce qu'il n'apporte pas d'énergie tout en occupant du volume. La salinité élevée des halophytes limite aussi la quantité qu'un animal peut ingérer. Dans les pâturages ouverts, les halophytes ne sont généralement que des plantes de réserve, que les animaux paissent après l'épuisement des autres espèces.

Nous avons alors nourri des moutons et des chèvres en remplaçant 30 à 50 pour cent de leur ration de foin par des halophytes, *Salicornia*, *Suaeda* et *Atriplex* : les animaux ont pris autant de poids qu'un groupe témoin, nourris exclusivement au foin, et la qualité de leur viande n'a pas été modifiée. Contrairement à nos craintes initiales, les animaux ne montraient aucune aversion envers les halophytes ; ils semblaient même attirés par leur

goût salé, mais ils devaient puiser plus d'eau que ceux qui ne mangeaient que du foin, afin de compenser l'ingestion supplémentaire de sel. Au total, la quantité de viande formée par kilogramme de nourriture était inférieure de dix pour cent à celle du groupe témoin.

Le potentiel de la salicorne

L'halophyte la plus prometteuse que nous ayons cultivée jusqu'à présent est la salicorne *Salicornia bigelovii*. Cette plante annuelle sans feuilles pousse dans les marais salés qu'elle colonise grâce à sa abondante production de graines. Ces dernières contiennent autant d'huile (30 pour cent) et de protéines (35 pour cent) que le soja et d'autres oléagineux, et moins de trois pour cent de sel. Cette huile a une composition en acides gras analogue à celle de l'huile de carthame : les molécules, composées de glycérol lié à trois acides gras (des molécules composées exclusivement de carbone et d'hydrogène, à l'exception d'un groupe acide-COOH),

comportent plusieurs doubles liaisons entre les atomes de carbone ; cette « poly-insaturation » les rend diététiquement intéressantes. On l'extrait et on la raffine avec les mêmes installations que pour les autres oléagineux. Enfin, cette huile comestible possède un agréable goût de noix et une texture semblable à l'huile d'olive.

Les graines sont immangeables sans traitement, car elles contiennent des composés amers, nommés saponines. Ces dernières ne passent pas dans l'huile, mais ils restent dans les tourteaux et limitent les quantités que l'on peut mélanger à la ration alimentaire de poulets. Toutefois, aux quantités habituellement utilisées pour les compléments protéiques, on peut utiliser les tourteaux de salicorne dans l'alimentation du bétail : toutes les parties de la plante sont donc consommables.

Nous avons contribué à la création de plusieurs fermes expérimentales de culture de salicorne couvrant jusqu'à 250 hectares au Mexique, en Arabie saoudite et en Inde. Au cours

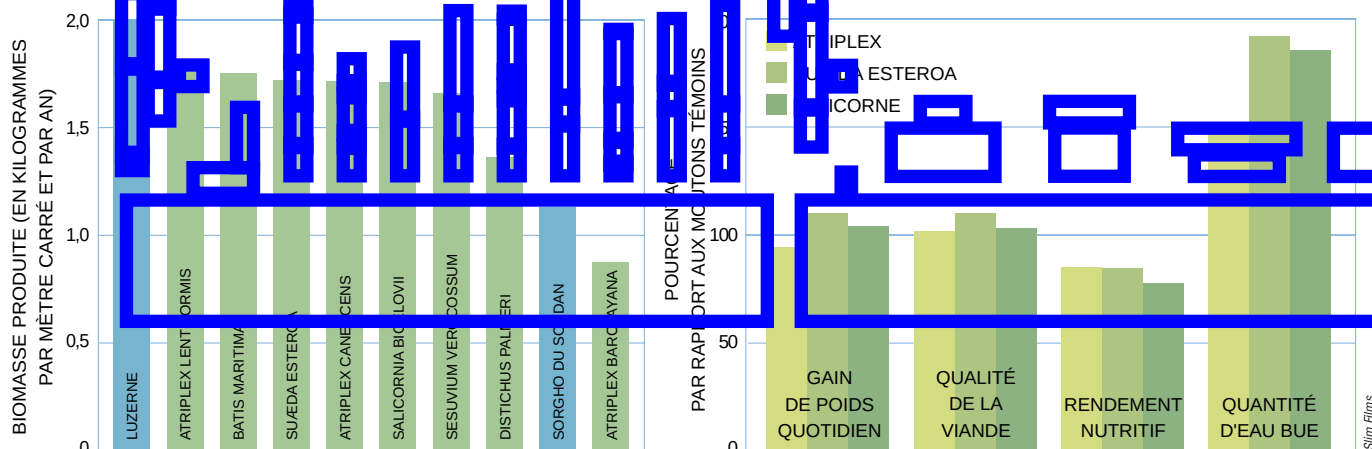
des six années d'essais en champ, au Mexique, les salicornes ont produit en moyenne 1,7 kilogramme de biomasse totale par mètre carré et 0,2 kilogramme d'huile par mètre carré. De tels rendements sont égaux, voire supérieurs, à ceux du soja et d'autres oléagineux irrigués à l'eau douce. Nous avons modifié les systèmes d'irrigation pour les protéger de la corrosion par l'eau de mer : dans les systèmes d'aspersion courants, nous insérons des tubes en matière plastique qui préviennent la corrosion des parties métalliques par

l'eau de mer. De même, on récolte les petites graines de salicorne, qui ne pèsent qu'environ un milligramme, à l'aide de moissonneuses-batteuses ordinaires réglées spécialement. Nous n'avons pas rencontré d'obstacle insurmontable lors du passage du champ d'essai à l'échelle des fermes pilotes.

De l'eau, mais pas trop

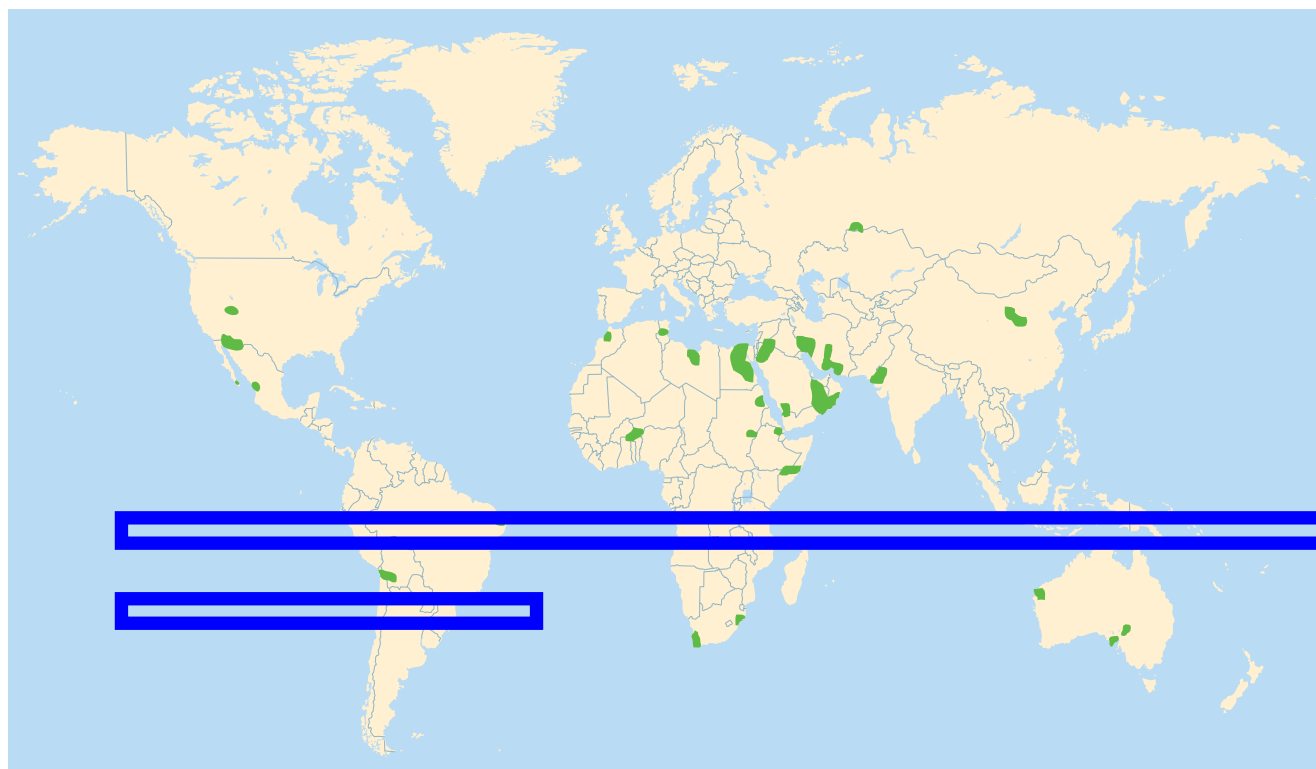
Quand on irrigue à l'eau de mer, on doit modifier les pratiques agricoles. Avec de l'eau douce, les cultures ne sont

irriguées que lorsque le sol contient moins de 30 pour cent de sa capacité d'absorption d'eau, et l'on n'ajoute que la quantité d'eau qui a été absorbée par les plantes. En revanche, avec de l'eau de mer, l'irrigation doit être suffisante pour que le sel ne s'accumule pas près des racines à des concentrations qui stopperaient la croissance des plantes : lors de nos premiers essais, nous inondions quotidiennement les champs, ce qui coûtait cher en pompage. Pourrions-nous réduire l'irrigation sans faire chuter le rendement ?



3. LES RENDEMENTS de cultures tolérantes au sel et irriguées à l'eau de mer sont proches de ceux de deux plantes classiques irriguées à l'eau douce et utilisées pour l'alimentation du bétail : le foin de luzerne et le foin de sorgho du Soudan (à gauche, barres bleues). Des moutons nourris avec un complément de plantes tolérantes au

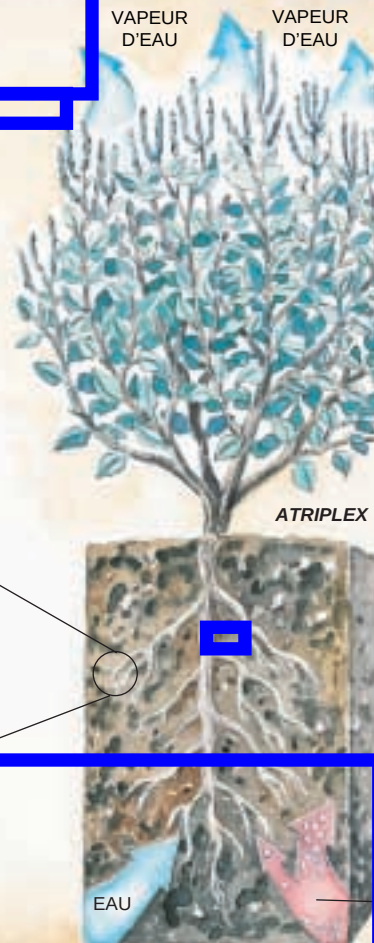
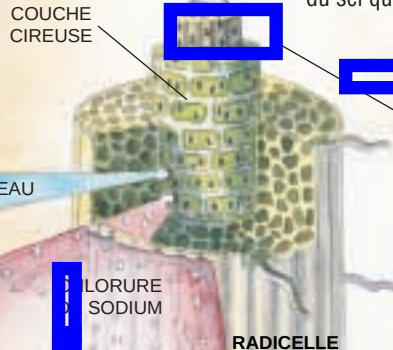
sel, tel l'*Atriplex*, les salicornes ou la *Suaeda*, prennent autant de poids que des moutons nourris seulement avec du foin, et leur viande est de qualité équivalente, bien qu'il faille les nourrir un peu plus pour obtenir la même masse de viande et qu'ils boivent presque deux fois plus d'eau (à droite).



4. DES DÉSERTS SALÉS (en vert) pourraient accueillir des cultures irriguées à l'eau de mer ou avec de l'eau de nappes aquifères salées.

Anatomie d'une halophyte

Certaines plantes tolérantes au sel, ou halophytes, ont dans leurs racines, dans leurs feuilles ou dans leurs cellules plusieurs mécanismes de protection contre l'eau de mer. Les cellules de la couche externe de chaque radicule sont presque imperméables au chlorure de sodium. De plus, les cellules de la couche interne sont reliées par une couche cireuse, qui évite la diffusion de l'eau salée entre elles ; l'eau traverse alors ces cellules, où elle est débarrassée de la plus grande partie du sel qu'elle contient.



CHLORURE DE SODIUM À SEL

COUPE D'UNE FEUILLE

VAPEUR D'EAU

EAU

CHLORURE DE SODIUM

PRESSION DE TURGESCEANCE

CHLORURE DE SODIUM

CELLULE DE FEUILLE

Richard Jones

Afin d'étudier cette question, nous avons installé, dans les champs d'essai, des sacs aux parois latérales étanches et au fond percé de trous. Nous avons cultivé les zones ainsi équipées comme le reste du champ, et nous avons collecté l'eau d'infiltration qui en sortait, mesurant son volume et sa concentration en sel. Nous avons ainsi démontré que la salicorne a besoin de trois mètres d'eau par an, soit 35 pour cent de plus qu'une culture équivalente, telle la luzerne, irriguée à l'eau douce pour fournir le même rendement. Ce supplément d'eau est nécessaire parce que la plante dessale l'eau qu'elle absorbe : la concentration en sel dans l'eau au voisinage des racines est donc bien supérieure à la concentration en sel dans l'eau de mer, et fait chuter le rendement lorsqu'elle dépasse 100 grammes par litre.

