

■ POUR LA

SCIENCE

Mars 1996

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

LE RHIN ASSAINI

ALIMENTATION
ET VIEILLISSEMENT

L'INDUSTRIE
MICRO-ÉLECTRONIQUE

CERVEAU
ET LOCOMOTION

LA CROÛTE
CONTINENTALE

LES ÉLÉPHANTS
DE TRAIT

SÉROTONINE
ET COMPORTEMENT

LA CONTREBANDE
DES MATIÈRES NUCLÉAIRES

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon	5
Tribune des lecteurs	6
Jeu-concours : Code d'accès	7
Les impossibles de la lutte antivirale par Bernard Le Guenno	8
Enquête : Pièces détachées humaines	10
 Présence de l'histoire <i>L'amour chez les plantes</i> par Londa Schiebinger	12
Science et gastronomie <i>Paradoxes olfactifs</i>	16
Perspectives scientifiques :	
<i>Moisson de jupiters</i>	20
<i>Le sens des mots</i>	21
<i>Les membranes de nos ancêtres</i>	22
<i>Vaccin anti-cocaïne</i>	23
<i>Cycliophora</i>	24
<i>Gènes et anxiété</i>	25
<i>L'évolution des galaxies anciennes</i>	26
<i>Photos révélatrices</i>	27
<i>Reconstitutions</i>	28
<i>Discrète séduction</i>	30
<i>Cerveau bilingue</i>	31
<i>Tiges de bulles</i>	32
<i>Les antiprotéases</i>	32
 Visions mathématiques <i>La couverture</i> par Ian Stewart	96
 Logique et calcul <i>Le jeu de la vie... toujours vivant...</i> par Jean-Paul Delanaye	100
 L'expérience du mois <i>Les sons naturels</i> par Shawn Carlson	106
L'image du mois <i>Onirogrammes</i> , par Jacques Ninio	108
 Analyses de livres	110
– <i>La juste argile</i> , sous la direction de M. Daoud et C. Williams	
– <i>Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution</i> , sous la direction de P. Tort	
– <i>Les chemins d'Esculape</i> , par Maurice Tubiana	

La contrebande des matières nucléaires

34

par Phil Williams
et Paul Weissner

Plusieurs saisis de matières nucléaires, transportées en contrebande font redouter le pire. Des États ou des organisations criminelles pourraient fabriquer des bombes atomiques... et s'en servir.



Le coût du désarmement

39

par Marco Cattaneo

La destruction des armes fabriquées au cours de la guerre froide coûtera beaucoup plus cher que leur fabrication.

Régime et vieillissement

42

par Richard Weindruch

Un régime alimentaire allégé, apportant suffisamment de protéines, de lipides, de vitamines et de sels minéraux améliore la santé et la longévité des rongeurs. En serait-il de même pour l'homme?

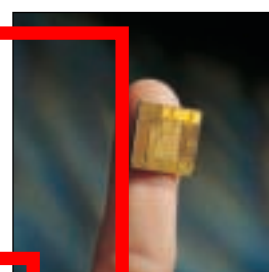


Le futur de la micro-électronique

50

par Dan Hutcheson
et Jerry Hutcheson

En raison de la croissance de l'industrie micro-électronique, pourrait obliger les fabricants de circuits intégrés à proposer plus de variété.



Les circuits nerveux de la locomotion

58

par Sten Grillner

Des réseaux de neurones spécialisés commandent les mouvements que font les vertébrés pour nager, courir ou voler. Chez la lamproie, ces réseaux sont aujourd'hui connus.



L'assainissement du Rhin

66

par Karl-Geert Malle

Les pays riverains du Rhin s'efforcent, ensemble, de nettoyer cette ressource économique et écologique vitale.



L'évolution de la croûte continentale

74

par Ross Taylor
et Scott McLennan

Les continents actuels se sont formés en plusieurs fois. Leur étude éclaire le passé géologique de la Terre, montrant que notre planète est une exception dans le Système solaire.

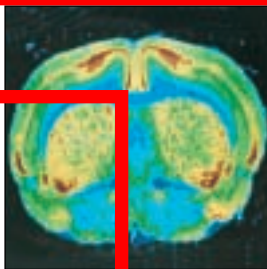


Un agent multiple : la sérotonine

82

par Marie-Hélène Thiébot
et Michel Hamon

La sérotonine participe à diverses fonctions physiologiques. Quand son fonctionnement est perturbé, elle est responsable de dépression, d'anxiété, de migraine ou de vomissements. Des médicaments pallient ces anomalies.



Les éléphants de trait

90

par Michael Schmidt

En Asie, ils subsistent parce qu'ils sont domestiqués pour participer à l'exploitation forestière. Ils préservent l'environnement en évitant la construction de routes et l'intervention des tracteurs.



ÉDITORIAL

L'adieu aux armes

La dissuasion participe de l'absurde : une attaque nucléaire déclenche une riposte qui détruit partiellement l'agresseur. La première attaque est suicidaire, car la riposte en entraîne une autre, mais cette riposte ne l'est pas moins, car l'emballement est général : la dissuasion n'est efficace que si l'on n'a pas à s'en servir.

Pour qu'elle soit crédible, les États-Unis et l'ex-Union soviétique ont augmenté leur armement nucléaire de façon qu'une première attaque soit annihilatrice : la dissuasion entraînerait alors le surarmement. Au cours des ans, l'héritage s'est alourdi, sans que personne ne prévoie qu'il puisse se révéler un jour inutile.

Inutilité patente aujourd'hui, où l'un des deux protagonistes de l'affrontement a disparu.

Il faudrait détruire les armes nucléaires superflues, celles qui dépassent le besoin limité de la défense. Et cela à l'Ouest comme à l'Est. On éviterait ainsi les tentations des pays non nucléarisés qui pourraient acquérir trop facilement un armement nucléaire incontrôlable (voir *La contrebande des matières nucléaires*, par Phil Williams et Paul Woessner, page 34). Les naïfs, et les humanistes, pensent que la destruction des armes nucléaires par des moyens pacifiques est une chance pour l'humanité et une victoire sans combat pour les pays de l'Ouest. Quelle armée n'a pas souhaité éliminer les armes de ses anciens ennemis ?

Malheureusement l'industrie du désarmement (voir *Le coût du désarmement*, par Marco Cattaneo, page 39) est peu développée ; on l'a vu pour les armes chimiques dont l'interdiction acceptée n'a pas été suivie d'effets éliminateurs. Il semblerait que la technique de destruction des armes soit encore balbutiante et coûteuse, et que personne ne veuille vraiment... s'y attaquer.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

Hadamard, mathématicien typé

Quiconque a fait ses études en français se souvient du rébus suivant :



et dont la réponse est : Le roi Pépin, sans air, sans eau, sans lit, sans pain, ayant perdu le peu qui lui restait, gémit tout seul dans un coin.

Qui est l'auteur de ce rébus prodigieux ? C'est Jacques Hadamard ! Oui, le fameux mathématicien qui, voici 100 ans, à Bordeaux où il était alors en poste, démontrait le théorème des nombres premiers.

Hadamard (1865-1963) avait bien d'autres intérêts que les rébus et les mathématiques. Montagnard et voyageur infatigable, polyglotte, botaniste, chasseur de serpents intépide, il était également musicien. Hélas ! il partageait un défaut avec Einstein : il était incapable d'aller en mesure. Lorsque Einstein, de passage à Paris, se joignait à l'orchestre amateur et familial monté par Hadamard, la fille de Hadamard, Jacqueline, était chargée de maintenir Einstein dans le tempo correct – dût-elle, pour sa part, n'avoir le temps de jouer qu'une note sur huit !