L'agriculture à l'eau de mer peut-elle être concurrentielle ? Dans toute culture irriguée, c'est surtout le pompage de l'eau qui coûte : ce coût est directement proportionnel à la quan-

tité d'eau pompée et à la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée. Bien que les halophytes requièrent plus d'eau que des cultures traditionnelles, les exploitations irriguées à l'eau de mer sont situées près du niveau de la mer. La hauteur de pompage est donc faible par rapport à celle des fermes qui doivent puiser leur eau dans des puits de plus de 100 mètres de profondeur parfois. Ces coûts de pompage inférieurs devraient donc compenser les éventuelles infériorités de rendement des cultures irriguées à l'eau de mer dans les régions désertiques. D'autant que, nous l'avons vu, l'agriculture à l'eau de mer n'exige pas d'équipements spécialement coûteux.

La salicorne, qui est aujourd'hui notre plus grande réussite, n'est toutefois pas une culture parfaite. Les tiges versent à l'approche de la moisson, et les graines se dispersent avant la récolte : on ne récupère que 75 pour cent des graines, contre 90 pour cent pour la plupart des autres récoltes. Enfin, pour que les salicornes donnent de bons rende-

ments en grains, les plantes doivent pousser pendant une centaine de jours environ à température fraîche avant la floraison. Aujourd'hui, cette culture est donc limitée aux pays subtropicaux qui bénéficient d'hivers frais et d'étés chauds, alors que certaines des grandes étendues de déserts côtiers sont plutôt situées dans des zones tropicales comparativement plus chaudes.

Éviter l'accumulation du sel

L'agriculture irriguée à l'eau de mer est-elle durable ? Dans les régions arides, on cultive souvent dans des dépressions sans exutoire, et la faiblesse du drainage provoque rapidement, même avec une irrigation à l'eau douce, une accumulation de sel dans la nappe phréatique. Entre 20 et 24 pour cent des zones irriguées par de l'eau douce dans le monde souffriraient de l'accumulation progressive de sel et d'eau dans la zone racinaire. L'installation de systèmes de drainage souterrains

LUMIÈRE
SOLAIRE

Les feuilles de certaines halophytes, tel que *Atriplex*, portent à leur surface des cellules spécialisées appelées glandes à sel, qui stockent l'excédent de chlorure de sodium. Lorsqu'elles sont pleines, ces glandes à sel éclatent et dispersent leur contenu sur les

feuilles : la mince pellicule argentée ainsi formée réfléchit la lumière du soleil et protège la plante du soleil. La vapeur d'eau s'échappe par des pores situés sur la face inférieure des feuilles.

À l'intérieur de chaque feuille, des cellules sont spécialement équipées pour gérer l'excédent de sel absorbé par la plante. La zone de stockage centrale de chacune de ces cellules est garnie de molécules qui permettent l'importation spécifique d'ions sodium ; les ions chlorure suivent. La forte concentration en ions sodium et en ions chlorure attire les molécules d'eau, ce qui maintient les cellules gonflées et la plante dressée.

est coûteuse, et l'évacuation de cette eau drainée pose d'autres problèmes. Ainsi, dans la vallée de San Joaquin, en Californie, les eaux de drainage déversées dans une zone marécageuse ont entraîné la mort et l'apparition de malformations chez des oiseaux aquatiques, car elles contiennent de fortes concentrations en sélénium, un élément assez abondant dans les sols de l'Ouest américain.

L'irrigation à l'eau de mer ne provoquerait pas ces difficultés, parce que

les exploitations établies sur le sol sablonneux des déserts côtiers sont généralement bien drainées. Nous avons ainsi irrigué les mêmes champs en continu avec de l'eau de mer pendant plus de dix ans sans constater d'accumulation d'eau ni de sels dans la zone racinaire. D'autre part, le déversement de sel dans les nappes aquifères des déserts salés n'est pas gênant, puisque ces nappes sont déjà salées. Enfin, comme nous proposons d'installer ces cultures sur des sols quasi nus, nous ne perturberons pas beaucoup les écosystèmes.

Enfin, bien sûr, les engrais chimiques excédentaires risquent de polluer la mer s'ils sont emportés par les eaux de ruissellement et d'infiltration, mais ils ne nuiront pas plus que les engrais des autres activités agricoles côtières. En outre, des cultures d'halophytes permettraient aussi d'épurer l'eau. Ainsi, les premières halophytes que nous avons cultivées au Mexique servaient à traiter les effluents d'un élevage de crevettes : les halophytes consomment une partie des nutriments présents dans les effluents et réduisaient le volume de ces derniers.

Des cultures d'halophytes pourraient aussi épurer les eaux chargées en sélénium de la vallée de San Joaquin. Ces plantes absorbent assez de sélénium pour être utilisables comme complément alimentaire du bétail, mais pas assez pour devenir toxiques.

L'agriculture à l'eau de mer se développerait-elle ? Plusieurs sociétés ont établi des fermes expérimentales de cultures d'halophytes, tels que les *Salicornia* et les *Atriplex*, en Californie, au Mexique, en Arabie saoudite, en Égypte, en Inde et au Pakistan, mais, à notre connaissance, aucune de celles-ci n'est passée au stade de l'exploitation à grande échelle. Ce passage se fera-t-il, sous la pression des besoins alimentaires, de l'augmentation des coûts de production agricole et du manque de terres d'eau douce ?

Edward G. GLENN et James O'LEARY sont professeurs à l'Université d'Arizona, où Jed B. BROWN a préparé sa thèse de doctorat.

Emmanuel GLENN et al., *Saline Culture of Crops : A Genetic Approach*, in *Science*, vol. 210, pp. 399-404, 24 octobre 1980.

Saline Agriculture : Salt Tolerant Plants for Developing Countries, National Academy Press, 1990.

E.P. GLENN, J.W. O'LEARY, M.C. WAT-

SON, T.L. THOMSON et R.O. KUEHL, *Salicornia rigida* Toor : An Oilseed Halophyte for Saline Irrigation, in *Science*, vol. 251, pp. 1065-1067, 1^{er} mars 1991.

H. LIETH et A.A. AL MASOOM, *Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plants*, Série : *Tasks for Vegetation Science*, vol. 28, Kluwer Academic Publishers, 1993.

E.P. GLENN, *Halophytes*, in *Encyclopedia of Environmental Biology*, Academic Press, 1995.



Des sculptures en ciment

IAN STEWART

D'étranges sculptures cimentées d'art, mathématiques et physique.

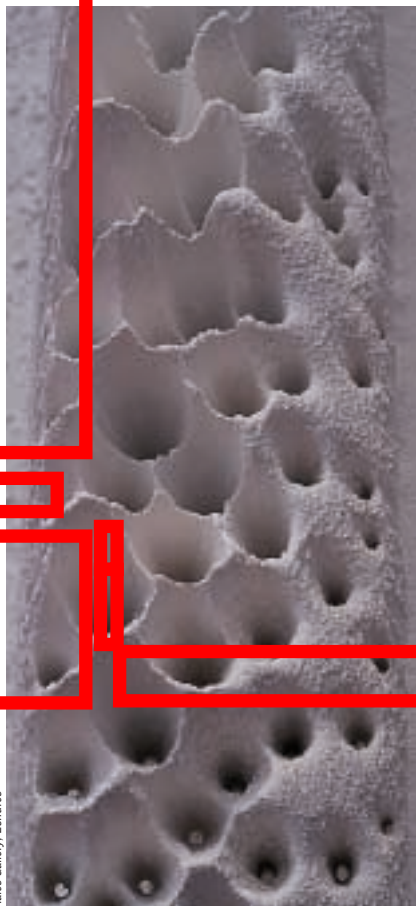
La prestigieuse revue *Nature* est électorale : à côté d'importants articles de recherche, elle publie une chronique intitulée «Art et Science» dont le nom décrit bien le contenu. Dans le numéro du 11 décembre 1997, l'historien d'art Martin Kemp présente les remarquables paysages réalisés par l'artiste londonien Jonathan Callan. Toutefois, ces paysages ne sont pas peints : ce sont des sculptures qui ne ressemblent à rien de ce qui peut se voir sur la Terre ou sur tout autre monde connu. Plus précisément, les paysages naissent quand on verse du ciment sur une planche perforée.

M. Kemp, qui enseigne l'histoire de l'art à l'Université d'Oxford, note une relation entre les sculptures et des travaux récents en théorie de la complexité. Certains principes généraux semblent gouverner les paysages fantastiques de J. Callan. Par exemple, les pics les plus élevés se rencontrent dans les zones les plus éloignées des trous. Dans une lettre publiée dans un numéro suivant de *Nature* (29 janvier 1998), Adrian Webster, un astronome de l'Observatoire royal d'Édimbourg, explique l'étrange géométrie de l'univers de J. Callan à l'aide d'une branche classique des mathématiques, la théorie des cellules de Voronoï. Il rappelle également comment cette dernière illustre l'une des récentes découvertes majeures en astronomie : la structure en mousse de la répartition de matière dans l'Univers. S'il y eut jamais un exemple de l'unité des mathématiques, de l'art et de la science, c'est bien celui-ci.

LA NATURE CRÉATRICE

Depuis les toutes premières peintures rupestres, les artistes ont utilisé des phénomènes physiques et chimiques pour réaliser leurs chefs-d'œuvre : dans la Grèce antique, les sculpteurs savaient comment se fracturent les pierres et

comment le bronze fondu coule dans un moule. Les peintres de la Renaissance connaissaient empiriquement les propriétés des pigments. Habituellement, le modelage des sculptures et la réalisation des peintures résultent de la maîtrise de ces processus physico-chimiques. J. Callan appartient à un petit groupe d'artistes modernes qui veulent abandonner cette maîtrise. Ce n'est plus l'artiste, mais les processus physiques ou chimiques qui déterminent les caractéristiques principales de leurs œuvres.



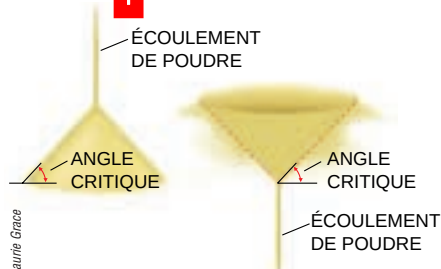
1. Une sculpture en ciment de Jonathan Callan.

Pour obtenir ses paysages, J. Callan part d'une planche horizontale, qu'il perce aléatoirement. Puis il saupoudre régulièrement du ciment sur la planche. Une partie du ciment tombe dans les trous et une autre s'accumule entre ces derniers. La sculpture apparaît lorsqu'elle absorbe l'excès de ciment. Le paysage final est une étrange alternance de pics et de cratères. Parfois, J. Callan le compare à une chaîne de montagnes terrestre : «Une géographie qui semble à la fois éminemment naturelle et hautement artificielle : les Alpes quand elles étaient neuves!»

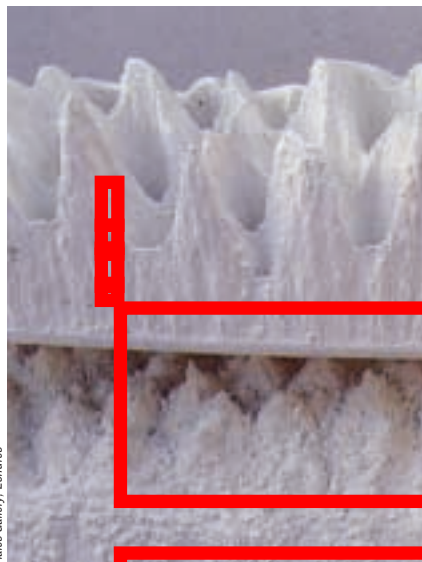
SCULPTURE ET TAS DE SABLE

À propos de ces paysages, on devrait plutôt évoquer des tas de sable. Les ingénieurs civils savent bien comment les matériaux granulaires (sable, terre, ciment en poudre...) s'entassent. La caractéristique la plus simple et la plus importante est l'existence d'un «angle critique» : c'est la pente maximale qu'un tas de sable puisse adopter sans s'écouler. La surface du tas fait alors un angle constant avec le sol : l'angle critique. Quand on verse du sable sur une surface par un conduit assez étroit, la pente du tas augmente jusqu'à atteindre la valeur critique ; au-delà, le sable glisse au long de la pente, engendrant des avalanches qui restaurent la pente critique. Ainsi se forme invariablement – et spontanément – un cône de révolution.

Les spécialistes de la complexité étudient le mécanisme par lequel la pente atteint cette valeur critique et la nature des avalanches, petites ou grosses, qui l'accompagnent. Le physicien danois Per Bak nomma «criticalité auto-organisée» de tels phénomènes, et il proposa qu'ils modélisent nombre d'importantes caractéristiques du monde naturel, en particulier l'évolution des êtres vivants, où les avalanches concernent non des



Laurie Grace



Helen Gallery, Londres

2. Les cratères des sculptures de J. Callan résultent de l'écoulement spontané de la poudre de ciment : quand l'angle d'un tas devient supérieur à un angle critique, une avalanche se déclenche (en haut). Sur la photographie inférieure, qui montre la totalité de la sculpture, on voit la poudre entassée sous la plaque perforée qui porte les cratères.

grains de sable, mais des espèces entières, et où les tas sont des objets dans des espaces imaginaires d'organismes potentiels.

Dans les œuvres de J. Callan, la structure du ciment en poudre autour de chaque trou est l'inverse de celle des tas de sable. Considérons une planche horizontale percée d'un unique trou. Loin de ce dernier, le ciment s'amoncelle dans toutes les directions suivant l'angle critique du ciment en poudre, créant une dépression conique ouverte vers le haut et qui pointe vers le trou (voir la figure 2). Ces cônes sont les cratères qui forment les saisissants paysages de J. Callan.

Quelle est la forme de la surface obtenue quand on dépose le ciment sur une plaque à plusieurs trous ? Chaque grain de ciment pris dans une avalanche s'écoule sous la planche par le trou le plus proche de son point d'impact initial. On peut alors prédire où seront les frontières entre les cratères coniques en divisant la planche en régions entourant chaque trou et for-

mées des points les plus proches de ce trou que de tout autre. Une telle région est le «polygone d'influence» du trou. Si la planche est horizontale, les frontières de ces régions sont celles des cratères adjacents.

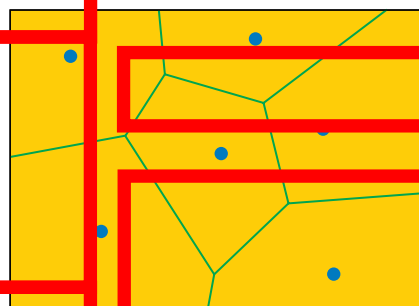
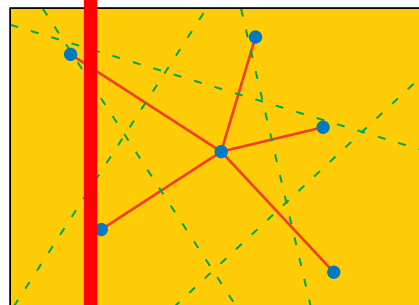
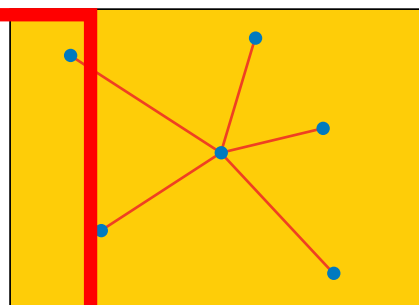
TAS DE SABLE ET COSMOLOGIE

On détermine le polygone d'influence d'un trou en traçant tous les segments joignant ce trou aux autres trous, puis toutes les perpendiculaires à ces segments en leur milieu, c'est-à-dire leurs médiatrices (voir la figure 3). Le résultat est un réseau de médiatrices qui s'entrecroisent. On détermine alors la plus petite région convexe (pour laquelle toute droite qui prolonge n'importe lequel de ses bords ne coupe pas la zone) limitée par ces droites et contenant le trou choisi. Cette «cellule de Voronoï» est la région cherchée. Georgii Voronoï (1868-1908) fut un mathématicien russe qui étudia les entiers des nombres et les pavages dans les espaces à plus de deux dimensions. Les cellules de Voronoï ont quelques autres dénominations (domaines de Dirichlet ou cellules de Wigner-Sitz, par exemple), car elles furent introduites dans de nombreux contextes. Chaque trou est dans une seule cellule de ce type et, toutes les cellules d'un ensemble pavent le plan.

Les cratères de J. Callan sont des cônes ayant tous le même angle (l'angle de pente critique), qui se rencontrent à la verticale des côtés des cellules de Voronoï construites sur le système des trous. Avec cette géométrie, deux pentes se rencontrent à la même hauteur au-dessus de la planche : il n'y a pas de discontinuité de la surface.

Quelle est la forme des arêtes entre deux cratères voisins ? Il s'agit de l'intersection de deux cônes de même hauteur, symétriques par rapport au plan vertical médiateur du segment qui joint le fond des cratères. Cette intersection est contenue dans ce plan médiateur. Quelle courbe obtient-on si l'on coupe un cône par un plan parallèle à son axe ? Les anciens Grecs connaissaient déjà la réponse : une branche d'hyperbole. C'est la raison pour laquelle les paysages de J. Callan sont si étonnants.

Et quel rapport avec l'astronomie ? Prenons des trous dans un plan, imaginons des points dans un espace à trois dimensions, et remplaçons les médiatrices des segments qui joignent les trous par les plans médiateurs des segments qui joignent les points. Pour un point choisi, considérons tous les plans médiateurs des segments joignant



Laurie Grace

3. On trace les cellules de Voronoï en dessinant les médiatrices des segments joignant les trous deux à deux.

ce point à tous les autres. Nous nommerons le core cellule de Voronoï la plus petite région convexe limitée par ces plans et contenant le point considéré. C'est un polyèdre.

Les astronomes ont récemment découvert que la répartition de la matière dans l'univers forme un réseau de tels polyèdres convexes : la majorité des amas galactiques semblent être situés aux frontières d'un tel réseau. Cette structure a été nommée modèle en bulles de Voronoï de l'Univers, car il fait penser à une mousse gigantesque.

Il existe une analogie imparfaite, mais étonnante entre la répartition de la matière dans l'Univers et la répartition du ciment dans les paysages de J. Callan : le ciment des sculptures atteint ses plus grandes hauteurs à la verticale des limites des cellules de Voronoï ; la propriété analogue, dans l'espace tridimensionnel, serait que, lors de l'expansion de l'Univers, la matière se concentre suivant les mêmes frontières. Ainsi la cosmologie rejoint l'art et les mathématiques.

Nature/J. Olesen



Sur la piste du nectar rouge



NESOCODON MAURITIANUS

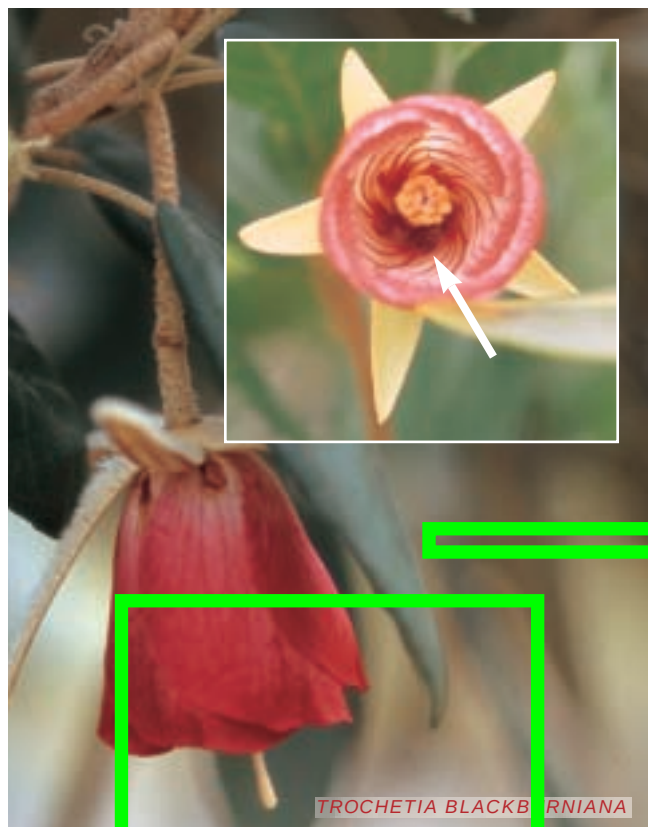


Les plantes à fleurs sont généralement pollinisées par des animaux, insectes, oiseaux, reptiles ou petits mammifères, qu'elles attirent en produisant un liquide sucré et incolore, le nectar. En 1976, on a découvert sur l'île Maurice une fleur de la famille des campanulacées, *Nesocodon mauritianus*, dont le nectar est, étonnamment, rouge (à gauche, la flèche indique une tache de nectar rouge sur la fleur vue de dessous). Deux autres espèces mauriciennes partagent cette anomalie : *Trochetia blackburniana* et *Trochetia boutoniana* (page de droite, en haut ; la flèche indique le nectar rouge au fond de la corolle). Quel avantage la couleur rouge du nectar procure-t-elle à ces plantes ? Renforce-t-elle leur attrait pour les animaux pollinisateurs ? Dans une même zone, plusieurs espèces de plantes sont en concurrence pour attirer les mêmes pollinisateurs, et celle dont les fleurs sont le plus souvent visitées a le plus de chances de se perpétuer.

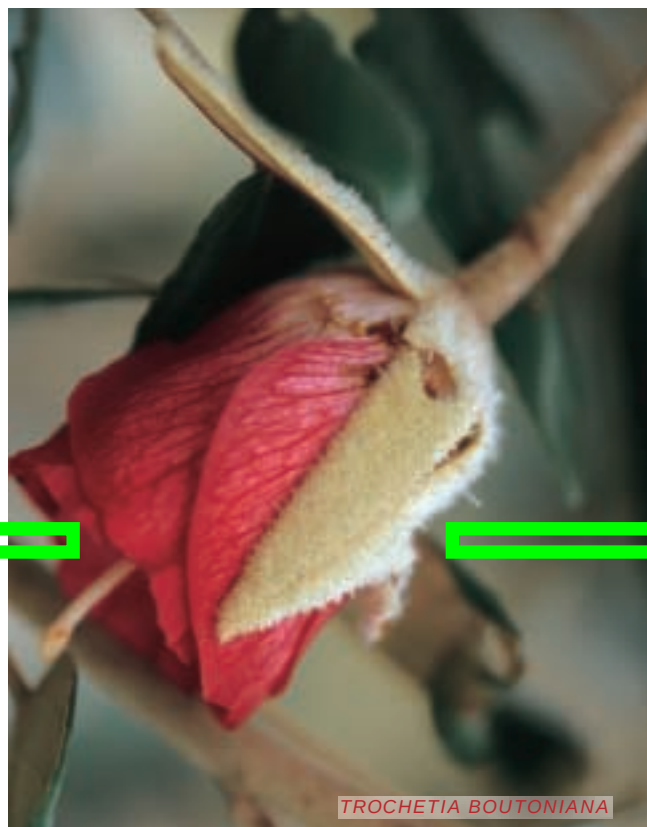
Aujourd'hui, *Nesocodon mauritianus* est pollinisée par le bulbul orphée (*Pycnonotus jocosus*), petit oiseau importé sur l'île à la fin du XIX^e siècle (à gauche, en bas, dans l'ovale bleu), et, dans une moindre mesure, par le merle local (*Hypsipetes olivaceus*). Les *Trochetia* sont pollinisées par les deux oiseaux lunettes autochtones (*Zosterops borbonicus* et *Zosterops chloronothos*).

Quelle espèce pollinisait *Nesocodon mauritianus* avant l'arrivée du premier bulbul orphée sur l'île ? La plante semble ne pousser que sur les falaises abruptes qui entourent une cascade, au Sud-Ouest de l'île (page de droite, en haut). Les oiseaux pollinisateurs autochtones dans cette région sont les oiseaux lunettes, le merle et le Foudi de Maurice, qui ne semblent pas priser cette fleur. Par ailleurs, l'humidité qui règne sur les falaises qui entourent la cascade ne convient pas aux insectes pollinisateurs ni aux geckos, petits lézards qui peuplent les arbres dans les forêts des basses plaines.

Nous avons alors cherché parmi les mammifères. La présence de deux chauve-souris roussettes est attestée sur l'île : *Pteropus niger* et *Pteropus subniger*. La première, assez grande, est surtout frugivore, mais elle s'intéresse aussi aux fleurs : on l'a déjà observée sur des fleurs d'Hibiscus. La seconde espèce s'est



TROCHETIA BLACKBURNIANA



TROCHETIA BOUTONIANA

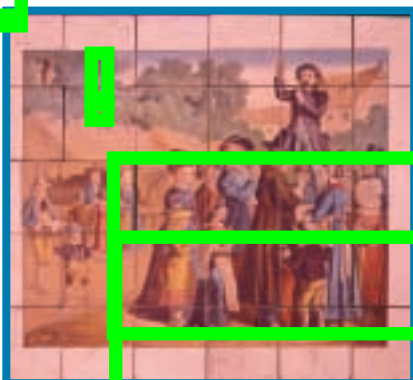
éteinte il y a quelques années. La forme de ses dents et de sa tête, ainsi que sa taille en font un pollinisateur possible pour les fleurs à nectar rouge. Les Muséums de Paris et de Londres en conservent quelques peaux : j'ai récemment nettoyé les peaux conservées à Londres, et la recherche de grains de pollen pour déterminer de quelles plantes se nourrissait l'animal.

Nesocodon mauritanus n'a peut-être toutefois jamais eu de pollinisateur spécifique sur l'île Maurice. Les graines de l'un de ses ancêtres ont pu arriver de l'île de la Réunion, à la faveur de l'un des nombreux cyclopes qui parcourent la région. La Réunion abrite en effet un genre proche, *Heterochaenia*, représenté par trois espèces vivantes. La fleur d'*Heterochaenia boobonica* ressemble beaucoup à celle de *Nesocodon mauritanus*, et une flore de 1877 décrit « cinq taches pourpres » dans la fleur d'*Heterochaenia ensifolia* : son nectar serait-il aussi coloré ?

L'île Maurice n'a en tous cas pas l'exclusivité des fleurs à nectar coloré : selon une publication récente, le nectar de *Dombeya kefaensis*, qui pousse en Éthiopie, est rouge-orange, et des botanistes sud-américains ont aussi présenté dans une conférence une solanacée qui produirait du nectar coloré, *Jaltomata*. La découverte de leurs pollinisateurs éclairera l'origine de cette anomalie.