Quant au péché mignon des mathématiciens, la distraction, qu'on se rassure : les anecdotes ne manquent pas. Le soir des fiançailles de Hadamard, sa mère s'étonne de retrouver la bague dans la poche du jeune homme : il avait oublié de la donner à sa future. Le mariage eut lieu quand même. Si bien que, quelques années plus tard, Paul Painlevé, rencontrant Hadamard boulevard Saint-Michel, lui dit : « Votre femme est déjà partie en vacances, à ce que je vois. » « Mais comment le savez-vous ? », demande Hada-

maud. « C'est que votre cravate est derrière votre chemise drôle. » Hadamard ne fut jamais capable de s'habiller seul. Enfin ce n'est pas Poincaré qui a servi de modèle pour le Savant Cosinus. C'est Hadamard.

Intention et découvertes

Curiusement, il y a dans le scientisme quelque chose de dépréciatif à l'égard des sciences ; l'attitude rappelle au début en donne un exemple. Le scientifique en effet prend les sciences pour la vérité, c'est-à-dire refuse de voir en elles des interprétations. Il se réfugie ainsi dans la tranquillité protectrice d'une prétendue objectivité pure. Mais il amoindrit considérablement le rôle des savants, ne leur laissant d'autre liberté que de découvrir des vérités absurdes, voire préexistantes. Et il amoindrit également nos possibilités d'admirer, car ce qui est admirable dans un coup de génie, et le rend toujours aussi étonnant au cœur des siècles, c'est qu'il transcende la démarche rationnelle. La raison est à la portée de chacun, pas les coups de génie.

Les racines du mal

Sujet d'examen en électrostatique : telles et telles charges électriques étant réparties aux sommets d'un triangle, déterminer les champs et les potentiels créés par elles. Pour l'application numérique, renoncez donner les valeurs des grandeurs physiques intervenant, ainsi que les valeurs approchées de $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ et $\sqrt{5}$.

Or l'auteur du sujet est formel : dans les calculs, n'interviennent ni $\sqrt{3}$ ni $\sqrt{5}$. Pourquoi l'énoncé fournit-il leurs valeurs

approchées alors ? Parce que, sinon, « les candidats auraient su tout de suite qu'ils n'avaient que $\sqrt{2}$ à utiliser ». L'épreuve aurait été trop facile. Certains candidats, donc, auront été gênés par les indications superflues qu'on leur donnait.

Voilà qu'à sa modeste échelle et de façon toute symbolique, comme une loi que notre société, idolâtre de l'information, ne veut pas voir : qui sait le plus, peut le moins. Nous sommes presque tous des accros de l'information ; nous en consommons chaque jour pendant des heures entières. Ce n'est pas pour autant que notre liberté d'action ou notre intelligence des situations en sont le moins du monde augmentées.

La prétention technique

Il faut établir des liens nouveaux entre arts et technologies. » Cette injonction, devenue banale depuis quelques années, fait l'objet d'une vive critique de la part de Dominique Lecourt. Un abîme, souligne-t-il, sépare à jamais l'objet technique et l'œuvre d'art : le premier a une visée de maîtrise sur le monde ; la seconde a l'ambition de signifier ce qui, du monde, excède toujours cette maîtrise. Employer le même mot « expérimentation » dans le cas de la technique et dans celui de l'art relève du mensonge : la technique reste tributaire du possible ; en art, l'expérimentation tente au contraire de saisir au vol parmi les possibles celui qui fait ressentir l'impossible de notre condition.

Nos techniques permettent de substituer au calcul la perception visuelle. Cela, de fait, est nouveau, mais ne met pas en déroute la conception traditionnelle du rapport entre le réel et sa représentation. C'est une erreur de croire que le réel est produit à partir de purs algorithmes : le réel est premier. De plus, pour justifier l'injonction faite à l'art d'adopter ces nouvelles techniques, il faudrait en revenir à une conception caduque depuis longtemps : celle de l'art comme mimésis, c'est-à-dire comme imitation.

Dire que les artistes doivent s'emparer des nouvelles techniques, pour éviter que ne se creuse l'écart entre eux et « notre » monde, revient à accréditer deux thèses : le caractère propre de « notre » monde serait d'être technologique ; et la fonction de l'art serait de préserver l'harmonie des êtres humains avec leur monde. Or aucune de ces thèses ne va de soi.

Drôles de rires

Entendu dans la bouche d'un médecin s'exprimant sur une chaîne culturelle où il préconisait la thérapie par le rire : « Le rire, c'est une technique respiratoire. »

Lu dans *Le théâtre chinois*, par Roger Darrobers (Que Sais-Je ?) : « On jugera du raffinement de l'Opéra de Pékin en énumérant les 27 rires codifiés par lui : franc, sarcastique, mélancolique, feint, forcé, arrogant, fou, hystérique, triste, affecté, jaloux, étonné, embarrassé, stupide, bête, craintif, flatteur, enjôleur, gêné, fourbe, traître, triste, amer, moqueur, narquois, dément, offensé, à gorge déployée. »

Nos deux auteurs réconcilient esprit de synthèse et goût pour l'analyse. Version occidentale, version orientale, ils se montrent également pédants. Mais la pédanterie fait des miracles. La formule due au premier m'a fait rire, l'énumération due au second aussi. L'un comme l'autre ont donc parfaitement saisi l'essence du rire...

Paradoxe de la bataille

En étudiant la bataille, à la suite de Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu (voir *La bataille enfin analysée, Pour la Science*, septembre 1995), j'ai découvert un jeu paradoxal. Avec un jeu de 52 cartes, un joueur dont le jeu serait composé des séries du huit au roi dans les quatre couleurs, mais de seulement deux as, aurait plus de chances de perdre que de gagner. Sur 1 000 parties jouées avec cette même distribution de départ, j'ai observé que ce joueur n'en gagne que 330 alors que son adversaire qui a deux as et toutes les petites cartes en gagne 569 (101 parties sont nulles).

Je constate qu'en début de partie, le joueur qui n'a que des cartes de rang inférieur au huit et deux as commence par perdre toutes ses cartes sauf ses deux as. Ensuite, il conserve ses deux as et quelques cartes que ceux-ci lui permettent de gagner quand une bataille a lieu, la probabilité est grande qu'il s'agisse d'une bataille d'as. Le joueur qui n'a que quelques cartes se trouve alors en position de faiblesse et perd de gagner la bataille d'as est plus grande, car il possède en deuxième as exactement quelques autres cartes. La probabilité de prendre les deux as de son adversaire est alors grande.

Émile JOTTRAND, Farciennes

Réponse de Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu

Cette lettre constitue une contribution intéressante à la théorie du jeu de la bataille dont nous disions qu'elle n'avait rien d'évident malgré la simplicité du jeu. Remarquons tout d'abord qu'aucun joueur n'a proposé de jouer avec 52 cartes et que nous ignorons toujours si de telles parties sont possibles.

Gènes et sélection

Dans son article *La loi des gènes* (voir *Pour la Science*, janvier 1996), Richard Dawkins écrit : « Darwin supposait que la sélection naturelle favorise la survie et la reproduction des individus les mieux adaptés. » Cette litote laisse croire que la sélection naturelle, la mort, puisqu'il faut la nommer, favoriserait quelque chose... Ce qui est tout à fait clair, c'est que la sélection naturelle tue un certain nombre d'individus d'une espèce. Les survivants sont-ils favorisés quant à leur survie ? Certes, puisqu'ils ne sont pas morts... La disparition

des « individus » favorise-t-elle la reproduction des mieux adaptés ? Sans doute, puisque les morts – entre autres propriétés étonnantes qu'ils manifestent – ne se reproduisent pas.

Ce qui nul – ou presque – ne semble jamais remarquer, c'est que la sélection serait tout simplement impossible s'il n'existait pas aussi un autre processus qui, lui, crée quelque chose à quoi la sélection puisse s'appliquer.