Jens OLESEN, Université d'Aarhus
Photographies : J. OLESEN et J. MADSEN

J.L. Charmet



Le rangement de la boîte de cubes

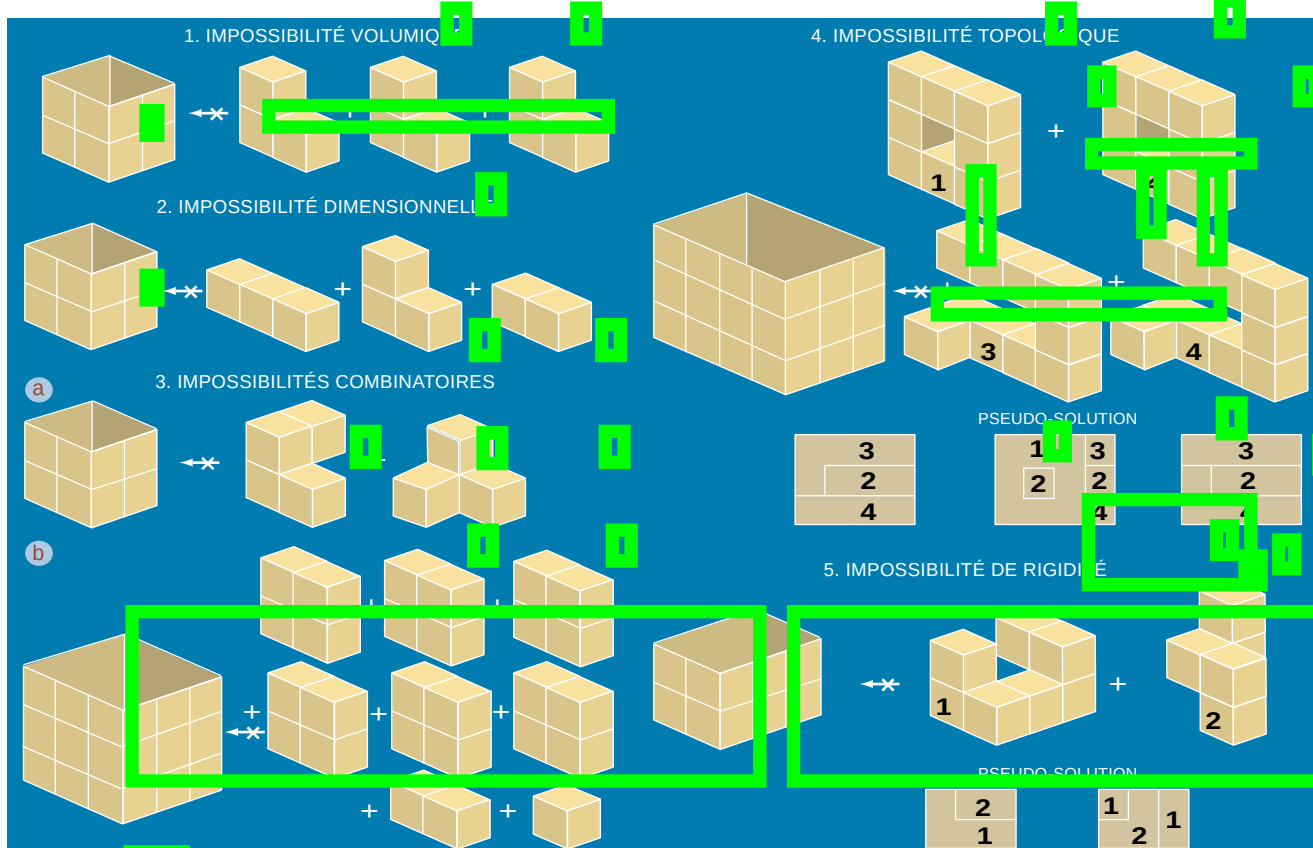
JEAN-PAUL DELAHAYE

Partir de l'exploration aléatoire est la meilleure méthode, parfois il vaut mieux tâtonner.

Ranger une boîte n'est pas toujours facile. Évidemment, on ne réalisera pas si l'on veut mettre des objets dont le volume est au total supérieur à celui de la boîte (impossibilité volumique). Si le volume total est égal ou inférieur à celui de la boîte, d'autres impossibilités de rangement apparaissent : impossibilité dimensionnelle, impossibilité combinatoire, impossibilité topologique, impossibilité de rigidité (voir

la figure 1). Lorsque le rangement est possible, il peut être facile. Par exemple, cinq ans sait ranger 8 cubes de côté 1 dans un cube de côté 2. D'autres rangements sont très difficiles et constituent une multitude de casse-tête dont, année après année, les auteurs ont perfectionné les formes pour aboutir aux merveilles d'ingéniosité que nous allons présenter. Sans dans le dernier exemple, nous nous limiterons aux problèmes du ran-

gement de polycubes (des formes composées de plusieurs cubes collés face contre face) dans des boîtes parallélépiédriques, car ces problèmes concentrent simplicité, esthétique et facilité de construction : en quelques secondes, vous fabriquerez votre propre casse-tête à l'aide de cubes volés à vos enfants et d'une bonne colle à bois. Si vous n'avez pas de cubes de construction, procurez-vous des perles cubiques, plus petites, qui vous éviteront



1. Cinq impossibilités de rangement. (1) Impossibilité volumique, le volume total des pièces est supérieur à celui de la boîte. (2) Impossibilité dimensionnelle : la taille d'une pièce fait qu'elle ne rentre pas dans la boîte. (3) Impossibilité combinatoire : le volume convient et chaque pièce entre dans la boîte, mais les pièces ne peuvent se trouver toutes ensemble dans la boîte. L'exemple (3a) illustre cette impossibilité, l'exemple (3b) est plus subtil : chacun des 3 plans hori-

zontaux et des 6 plans verticaux composés de 9 cubes chacun doit contenir au moins un cube pris dans les deux petites pièces (car chacune des 6 pièces composées de 4 cubes occupe un nombre pair de cubes de chacun des 9 plans, et il est impossible de placer les deux petites pièces pour qu'elles passent par les 9 plans). (4) Impossibilité topologique : certaines pièces devraient passer à travers d'autres. (5) Impossibilité de rigidité : les pièces devraient être en caoutchouc.

d'entreposer des puzzles encombrants dans des armoires toujours trop pleines et sources de conflits matrimoniaux.

Notons que le problème du remplissage d'un parallélépipède par des poly-cubes est un «problème NP-complet». Cela signifie qu'on ne connaît aucune méthode algorithmique rapide pour le résoudre systématiquement et qu'on pense (sans toutefois avoir prouvé) qu'aucune méthode rapide n'existe. C'est le statut de théorie de la complexité appliquée en partie à la difficulté des problèmes de rangement : il n'interdit pas de programmer des ordinateurs pour chercher les solutions aux problèmes de rangement, il indique seulement que les temps de calcul pourront être très longs.

LA VIEILLE BOÎTE DES COLLECTIONNEURS

La «boîte de cubes diaboliques» est le plus ancien casse-tête de cette catégorie. Elle était connue au siècle dernier et est le seul casse-tête de ce type à être mentionné dans le célèbre livre du professeur Hoffmann – un avocat britan-

nique dont le vrai nom était Angelo John Davis. Ce livre se voulait un traité exhaustif des casse-tête mécaniques de son époque. Il a été publié en 1893 sous le titre *Puzzles Old and New* et a été récemment réédité par L.E. Hordern. La nouvelle édition est agrémentée de photos des objets décrits qui ont été retrouvées chez les collectionneurs de casse-tête anciens. Tous les amateurs de casse-tête auront à cœur de se procurer ce magnifique livre (l'adresse de l'éditeur est : L.E. Hordern, Cane End House, Cane End, RG4 9HH, Angleterre).

Une des pièces des cubes diaboliques est composée de deux cubes accolés, une autre est faite de 3 cubes, une de 4, une de 5, une de 6, et une de 7, ce qui fait un total de 21 cubes correspondant au volume d'un cube de côté 3, qu'il s'agit justement de reconstituer pour pouvoir ranger les pièces dans leur boîte (voir la figure 2 ci-dessous). De difficulté moyenne, ce casse-tête est un bon entraînement avant d'aborder les modèles suivants. L'existence de 13 solutions différentes (dans ces dimensions, on ne compte qu'une seule fois

les solutions qui se déduisent les unes des autres par rotation ou symétrie) explique que moins de 10 minutes suffisent pour découvrir un rangement.

Les décomptes de solutions que nous indiquons dans le cours de cet article ont été faits à l'aide de programmes informatiques et proviennent le plus souvent du livre de Kelvin Holmes (un détective mathématicien britannique) et Frits van Groenou, *A Handbook of Cube-Assembly Puzzles Using Polycubes Shapes*, publié à compte d'auteur en 1996. Vous pourrez vous le procurer, comme je l'ai fait, dans la merveilleuse boutique de casse-tête londonienne du marché Camden Lock : Village Games and Puzzles (65 The West Yard, Camden Lock, London, NW1 8JZ, Angleterre).

Il semble que, pour aborder les cubes diaboliques, la meilleure méthode soit d'explorer le plus rapidement possible, sans réfléchir, un grand nombre de combinaisons. Si vous n'êtes pas très malin et que, dès qu'une impossibilité apparaît, vous revenez en arrière, vous tomberez sur une des solutions dans un délai court. Un autre principe pour accé-

(A) CUBE DIABOLIQUE

(B) CUBE DE STEINHAUS

(C) HALF HOUR PUZZLE DE COFFIN

(D) COFFIN'S QUARTET

2. Quelques rangements du cube $3 \times 3 \times 3$. (A) Les cubes diaboliques datent du XIX^e siècle : c'est, semble-t-il, le plus ancien puzzle de rangement d'un cube. (B) Le cube de Steinhaus a été inventé en 1930 ; il ne possède que deux solutions. (C) Le Half Hour Puzzle de Coffin, publié vers 1970, ne possède qu'une solution, qu'il faut environ une demi-heure pour découvrir. (D) Le Coffin's Quartet date aussi des années 1970 ; il est plus facile, mais le rangement doit s'effectuer dans un ordre précis.

er la découverte des solutions est de s'occuper en premier des pièces ayant des formes délicates (grosses pièces, pièces non planaires, pièces qui ne peuvent pas se placer dans un coin, etc.). Les programmes pour rechercher des solutions utilisent ces deux principes. Selon la finesse des méthodes

de détection de situations bloquées, la recherche est plus ou moins rapide. Ainsi l'ajout d'une seule idée simple (par exemple, la prise en compte des pièces planaires) peut multiplier l'efficacité du programme par 10 ou par 100 : un problème NP-complet oblige le programmeur à être intelligent.

STEINHAUS ET COFFIN

Un peu plus difficile, le cube de Steinhaus a été inventé, dans les années 1930, par le mathématicien polonais Hugo Steinhaus et fut présenté dans son beau livre de divertissements mathématiques *Mathematical Snapshots* (Oxford University Press, 1950). Vous résoudrez ce problème par la technique de l'exploration aléatoire, mais il vous faudra un peu plus de temps (ou un peu de chance). Il ne possède que deux solutions.

Dans les années 1970, deux autres découpages remarquables du cube de côté 3 en polycubes ont été inventés. Ils sont dus tous les deux au plus ingénieux inventeur de casse-tête de rangement de notre époque : Stewart Coffin. Celui-ci vit dans le Massachusetts, aux États-Unis, où il conçoit et fabrique ses casse-tête en utilisant toutes sortes de bois précieux qu'il ajuste au dixième de millimètre, obtenant des formes géométriques très belles et farcies de difficultés : nulles part ailleurs mathématiques et art ne se sont si intimement associés que dans les créations de cet artisan unique.

Le premier rangement du cube de côté 3 proposé par Coffin est dénommé *Half Hour puzzle*, car, bien que composé de six pièces seulement, sa résolution demande environ une demi-heure, même à un habitué de ces casse-tête. Il ne possède qu'une solution, qu'on ne découvre que difficilement par la méthode d'exploration aléatoire. Aucun raisonnement simple ne semble susceptible d'accélérer la découverte de l'unique solution. J'ignore comment Coffin a conçu son casse-tête, mais je pense qu'il doit être le plus difficile de tous les assemblages de polycubes donnant un cube de côté 3. Lorsqu'il y a moins de pièces, on réussit à raisonner, ce qui conduit à la solution en moins d'un quart d'heure et, lorsqu'il y a plus de pièces, elles sont petites et donc s'agencent assez bien, ce qui mène rapidement à la solution. Quel psychologue fera l'analyse de ce problème, expliquant pourquoi le découpage de Coffin est plus difficile que les autres découpages du cube de côté 3?

Le second rangement de Coffin (appelé *Coffin's Quartet*) est plus facile, mais est intéressant, car l'utilisation de petits raisonnements (« tel cube est nécessairement dans un coin », « telle pièce passe nécessairement par le centre », etc.) conduit rapidement au schéma du puzzle mort. Une fois que l'on a repéré où doivent se placer les pièces, on découvre que le montage est un second puzzle : il faut le réaliser dans un ordre bien précis ; sinon, les pièces se bloquent les unes les autres (voir la figure 2). Ce type de rangements, où la difficulté provient de l'ordre et de la façon dont les

3. LE CUBE DE MAYER

1. PLACER SUCCESSIVEMENT LES PIÈCES 4, 1, 2, 5, 3 SELON LE SCHÉMA

2. FAIRE GLISSER LA 3 ET LA 5 SIMULTANÉMENT D'UNE CASE À GAUCHE.
3. FAIRE GLISSER LA 1 D'UNE CASE VERS L'AVANT.
4. PLACER LA PIÈCE QUI DONNE LA DISPOSITION :

5. FAIRE GLISSER LA 3 VERS L'ARRIÈRE D'UNE CASE.
6. FAIRE GLISSER LA 5 VERS L'ARRIÈRE D'UNE CASE.
7. FAIRE GLISSER LA 1 VERS LA DROITE D'UNE CASE.
8. FAIRE GLISSER LA 2 VERS LA DROITE D'UNE CASE.
9. FAIRE GLISSER LA 1 VERS L'AVANT D'UNE CASE.
ON OBTIEN LA DISPOSITION :

ON REMARQUE QU'UNE CASE INTÉRIEURE, ■, RESTE VIDE.