Un lecteur affirme : « Nous sommes les héritiers d'une longue lignée d'ancêtres jeunes, dont les gènes assurent la vitalité au cours des années de reproduction, mais pas la moindre provision de vigueur pour les années suivantes. » Comment alors expliquer les deux particularités notables de l'espèce humaine qui ne confirment pas du tout l'analogie que Richard Dawkins fait de sa théorie, soit :

« Les individus de sexe mâle procréent jusqu'à un âge respectable ... (donc nous avons aussi des ancêtres vieux) ;

« Les individus de sexe femelle vivent fort longtemps après avoir perdu toute capacité de reproduction. »

Comment diable la Nature, s'acquiesçant à la « loi des gènes », se débrouille-t-elle pour que la sélection naturelle soit efficace pour la transmission et la survie de l'ADN qui la proportion de femelles humaines jeunes et fécondes soit beaucoup plus importante ?

Pierre PETIOT, Hengelo, Pays-Bas

On pourrait croire, comme Richard Dawkins le suggère lui-même, que tout est définitivement expliqué dans la Nature. En fait, seule, la théorie darwinienne de la sélection naturelle rend compte de façon satisfaisante du principal attribut des organismes, leur adaptation au milieu.

Pourtant de nombreux problèmes demeurent, le premier d'entre eux étant ce sur quoi s'exerce la sélection. La réponse de R. Dawkins est claire : elle vise les gènes. Beaucoup d'autres niveaux de sélection ont toutefois été proposés, à commencer par l'organisme dans son entier.

Considérer les gènes comme niveau de sélection soulève de nombreuses questions, celle du sexe notamment. La grande majorité des animaux fait appel à la sexualité pour se reproduire et, au cours de cet événement, les gènes du mâle et de la femelle sont redistribués dans un nouvel individu. Les combinaisons de gènes favorables risquent ainsi d'être remaniées ou détruites à chaque génération, annulant du même coup le patient travail de la sélection. Les avantages de la

reproduction sexuée doivent être considérés pour comprendre l'incertitude de briser les génotypes performants des parents et grands-parents. Ces avantages restent, pour l'instant, très discutés. Maynard Smith de l'Université du Sussex, a déclaré au cours d'une rencontre scientifique que « si le sexe représente un avantage manifeste pour une population, ce qu'il apporte à l'individu n'a rien d'évident ». « Voilà bien l'opinion d'un anglais sur le sexe ! » se serait exclamé un autre chercheur.

Cette discussion n'est pas la seule contrôlée par la thèse de R. Dawkins. Une nouvelle école de pensée attribue l'augmentation de la complexité des organismes au cours des temps géologiques, non pas aux intérêts qui les opposent, mais à leur coopération. La naissance de la cellule eucaryote par symbiose entre au moins deux types différents de bactéries, est devenue l'argument principal des actions positives.

Marc AUGÉ, Paris

Une catastrophe

Le billet de Jean-Louis Hartenberger sur l'extinction des dinosaures (voir *Pour la Science*, janvier 1996) m'inspire une certaine tristesse. La paléontologie française est-elle (une fois de plus) en train de « rater la coche » alors que s'offre à elle une occasion de se renouveler ? Aujourd'hui, porte à croire que l'impact d'un objet extraterrestre il y a 65 millions d'années fut la cause de la disparition des dinosaures, et de beaucoup d'autres espèces animales et végétales. J.-L. Hartenberger a des doutes, et c'est son droit, mais il est faux de dire qu'il y a « absence de fossiles de dinosaures dans les horizons du Crétacé supérieur ». Cette absence se constate dans les horizons du début du Tertiaire où l'on trouve en revanche des restes de dinosaures. Toutefois, et c'est cela qui permet de conclure que les dinosaures ont disparu à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire. Dans le Crétacé supérieur, les accumulations de restes de dinosaures ne manquent pas. En outre, une accumulation de fossiles est le résultat d'un concours de circonstances à la fois biologiques et sédimentologiques, qui n'a pas grand-chose à voir avec l'extinction des espèces.

Comment peut-on faire et bien marquer de tous les arguments apportés depuis 1980 à l'appui de la thèse de l'impact d'un corps extraterrestre, depuis l'iridium jusqu'aux magnétites nickelifères, en passant par les quartz choqués et les microtektites – sans parler du cratère de Chicxulub, au Yuca-

tan, qui trouble même les partisans d'une cause volcanique des extinctions? Toutefois quelle que soit la cause des extinctions avérées, il me paraît facile de traiter par le même les hypothèses sur les possibles mécanismes d'extinction catastrophique, qu'elles soient basées sur des explications antérieures ou non.

Il ne sera pas étonnant pour les paléontologues français que la question de la nouvelle révolution est en cours dans les sciences de la Terre. Il n'est plus possible, aujourd'hui, de comprendre l'histoire du monde vivant sans tenir compte de l'importance des extinctions en masse et de leurs probables causes catastrophiques.

Eric BUFFETAUT, Paris

J.-L. Hartenberger soulève un côté important de cette crise majeure dont l'explication n'a toujours pas été trouvée : la sélectivité dans les extinctions. La réponse, si on la saisit un jour, éclaircirait un point important et d'ordre général : le mécanisme intime des sauts évolutifs suivis de changements fauniques. L'exemple que G. Cuvier donne est la crise Trias-Jurassique, qui a oblitéré l'avenir des Thécodontes, a grandement diminué les dinosaures sur la voie royale de l'épanouissement et de diversification. Mais c'est tout. En aucun cas, l'extinction sélective décodée n'est-elle suffisante pour reformuler les questions», comme J.-L. Hartenberger le fait. Quelles questions? Les questions du désastre Crétacé-Tertiaire sont d'ores et déjà établies, et ne souffrent plus les éternuements des chercheurs frileux.

M. DIMITROV, Nancy

Réponse de J.-L. Hartenberger

A en croire ces deux lecteurs, l'hypothèse de la météorite est devenue un dogme, et les sceptiques n'ont plus qu'à rengainer leurs doutes et critiques. Pourtant, comme il est sous-entendu dans le propos d'Eric Buffetaut, la limite Crétacé-Tertiaire n'est qu'une convention : au-dessus plus de dinosaures, et ce sont ces grands absents qui la définissent. Il est toutefois loisible d'être établi que leur disparition est simultanée à celle du Cretacé. Par ailleurs, définir une limite par une absence n'est pas la meilleure méthode en la matière. De son côté, M. Dimitrov, en soulignant la sélectivité des extinctions, il conviendrait que seule l'étude des communautés animales et végétales qui traversent la crise Crétacé-Tertiaire nous permettra de comprendre ce phénomène de sélectivité. Le but de mon billet était de plaider pour ce retour aux sources.