3. Le cube de Leek Mayer. En raisonnant avec un crayon et un schéma du cube de côté 4 décompose par niveau, on voit que la pièce 4 qui occupe trois coins ne peut (aux symétries près) se placer que d'une seule façon. La pièce 2 ne peut alors être placée que de deux façons différentes dont l'une s'élimine en considérant la pièce 3. Une fois les pièces 2, 4 et 3 en bonne position, le reste suit et l'on obtient ainsi une solution... sur le papier. Toute la difficulté, et elle n'est pas mince, est de trouver les manipulations qui mettront les pièces conformément au schéma théorique. N'est-on pas dans un cas d'impossibilité topologique ou de rigidité ? Non, comme l'indique la suite d'opérations ici décrites.

pièces doivent être mises en place, est magnifiquement illustré par le cube de Derek Maier, diffusé par le fabricant anglais *Pentangle* (Pentangle, The Puzzle People, Salisbury Lane, Over Wallop, Hampshire, SO20 8HT, Angleterre). Il s'agit cette fois d'obtenir un cube de côté 4 avec 6 pièces. Une fois les pièces démontées mélangées, une série de raisonnements élémentaires permet de savoir où doivent aboutir les pièces. Réaliser le montage des six pièces reste cependant une épreuve... La figure 3 décrit la solution, dont on voit qu'elle alterne des mises en place de pièces et des glissements minutieux d'une ou de plusieurs pièces. Quand les pièces sont assemblées, elles tiennent solidement, et aucune boîte n'est donc nécessaire pour les ranger. Si vous décidez de réaliser vous-même ce merveilleux casse-tête, il vous faudra le faire très soigneusement, car les pièces se bloquent facilement et vous ne puissiez les assembler.

Je ne crois pas qu'il existe des programmes informatiques pour traiter de tels problèmes, dont la difficulté provient non pas de l'emplacement des pièces, mais de la complication du montage.

LES DÉCOUPAGES DE CONWAY

Le raisonnement est non seulement utile, mais parfois indispensable. Si vous ne le pratiquez pas, vous risquez d'errer indéfiniment sans réussir à résoudre certains casse-tête astucieusement conçus pour vous faire tourner en rond autour de combinaisons toujours incomplètes.

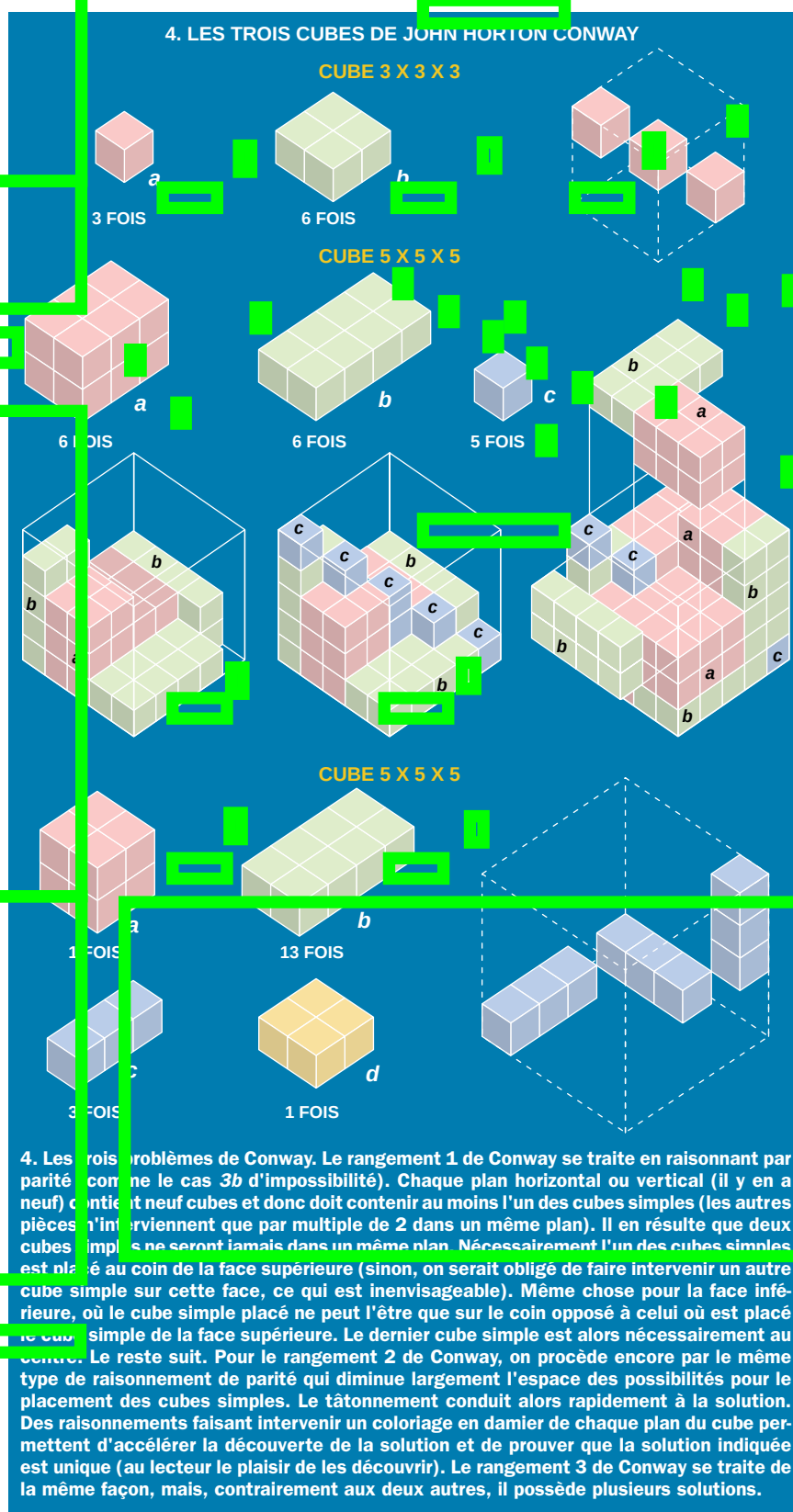
Les trois découpages de John Horton Conway (mathématicien de l'Université de Princeton et inventeur du jeu de la vie) sont les plus beaux exemples de ces pièges mentaux dont on n'échappe que par le raisonnement. Ces trois casse-tête sont très simples (peu de pièces différentes) et possèdent des solutions très belles, car elles sont symétriques, et on les découvre par des raisonnements astucieux utilisant d'élémentaires remarques de parité (voir la figure 4).

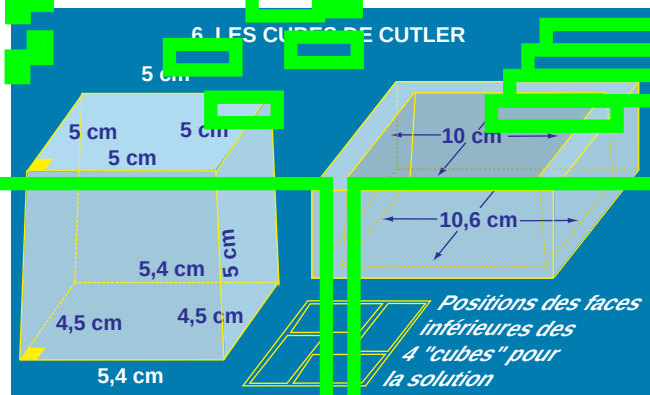
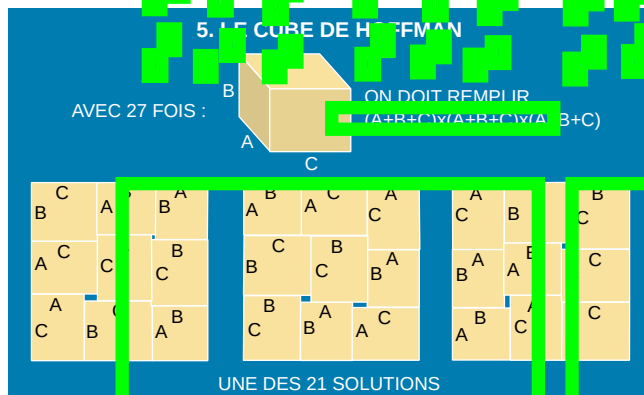
À chaque fois, la propension naturelle que nous avons d'aligner les pièces semblables pour les ranger (ce qui en général est une assez bonne stratégie, car cela réduit les espaces vides) se révèle catastrophique et exactement contraire à ce qu'il faut. Le problème 1, malgré son extrême simplicité (six formes de type $2 \times 2 \times 1$ et trois de type $1 \times 1 \times 1$ pour former un cube de côté 3), demandera de longues réflexions. Les plus acharnés des explorateurs aléatoires abandonneront tout espoir de résoudre les deux autres puzzles de Conway : les solutions ne surgissent que d'une réflexion et d'une

compréhension profonde des contraintes imposées par certaines pièces. Ces casse-tête sont remarquables : la présence de nombreuses pièces identiques limite le nombre des combinaisons à explorer, mais ne diminue pas la difficulté, ce qui provoque parfois un certain agacement.

CUBE DE DEAN HOFFMAN

Le cube de Dean Hoffman (qui n'a rien à voir avec le Hoffmann cité à propos des cubes d'holiques) est une autre merveille de simplicité. Il s'agit de ranger 27 parallélépipèdes identiques de côtés A, B, C





dans un cube de côté $A+B+C$ (voir la figure 5). L'inégalité classique, vérifiée pour tout triplet de nombres réels A, B, C , $27ABC < (A+B+C)^3$, assure que le volume de la boîte est suffisant. Il faut aussi que le plus petit des trois nombres A, B, C soit supérieur à $(A+B+C)/4$. On pourra prendre $A=4, B=5, C=6$. Le casse-tête possède 21 solutions, mais aucune n'est facile à découvrir.

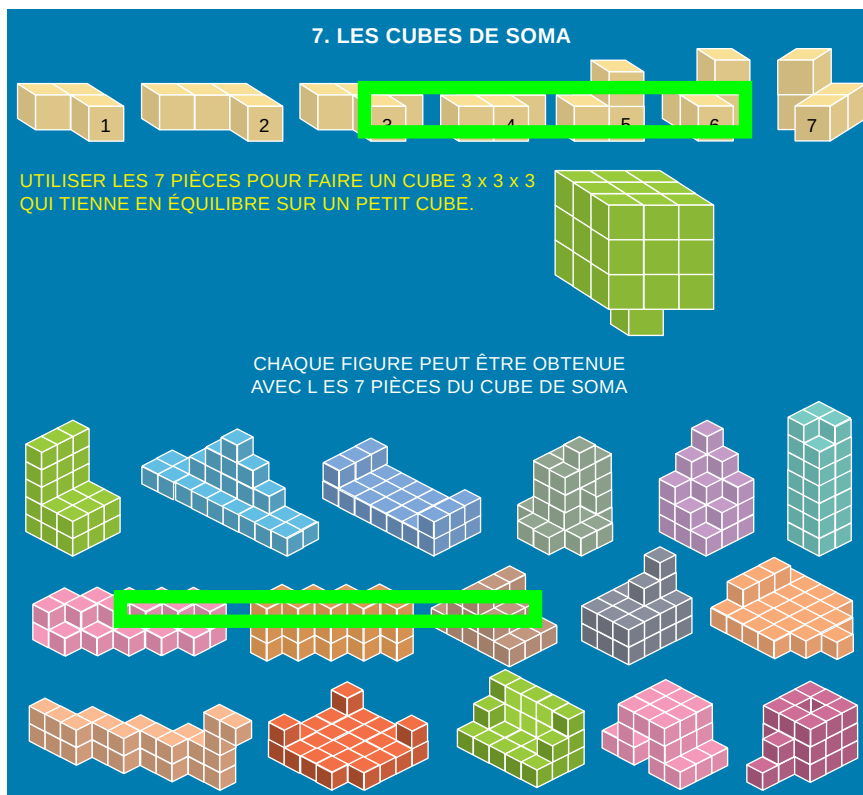
LE CUBE DE SOMA

Plus ludiques, certains ensembles de polycubes peuvent non seulement s'assembler en cubes (pour ranger le jeu dans la boîte), mais autorisent de nombreuses formes tridimensionnelles qui sont autant de sculptures.

Le cube de Soma fut inventé par l'écrivain danois Piet Hein, alors qu'il assistait à une conférence sur la physique quantique présentée par Werner Heisenberg. Entendant Heisenberg traiter d'équations mathématiques complexes, il eut l'intuition, après quelques griffonnages sur un morceau de papier, qu'en prenant toutes les formes possibles composées de trois ou quatre cubes accolés par leurs faces et ne se réduisant pas à un parallélépipède (appelons-les « polycubes complexes de taille inférieure à 5 ») il constituerait un ensemble de pièces qui pourrait se combiner en un cube. Son intuition était bonne : il y a 240 façons différentes d'assembler les 7 polycubes complexes de taille inférieure à 5. Le nom « cube de Soma » est une référence au roman de Huxley *Le meilleur des mondes*. Cette drogue dénommée Soma plonge ses utilisateurs dans un état d'oubli du monde extérieur qui sera le

vôtre si vous pratiquez ce jeu. Il est relativement facile de trouver un arrangement du cube de Soma, car il existe un grand nombre de solutions (vous devez réussir en moins de 10 minutes). Un problème ardu est de trouver un assemblage en cube de côté 3 qui tienne en équilibre sur un petit cube supplémentaire placé sous le cube central de la face inférieure du puzzle assemblé. Il existe au moins deux solutions.

Sur la figure 6, nous avons indiqué quelques configurations tridimensionnelles réalisables avec les pièces du cube de Soma. Il en existe des dizaines d'autres. Réaliser ces sculptures tridimensionnelles est vraiment très distrayant. Il est aussi amusant de constater que la manipulation prolongée de ces pièces confère une habileté qui vous donne accès aux solutions plus rapidement que lors des premiers problèmes. C'est là un exemple remarquable de l'adaptabilité de l'esprit humain qui, sans travail conscient et sans effort particuliers de raisonnement ou de réflexion, développe des compétences de pure logique et de compréhension prolongée avec un problème. Le jour où nous saurons programmer des machines de telle façon qu'elles disposent de cette capacité d'apprentissage automatique, nous aurons fait un gros progrès vers l'intelligence artificielle.



DIFFICILES PENTACUBES

Les pentacubes plans (assemblages de 5 cubes tous placés dans un même plan) sont au nombre de 12 (on les obtient en donnant de l'épaisseur aux pentaminos : pièces obtenues en accolant 5 carrés les uns aux autres). Ils possèdent donc au total un volume de $5 \times 12 = 60$, et il est donc envisageable de les assembler en un parallélépipède de dimension $3 \times 4 \times 5$. C'est effectivement possible... de 3 940 façons différentes ! Comme pour le cube de Soma, on peut construire d'autres formes avec les pentacubes plans (voir la figure 7). Prévenons le lecteur que, malgré le grand nombre de solutions que

possède chacun de ces problèmes, aucun n'est facile : imbriquer douze pièces est plus délicat qu'imbriquer 7 pièces. Le cube de Soma, c'est pour les enfants ; les pentacubes plans, pour les adultes !

Une autre illustration de l'idée que l'assemblage d'un objet peut avoir un très grand nombre de solutions sans qu'au-

cune soit facile à découvrir est le casse-tête des 25 Y. Il s'agit de ranger 25 pentacubes de la forme de l'y (qui ont un volume total de 125) dans une boîte cubique de côté 5 (qui a elle aussi un volume de 125). Il existe des centaines de solutions, mais aucune n'est évidente. Un problème encore plus difficile a été résolu sans ordinateur

par David Barner (qui en avait cherché la solution pendant plusieurs années) : le casse-tête des 25 N (on remplace le pentacube Y par le pentacube N). Une étude par programmation a permis de constater qu'il n'y a qu'une seule solution existante, ce qui fait sans doute de ce casse-tête le plus difficile des problèmes cités dans cet article. J'ignore ces quatre solutions, de même que j'ignore les solutions des problèmes de pentacubes que je présente dans la figure 8. Lecteurs, au travail !

LES CUBES DE CUTLER

Pour terminer, voici un problème d'apparence très simple : quatre pièces identiques de forme presque cubique, mais pas tout à fait (voir la figure 6), doivent être rangées dans une boîte d'allure parfaitement anodine. « Cela ne peut pas être difficile », croyez-vous. Pourtant, avec les pièces et la boîte inventées par le mathématicien Bill Cutler, vous changerez d'avis. Vous réussirez à placer sans difficulté une, deux, trois pièces dans la boîte, mais il sera alors impossible d'y faire entrer la quatrième. L'astuce est qu'il faut ranger les pièces en dehors de la boîte (en plaçant la face carrée de chaque pièce au-dessus et les faces rectangulaires au-dessous) et les tourner, chaque pièce tournée de 90° par rapport à ses voisines). En saisissant les quatre pièces simultanément, leurs bases se resserrent et elles entrent alors dans la boîte d'un seul coup : on peut placer les quatre pièces ensemble, mais pas les unes après les autres ! Là encore, je doute qu'aucun programme ait jamais été écrit qui traite un tel problème.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille.

APMEP (Association des professeurs de mathématiques de l'enseignement public), *Jeux 3, Jeux pour la tête et les mains*, 1990.

E. BERLEKAMP, J. CONWAY et R. GUY, *Winning Ways for Your Mathematical Plays*, t. II, Ac. Press, Orlando, 1982.

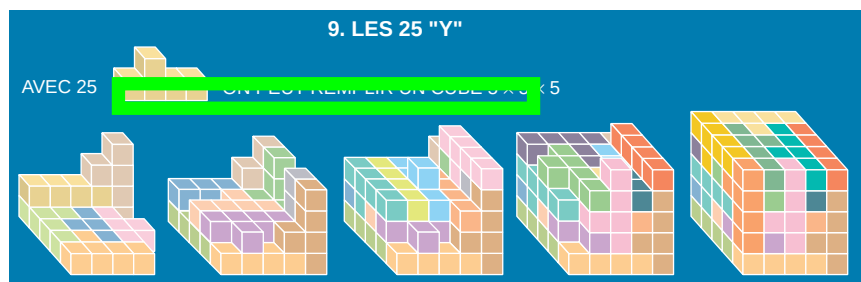
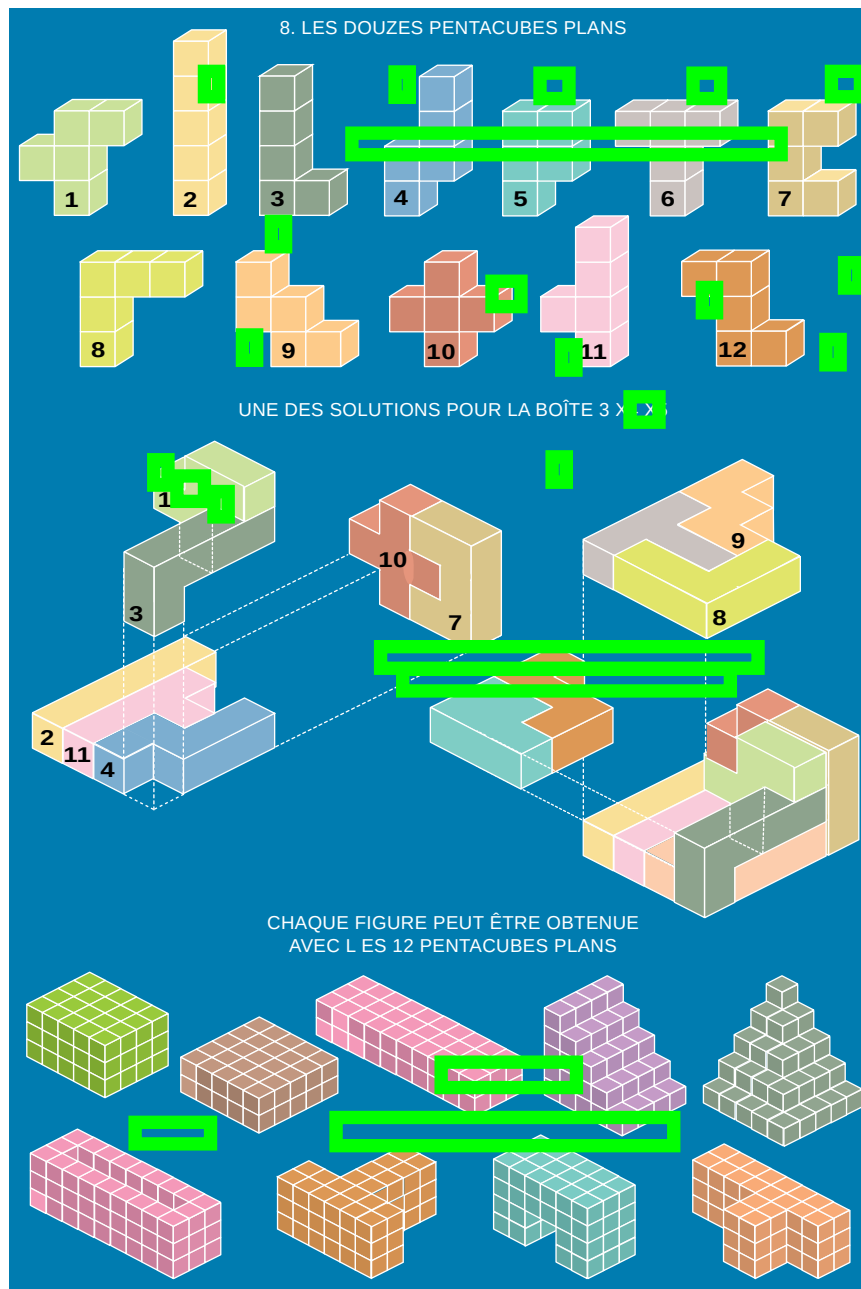
S. COFFIN, *Puzzle Craft*, Trevor Wood T.W. Puzzles (25 Alexandra Crescent, Ilkley, L29, 9ER Angleterre), 1993.

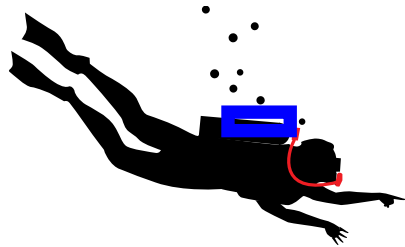
K. HOLMES et R. VAN GROL, *A Handbook of Cube-Assembly Puzzles Using Polycubes Shapes*, phot. Sutton, 1990.

Pr. HOFFMANN, *Puzzles Old and New*, Frederick Warne and Co, Londres, 1893.

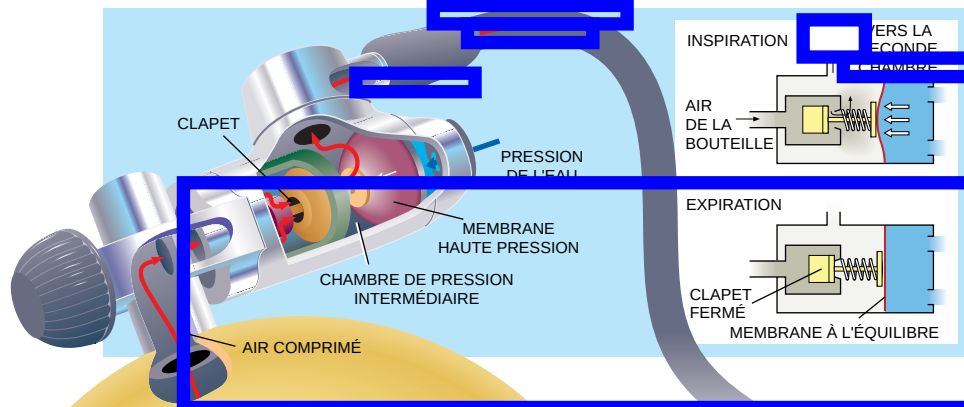
J. SLOCUM et J. BOTERMANS, *Puzzles Old and New. How to Make Them*. University of Washington Press, Seattle, 1994.

P. VAN DELFT et J. BOTERMANS, *Creative Puzzles of the World*, Key Curriculum Press (P.O. Box 2304, Berkeley, CA 94702, États-Unis), 1995.

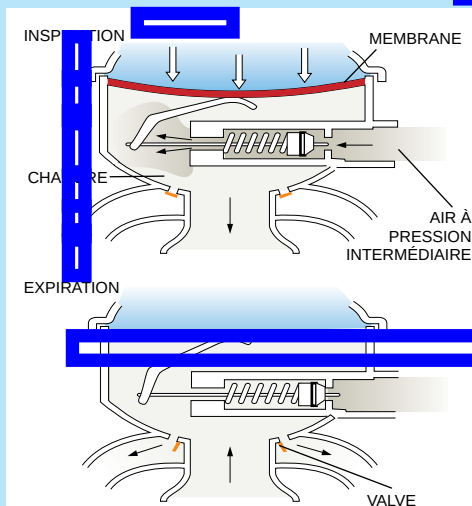
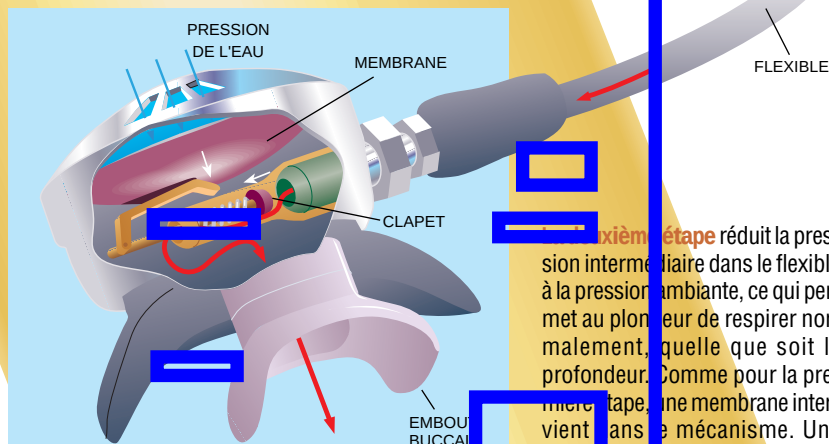




Le détendeur



Au cours de la première étape, l'air passe d'une pression de 200 bars, dans la bouteille, à une pression intermédiaire, dans le flexible, et dans la première chambre, de 7 à 10 bars supérieure à la pression hydrostatique ambiante. Plusieurs dispositifs sont disponibles ; le plus performant est sans doute celui de la membrane compensée. Chaque fois que le plongeur respire, la pression chute dans le flexible et dans la chambre de pression intermédiaire ; la membrane haute pression, poussée par la pression de l'eau, s'incurve vers l'intérieur, ce qui ouvre un clapet, qui laisse passer de l'air de la bouteille dans la chambre. Quand la pression de l'air est suffisante, la membrane retrouve sa forme initiale, le clapet se ferme.



La deuxième étape réduit la pression intermédiaire dans le flexible à la pression ambiante, ce qui permet au plongeur de respirer normalement, quelle que soit la profondeur. Comme pour la première étape, une membrane intervient dans le mécanisme. Une inspiration par l'embout buccal incurve la membrane vers l'intérieur, ce qui laisse passer de l'air à pression intermédiaire. Ainsi, lorsque le plongeur inspire, il aspire l'air contenu dans la deuxième chambre, qui est à la pression ambiante (voir le schéma inférieur) : la dépression ouvre le clapet, le petit volume d'air contenu dans le flexible et dans la première chambre (à pression intermédiaire) s'engouffre et se détend dans la deuxième chambre, puis est inspiré. Simultanément, la dépression que ce flux d'air produit dans la première chambre ouvre le clapet, et de l'air à haute pression s'y engouffre (voir le schéma supérieur).