JEU CONCOURS

N° 21

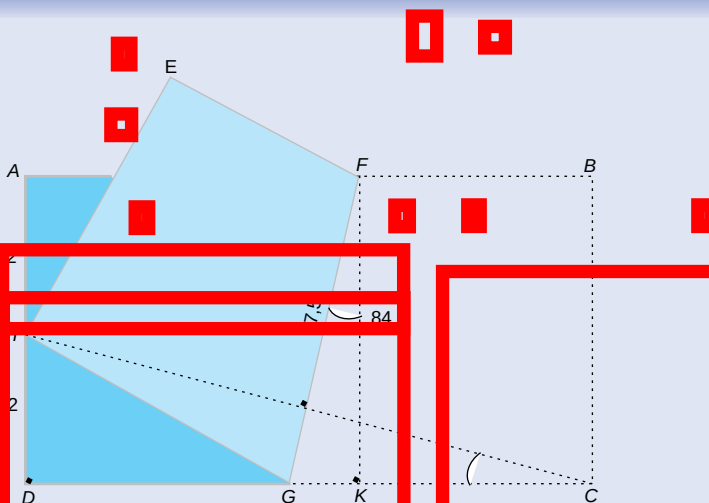
CODE D'ACCÈS

Le conservateur d'une bibliothèque de mathématiques a imaginé le dispositif suivant d'ouverture de la porte, afin d'éprouver l'esprit logique de ses visiteurs. L'ouverture de la porte est commandée par quatre interrupteurs disposés en carré. Celle-ci ne s'ouvre automatiquement que si les quatre interrupteurs sont soit tous ouverts, soit tous fermés. Au départ, l'état des interrupteurs est tel que la porte est fermée. Pour agir sur ces interrupteurs, le visiteur, qui ne voit pas ces interrupteurs, dispose d'un clavier à quatre touches A, D, 1, 2. S'il appuie sur A, deux interrupteurs adjacents sont choisis au hasard, de même sur D, ce sont deux interrupteurs en diagonale choisis aléa-

toirement. Ce choix est fait, il appuie sur le 1 ou un interrupteur parmi les deux choisis sera inversé, tandis que s'il appuie sur le 2, ce sont les deux interrupteurs choisis qui seront inversés. Saurez-vous trouver le code à taper pour ouvrir à coup sûr la porte? Naturellement la porte peut s'ouvrir avant que le visiteur ait terminé de taper le code.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mars 1995, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°19



La géométrie semble inspirer les lecteurs, car plus de 450 ont trouvé la bonne solution et ceci de bien des façons : théorème de Pythagore, trigonométrie, etc. Voici celle qui me semble la plus simple parmi toutes celles proposées. La figure ci-dessus montre la feuille avant et après pliage ainsi que les longueurs connues en centimètres. Soit FK la perpendiculaire abaissée de F sur DC. Le théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle GKF donne $GK^2 =$

$GF^2 - FK^2 = (87,5)^2 - (84)^2$, soit $GK = 24,5$. Par ailleurs, le pliage autour de GF étant équivalent à une symétrie autour de GF, HC est perpendiculaire à FG. Dès lors les angles GFK et HCD sont égaux (angles à côtés perpendiculaires) et, par conséquent, les deux triangles rectangles HCD et GKF sont semblables. En écrivant que les côtés correspondant sont proportionnels, on a : $DC/FK = DC/84 = HD/GK = 42/24,5$, soit $DC = 144$ centimètres.

tan, qui trouble même les partisans d'une cause volcanique des extinctions? Toutefois quelle que soit la cause des extinctions avérées, il me paraît facile de traiter par le même les hypothèses sur les possibles mécanismes d'extinction catastrophique, qu'elles soient basées sur des explications antérieures ou non.

Il ne sera pas étonnant pour les paléontologues français que la question de la nouvelle révolution est en cours dans les sciences de la Terre. Il n'est plus possible, aujourd'hui, de comprendre l'histoire du monde vivant sans tenir compte de l'importance des extinctions en masse et de leurs probables causes catastrophiques.

Eric BUFFETAUT, Paris

J.-L. Hartenberger soulève un côté important de cette crise majeure dont l'explication n'a toujours pas été trouvée : la sélectivité dans les extinctions. La réponse, si on la saisit un jour, éclaircirait un point important et d'ordre général : le mécanisme intime des sauts évolutifs suivis de changements fauniques. L'exemple que G. Cuvier donne est la crise Trias-Jurassique, qui a oblitéré l'avenir des Thécodontes, a grandement diminué les dinosaures sur la voie royale de l'épanouissement et de diversification. Mais c'est tout. En aucun cas, l'extinction sélective décodée n'est-elle suffisante pour reformuler les questions», comme J.-L. Hartenberger le fait. Quelles questions? Les questions du désastre Crétacé-Tertiaire sont d'ores et déjà établies, et ne souffrent plus les éternuements des chercheurs frileux.