L'invention du détendeur, qui relie une bouteille d'air comprimé à un embout buccal, est la clé de l'univers sous-marin. Simple en apparence, ce dispositif permet à n'importe qui de voir ce que nos ancêtres imaginaient seulement. Naguère mystérieux et sombre, le monde sous-marin est aujourd'hui connu de tous. Grâce aux détendeurs, les plongeurs respirent sous l'eau un gaz dont la pression est exactement égale à la pression de l'eau où ils se trouvent, quelle que soit la profondeur.

La décompression s'effectue en deux temps. Premièrement, la pression est réduite de 200 bars (soit 200 fois la pression de l'air au niveau de la mer) à une pression supérieure de 7 à 10 bars à la pression ambiante, variable selon la profondeur. Au cours de la seconde étape, la pression est ajustée à la pression ambiante.

Le détendeur est né en 1872 : le Français Louis Denayrouse dépose un brevet pour l'aérophore, un appareil de respiration dans les milieux irrespirables et détonants. Destinée aux mineurs de fond, l'invention sera perfectionnée par Yves Le Prieur en 1926, mais elle ne quittera pas les bassins d'expérimentation. En 1930, Jacques Yves Cousteau et Émile Gagnan mettent au point un modèle qui sera commercialisé, en France, en 1945, par la Société Spirotechnique : le CG 45. Le détendeur ne sera disponible aux États-Unis qu'en 1953, lorsque les Sociétés Macor et U.S. Divers commercialiseront leurs modèles C1 et Aqua Lung.

Jusqu'en 1961, seul le système à un étage existait : une seule chambre de décompression était reliée à deux flexibles, l'un pour inspirer, l'autre pour souffler. Il a été remplacé par le système à deux étages, c'est-à-dire à deux chambres et à un seul flexible : l'air s'échappe alors par deux orifices, les déflecteurs situés près de l'embout buccal. À la fin des années 1970, le caoutchouc naturel et le cuivre de certaines pièces ont été remplacés par des matériaux synthétiques plus performants et plus résistants. On a ensuite amélioré l'ergonomie et le confort d'utilisation.

William BOWDEN est directeur de la Société Dacor.

Volcanologie

Tazieff, le joueur de feu

Roger Cans.
Éditions Sang de la terre, 1998.

Roger Cans, journaliste et écrivain spécialisé dans les problèmes d'environnement, déroule le film d'une vie exceptionnelle et fait partager sa fascination pour la personnalité d'Haroun Tazieff. Quelle existence en effet ! Étudiant, puis ingénieur des mines, assistant de géologie à l'Université de Bruxelles, directeur de recherches au CNRS et, enfin, ministre et conseiller général, Tazieff a tout fait. Sympathisant communiste dans sa jeunesse, ministre dans un gouvernement socialiste, puis conseiller général « apparenté RPR », il a touché à toutes les chapelles, il a côtoyé tous les pouvoirs. Il a aussi été cinéaste, spéléologue, alpiniste, plongeur sous-marin, vulgarisateur, à tel point que l'on peut se demander quelle contribution il a bien pu apporter à chacune de ces disciplines et quelle marque il a laissée dans tous ces corps de métier. R. Cans montre bien l'évolution de la personnalité de Tazieff, son raidissement progressif, son intransigeance grandissante et son goût des responsabilités et du pouvoir. Il souligne aussi son isolement et sa dureté envers ceux qui s'aventurent sur ce qu'il considérait comme son pré carré. À lire le livre on ne peut s'empêcher d'admirer sa confiance en lui-même, son refus de rendre des comptes et, par-dessus tout, sa capacité de n'en faire qu'à sa tête. Tazieff a eu une vie de rêve, et il est difficile de ne pas l'envier.

En définitive, on est impressionné par la bienveillance dont les diverses autorités qu'il a rencontrées ont fait preuve à son égard. Pour quelqu'un qui s'est toujours présenté comme indépendant de toute chapelle et rebelle à toute autorité, Tazieff a souvent bénéficié de l'aide de gens bien en place. On le représente en lutte contre le « pouvoir » scientifique, en marge des fonctionnaires de la recherche et des rats de laboratoire, mais il faisait partie de l'« establishment » et, d'ailleurs, il a fait preuve de beaucoup de sévérité et de dureté envers de nombreux collègues plus jeunes. On comprend que

Tazieff avait un certain sens de l'amitié : celui d'un chef pour ses troupes. Dans la communauté scientifique, Tazieff se présentait comme un homme de terrain. Il savait jouer de sa force et de son courage physique pour intimider ses collègues plus enclins au débat et au doute. Il publiait peu dans les revues spécialisées et évitait les débats scientifiques. Il donnait peu de cours et n'a pas laissé de manuel scientifique aux générations futures.

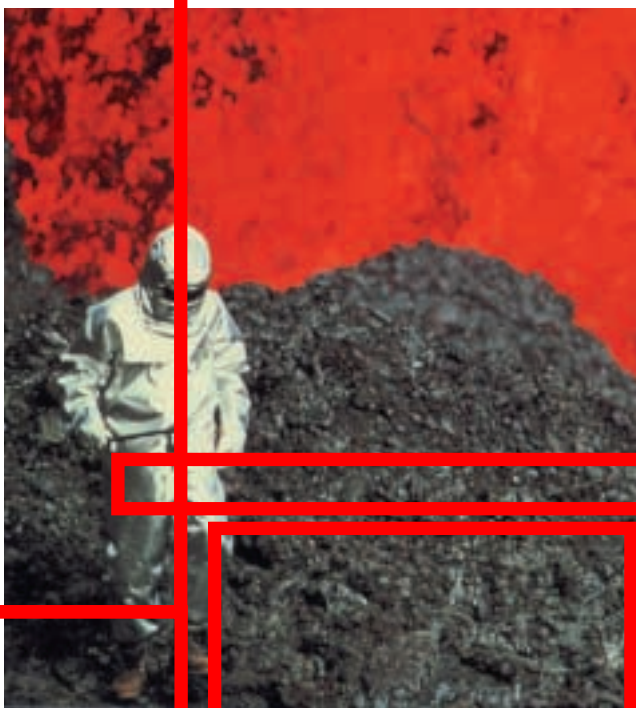
Ceux qui s'intéressent aux vies de personnalités hors du commun seront ravis. En revanche, ceux que la volcanologie et la recherche scientifique passionnent ne se sentiront pas concernés. Car, à lire R. Cans, on ne sait pas bien ce qui différencie la volcanologie de l'alpinisme. On parle de « première » lorsque Tazieff arrive au sommet d'un

le rat de laboratoire ou le vieux puits de science (je reprends les termes du livre). Il est vrai que les seconds sont rarement sympathiques, mais s'agit-il d'un livre sur la sympathie ?

Un état intéressant aurait porté sur le rôle et la responsabilité de l'expert. Le livre revient, bien entendu, sur la crise de la Soufrière, en 1976. Tazieff avait déclaré que le volcan n'entrerait pas en éruption et il était ensuite parti pour d'autres aventures, refusant les ordres des autorités qui lui demandaient de rester pour surveiller le volcan. « Exit Tazieff, l'expert », a-t-il écrit. Qu'est-on en droit d'attendre d'un expert appelé sur un volcan en phase d'éveil ? Doit-on accueillir le prophète et écouter l'oracle sans discuter ? L'expert peut-il se contenter de passer quelques jours sur le volcan, de humer l'air des fumerolles et de donner son diagnostic sur la base de quelques impressions ?

Et quelle vision de la recherche doit-on avoir ? Un chercheur doit-il être un individu libre et intransigeant qui obtient tout ce qu'il demande et fait ce que bon lui semble ? Ou bien un rat de laboratoire qui « modélise sur ordinateur et manipule les isotopes », qui « gère en rond » ? Bien entendu, aucune de ces attitudes n'est souhaitable. On ne saura jamais ce qu'était la méthode Tazieff. Dans le monde scientifique, on cherche à éviter la personnalisation du savoir, car on ne peut soumettre des impressions à la critique. En revanche, on peut réfuter une hypothèse physique, une mesure de mauvaise qualité ou bien encore un protocole d'interprétation. La tâche est difficile, c'est même une gageure sur des systèmes naturels aussi complexes que les volcans, mais c'est bien là le défi scientifique. L'intuition, le flair ou le *feeling*, la longue expérience ne suffisent pas. Ce sont des qualités essentielles, mais il faut les dépasser. Tazieff ne cherchait à écrire lui-même sur ces phénomènes qui échappent à toute description. Mais non : ces phénomènes peuvent être décrits, mesurés et même reproduits par des capteurs. Le scientifique se doit de traduire ses connaissances en résultats aussi simples que possible, en méthodes que d'autres moins capables ou moins savants pourront utiliser.

Selon R. Cans, Tazieff a eu « raison » quand il a effectivement prédit que la Soufrière ne ferait pas d'éruption en



Haroun Tazieff fut un homme de terrain, plus célèbre dans le grand public que reconnu par la communauté volcanologique.

volcan jusqu'alors inexploré. On apprend qu'il choisissait ses collaborateurs en fonction de leur passé sportif, mais on ne comprend pas quels étaient les enjeux de la volcanologie quand Tazieff a commencé et l'état de la discipline lorsqu'il l'a quittée. On lit qu'il s'est opposé à certains scientifiques, mais ces conflits sont réduits à des incompatibilités de caractère ou bien à de basses manœuvres de mandarins.

R. Cans montre peu de sympathie pour les chercheurs « académiques », auxquels il attribue des adjectifs péjoratifs, voire insultants. Ce sont des archétypes qu'il met en scène. R. Cans se cantonne dans l'opposition facile entre l'aventurier généreux au grand cœur et

le rat de laboratoire ou le vieux puits de science (je reprends les termes du livre). Il est vrai que les seconds sont rarement sympathiques, mais s'agit-il d'un livre sur la sympathie ?

Selon R. Cans, Tazieff a eu « raison » quand il a effectivement prédit que la Soufrière ne ferait pas d'éruption en

1976. Toutefois, on ne sait pas pourquoi il a eu raison et, lui disparu, personne ne pourra prendre sa place et utiliser ses connaissances. Quand Tazieff a fait le même diagnostic sur le mont Saint-Helens, en 1980, et qu'il s'est trompé, R. Cans n'écrit pas qu'il a eu «tort» mais qu'il a «parlé trop vite». Quelle est donc la vitesse acceptable? Et la vraie question, c'est de savoir pourquoi il a eu raison et pourquoi il a eu tort. On ne peut établir la validité d'une méthode scientifique par la statistique ni par un sondage.

On pourrait enfin se demander comment un seul homme peut arriver à personnaliser un domaine scientifique. Il faut y voir un manque de maturité de la part de ses concitoyens et souligner que des comportements analogues n'existent ni États-Unis ni au Japon, par exemple. Ces pays ont aussi des mandarins et des personnages capoteurs, mais on ne s'incline pas devant eux.

Dans le domaine strict de la volcanologie, on peut relever quelques inexactitudes et une conception simpliste de la discipline. La volcanologie française ou belge n'est pas née avec Tazieff. Parmi les nombreux noms que l'on pourrait citer, celui d'Alfred Lacroix s'impose : en 1902, il étudia la terrible éruption de la Montagne pelée, en Martinique. L'imposant rapport qu'il a laissé sur celle-ci contient des données encore utilisées aujourd'hui. C'est aussi Lacroix qui a créé l'un des premiers observatoires volcanologiques du monde, en 1905, près de la Montagne pelée. R. Cans nous dit aussi que, lorsque Tazieff fait sa grande expédition au Niragongo en 1958, «il maîtrise enfin ce métier qu'est celui des randonnées à la surface de la planète». C'est faire fi des nombreux autres scientifiques dont les publications sont encore citées aujourd'hui. R. Cans nous dit aussi qu'à cette époque très peu comprennent les risques inhérents aux volcans, en dehors du «petit monde des chercheurs japonais, néerlandais et américains». Cela fait beaucoup de monde et de nations!

Tazieff a son premier vrai contact avec les volcans à 34 ans, en 1948. On nous dit que, deux ans après, il est devenu un «volcanologue reconnu, cinéaste et conférencier prisé du public, reçu dans les cercles intellectuels comme héritier de brillants universitaires volcanologues reconnus, certainement pas, car les réputations dans le monde volcanique sont bien plus longues à bâtir. On peut voir là un certain conservatisme et une résistance aux idées nouvelles. C'est exact, mais c'est bien ainsi que la science avance. On sait depuis longtemps qu'il est impossible de prouver qu'une théorie est exacte, mais qu'en revanche on

peut démontrer qu'elle est fautive. La méthode scientifique consiste donc à soumettre ses travaux et les hypothèses nouvelles à un feu nourri de critiques, et c'est la théorie qui tient le plus longtemps qui gagne. C'est le lot des «fonctionnaires de la recherche», comme les appelle méchamment R. Cans. On peut imaginer le contraire avec toute nouvelle idée instantanément acceptée : comment organiser alors les recherches, les nécessaires vérifications?

D'autres visages de la volcanologie sont moins connus du public français. Je voudrais présenter brièvement ceux que je considère comme les meilleurs volcanologues de ce siècle : deux Britanniques, George Walker et Steve Sparks. G. Walker a aujourd'hui plus de 70 ans, mais il continue d'arpenter les volcans du monde. Il a compris très tôt qu'il est utile d'étudier les dépôts des éruptions et leurs mécanismes physiques. Pendant sa courte vie, un volcanologue ne peut espérer voir beaucoup d'éruptions, mais il peut étudier un très grand nombre de dépôts. Il peut aussi identifier des phénomènes rares et extrêmes. G. Walker a créé une école de volcanologie, il a su découvrir, encourager, former de jeunes talents. On trouve ses anciens étudiants dans les plus grandes universités du monde. Enfin, et ce n'est pas son moindre mérite, G. Walker a compris la nécessité d'étudier la physique des éruptions et d'élaborer des modèles quantitatifs. Il a poussé ses étudiants les plus brillants, Lionel Wilson et S. Sparks, dans cette voie, et il est responsable du renouveau de la volcanologie de ces deux dernières décennies.

G. Walker est timide, malingre, il passe mal à la télévision, mais il a laissé des idées, des mesures, des observations et une école de pensée. S. Sparks, lui, a révolutionné la volcanologie, parce qu'il a découvert une foule de mécanismes physiques originaux. Il a compris que la volcanologie ne peut se réduire aux seules observations et que les volcans sont des systèmes naturels aux comportements très particuliers : ils mettent en jeu de magnifiques phénomènes physiques qui méritent d'être étudiés en tant que tels. C'est un volcanologue polyvalent, excellent sur le terrain et au laboratoire, qui a

su faire la synthèse entre observations naturelles et modèles physiques. S. Sparks est aussi un merveilleux orateur et un débateur redoutable, qui aime partager ses connaissances et encourager ses collègues.

G. Walker et S. Sparks me semblent de meilleurs exemples à donner aux jeunes géologues. Ils ont été tous deux aventuriers sur le terrain, rats de laboratoire et ont utilisé l'ordinateur lorsque c'était nécessaire. Enfin, ce ne sont pas des mandarins et ils ne manifestent aucune intolérance envers les nouveaux venus dans leur domaine.

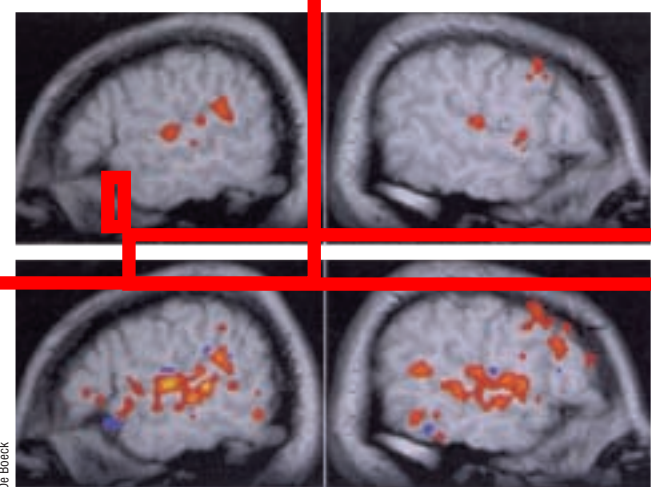
Claude Jaupart

Neurobiologie

L'esprit en images

M.I. Posner et M.E. Raichle
Collection «Neurosciences
et Cognition». Éditions De Boeck
Université, 1998.

C'est un très bel ouvrage est l'adaptation française du livre des mêmes auteurs publié en 1994 aux États-Unis. Il est le fruit de recherches multidisciplinaires qui, depuis de nombreuses années, articulent les travaux de psychologues, neurologues, psychiatres, physiologistes, biochimistes ou physiciens, autour de l'imagerie cérébrale. À l'aide de divers moyens magnétiques ou radioactifs, renforcés par l'informatique, on visualise aujourd'hui des événements matériels dans certaines parties du cerveau en train d'effectuer des opérations mentales classiquement attribuées à l'«esprit».



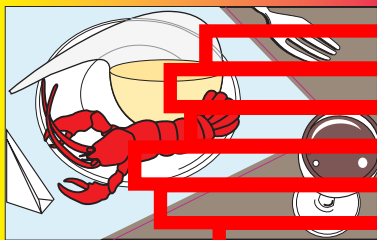
Le cerveau humain s'active différemment quand l'oreille entend un bruit (en haut) et une parole (en bas).

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 octobre 1998.



Parmi les différentes techniques de visualisation, que nous ne détaillerons pas ici, l'une des plus performantes et la plus utilisée dans l'ouvrage reste la caméra à positons (le positon, souvent appelé à tort positron, est l'électron positif, l'opposé de notre électron «classique» négatif, dit négaton) : on administre à un sujet une faible quantité d'eau radioactive, portée par un isotope à très courte vie et émetteur de positons. Dans la minute qui suit, le sang emporte l'eau radioactive dans les régions du cerveau les plus actives pour une opération mentale donnée. La quantité de positons émis est mesurée et affichée en une couleur particulière, ce qui permet de «cartographier» les régions cérébrales qui participent à une tâche.

Après quelques rappels historiques, l'ouvrage décrit quelques-uns des résultats obtenus. Nous assistons en direct au travail du cerveau lors de la construction des images mentales, de l'interprétation des mots, des opérations mentales, de la mise en route de l'attention, voire des maladies mentales. C'est superbe !

Derrière l'apport scientifique exemplaire de l'ouvrage se profile l'occasion d'une réflexion sur la grande question philosophique qui, depuis plusieurs siècles, hante les neurosciences : celle qui concerne les rapports du cerveau et de l'esprit. De nombreuses thèses ont été formulées à ce propos, mais deux d'entre elles réapparaissent régulièrement dans l'histoire des idées : le dualisme et le monisme matérialiste.

Pour la thèse dualiste, cerveau et esprit sont deux entités complètement distinctes, même si elles peuvent interagir. L'une des philosophies dualistes les plus célèbres est sans doute celle de René Descartes, qui oppose le corps (comprendant le cerveau), lequel serait une mécanique matérielle, et l'esprit (l'âme), qui relèverait d'un autre domaine, spirituel, et serait spécifique de l'homme. Ainsi l'animal, dépourvu d'esprit, selon Descartes, serait un simple automate comparable à une horloge. Sous des formes moins caricaturales, la thèse dualiste reste très présente aujourd'hui, y compris dans les milieux scientifiques, où elle est défendue par des auteurs tels que le neurobiologiste M.C. Eccles. Pour la thèse moniste, cerveau et esprit sont deux facettes d'une même réalité. On peut alors concevoir le cerveau comme une propriété de l'esprit (monisme idéaliste) ou l'esprit comme une propriété du cerveau (monisme matérialiste). C'est ce dernier monisme qui a toujours eu la faveur de beaucoup de scientifiques.

Le débat philosophique n'est sans doute pas prêt de s'achever, mais, en restant sur un plan plus épistémologique,

force est de constater que des travaux comme ceux relatés dans cet ouvrage apportent clairement de l'eau au moulin de la thèse moniste matérialiste. Tout le livre montre en effet que, même si l'on ne peut directement saisir l'esprit, on peut rendre ses manifestations de plus en plus visibles et objectivables. Comme le dit Marc Jean Perrod dans sa préface : «L'esprit, en quelque sorte, se matérialise, son fonctionnement devient le produit d'une activité que l'on s'enregistre et se voit.» Le neurobiologiste moniste d'aujourd'hui aura donc beaucoup de faire valoir que, sans vouloir négliger les contributions au débat métaphysique, l'hypothèse d'un esprit indépendant de la matière lui est épistémologiquement inutile ; il peut élaborer une théorie et une pratique des rapports cerveau-esprit sur un mode unitaire et comme le suggère la dernière partie de l'ouvrage, même les conséquences thérapeutiques de cette conception pourraient être fructueuses.

Bref, si ce point précis des rapports cerveau-esprit, la position du métaphysicien dualiste devient de plus en plus difficile à tenir, sauf, bien sûr, en quittant définitivement le domaine de la science expérimentale pour se réfugier dans celui de la spéculation pure !

Histoire des sciences

Chronologie des sciences et des techniques

Jean Fossard. CRDP
de Bretagne (BP 158, 35002 Rennes
cedex), 1997.

Chronologie d'histoire des sciences.

Éditions Larousse, 1997.

Pour plusieurs ouvrages de référence en histoire des sciences et des techniques présentent une chronologie d'histoire des sciences, dirigée par B. Gme, dans la collection Encyclopédie de la Pléiade (éditions Gallimard, 1978), ou les *Éléments d'histoire des sciences*, sous la direction de Michel Serres (aux éditions Bordas, 1989)... Chacune est construite en relation avec l'ouvrage qu'elle accompagne,

POUR LA 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 Bouvard (Rédacteur en chef), Françoise Simon (Rédactrice en chef adjointe), Béatrice Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Luc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lebert. Direction marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Severine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Leconte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Fernand Alby, Carlo Cerceda, Daniel Collobert, Paul Decaix, Evelyn Dousy, Gilles Mandret, Claude Olivier, Guy Paulus, Pierre Pfeffer, Xavier Philip, Michel Weinfeld.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Rindi Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul W. Schuch, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officer : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Téléc : LIBEL N 202978F.
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 Grémion : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Multico - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : Serpen - CH 61211 Genève
15 Postale 36

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français 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.

de sorte qu'elle a sa spécificité. L'un des privilèges des découvertes de physique en oubliant les découvertes chimiques majeures, une autre développée surtout les avancées des sciences de la vie ou s'attache principalement aux techniques.

La chronologie, que l'on pense volontiers objective, se révèle éminemment subjective. Elle est au concours des intérêts personnels des auteurs et des sujets qu'ils traitent. Jusqu'ici, aucune chronologie générale n'avait été publiée pour elle-même.

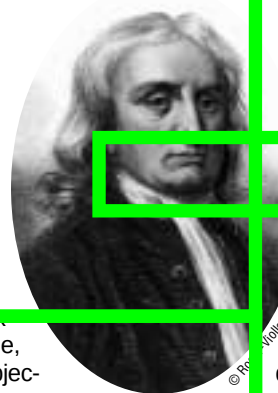
On présente en même temps, deux ouvrages sont parus, intitulés respectivement *Chronologie des sciences et des techniques* et *Chronologie d'histoire des sciences*. Ces chronologies sont-elles plus objectives ou plus complètes pour autant ? À qui s'adressent-elles ?

La première, de Jean Rostand, professeur d'histoire des sciences et des techniques à Brest, primitivement destinée aux enseignants et aux étudiants, se veut claire, simple, rapidement exploitable. La seconde, ouvrage collectif écrit par de nombreux spécialistes des disciplines concernées, destinée à un public plus large, procède d'un esprit plus philosophique qu'historique.

Chacun des deux livres comporte deux parties. La première partie du premier précise le rôle de l'ouvrage et ses limites, propose un panorama riche et concis de l'histoire des sciences et des techniques dans le temps et dans l'espace. Pour répondre à la curiosité suscitée, l'auteur livre une bibliographie abondante d'ouvrages savants ou de vulgarisation qui devraient constituer la base de toutes les bibliothèques publiques.

La première partie du second livre est un «dictionnaire-index» de notions, de noms de savants ou de titres d'œuvres fondamentales. Chaque rubrique renvoie à sa place dans la seconde partie de l'ouvrage. On y trouve également la liste des prix Nobel scientifiques et des lauréats de la médaille Fields, qui récompense les mathématiciens. L'ouvrage présente aussi les liens que les différentes disciplines ont entretenus au cours du temps. Enfin, et le second livre aborde les disciplines dans un ordre traditionnel, jamais tenu en compte dans les ouvrages en général, la première présente éga-

lement par ordre alphabétique. Pour la chronologie proprement dite, le cœur de chacun de ces ouvrages, les dispositions diffèrent. Tandis que le premier propose en colonnes les événements successifs, les faits de société (art, cul-



«Nous sommes des nains perché sur les épaules des géants», disait Newton. Les chronologies le démontrent.

ture, politique) qui marquent la période, les événements scientifiques, puis les objets et les techniques. Le tout de manière aisée, le second présente un tableau synoptique d'environ trois mètres de large, qui se déploie à la demande comme une carte du temps et dont la colonne verticale est la ligne «philosophie». Un jeu de flèches part de cette colonne

pour aller vers les faits caractéristiques des différentes disciplines ou bien relie les aspects complémentaires d'un fait, d'une théorie d'une découverte, d'une idée... On trouve ainsi, de part et d'autre de la ligne «philosophie», vers le haut : la chimie, la physique, les mathématiques ; vers le bas : la psychologie, les sciences médicales, les sciences de la vie et de la Terre. Le jeu interdisciplinaire est très fort. Pour y entrer, il est nécessaire de lire attentivement le mode d'emploi, la règle du jeu en quelque sorte, sans quoi un certain degré de confusion risque de naître. La richesse de l'ouvrage se révélera au fur et à mesure de l'habitude qu'on en aura. Il se dessine ainsi, progressivement, à la lecture, un panorama des idées, une histoire de l'évolution de l'esprit humain ; selon l'axe vertical, l'histoire des sciences est une discipline de choix pour l'étude de notre civilisation.

Le lecteur, s'il s'accorde un peu de temps à la réflexion, découvrira que les sciences et les techniques se sont développées de façon exponentielle au cours du temps, et surtout en Occident. Il se dessine alors un profil de civilisation – la civilisation occidentale scientifique et technique – qu'aucune œuvre n'avait abordé avec autant d'acuité. Ces chronologies demeurent l'une comme l'autre, de précieux outils de connaissance. Elles sont des sciences et des techniques, et non des corps, pour reprendre l'image donnée par Michel Authier dans les *Éléments d'histoire des sciences*, la chronologie ne doit pas nous faire oublier que la science et la technique ne se réduisent pas aux seuls savants et techniciens cités, ni à l'accumulation des découvertes que notre époque juge fondamentales.

Danielle Fauque

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>