M. DIMITROV, Nancy

Réponse de J.-L. Hartenberger

A en croire ces deux lecteurs, l'hypothèse de la météorite est devenue un dogme, et les sceptiques n'ont plus qu'à rengainer leurs doutes et critiques. Pourtant, comme il est sous-entendu dans le propos d'Eric Buffetaut, la limite Crétacé-Tertiaire n'est qu'une convention : au-dessus plus de dinosaures, et ce sont ces grands absents qui la définissent. Il est toutefois loisible d'être établi que leur disparition est simultanée à celle du Cretacé. D'ailleurs, définir une limite par une absence n'est pas la meilleure méthode en la matière. De son côté, M. Dimitrov, il conviendrait que seule l'étude des communautés animales et végétales qui traversent la crise Crétacé-Tertiaire nous permettra de comprendre ce phénomène de sélectivité. Le but de mon billet était de plaider pour ce retour aux sources.

JEU CONCOURS

N° 21

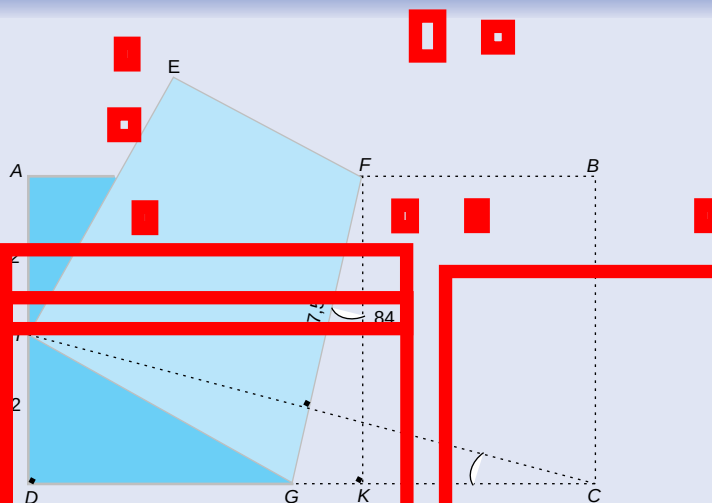
CODE D'ACCÈS

Le conservateur d'une bibliothèque de mathématiques a imaginé le dispositif suivant d'ouverture de la porte, afin d'éprouver l'esprit logique de ses visiteurs. L'ouverture de la porte est commandée par quatre interrupteurs disposés en carré. Celle-ci ne s'ouvre automatiquement que si les quatre interrupteurs sont soit tous ouverts, soit tous fermés. Au départ, l'état des interrupteurs est tel que la porte est fermée. Pour agir sur ces interrupteurs, le visiteur, qui ne voit pas ces interrupteurs, dispose d'un clavier à quatre touches A, D, 1, 2. S'il appuie sur A, deux interrupteurs adjacents sont choisis au hasard, de même sur D, ce sont deux interrupteurs en diagonale choisis aléa-

toirement. Ce choix est fait, il appuie sur le 1 ou un interrupteur parmi les deux choisis sera inversé, tandis que s'il appuie sur le 2, ce sont les deux interrupteurs choisis qui seront inversés. Saurez-vous trouver le code à taper pour ouvrir à coup sûr la porte? Naturellement la porte peut s'ouvrir avant que le visiteur ait terminé de taper le code.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mars 1995, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°19



La géométrie semble inspirer les lecteurs, car plus de 450 ont trouvé la bonne solution et ceci de bien des façons : théorème de Pythagore, trigonométrie, etc. Voici celle qui me semble la plus simple parmi toutes celles proposées. La figure ci-dessus montre la feuille avant et après pliage ainsi que les longueurs connues en centimètres. Soit FK la perpendiculaire abaissée de F sur DC. Le théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle GKF donne $GK^2 =$

$GF^2 - FK^2 = (87,5)^2 - (84)^2$, soit $GK = 24,5$. Par suite, le pliage autour de GF étant équivalent à une symétrie autour de GF, HC est perpendiculaire à FG. Dès lors les angles GFK et HCD sont égaux (angles à côtés perpendiculaires) et, par conséquent, les deux triangles rectangles HCD et GFK sont semblables. En écrivant que les côtés correspondant sont proportionnels, on a : $DC/FK = DC/84 = HD/GK = 42/24,5$, soit $DC = 144$ centimètres.

Les impossibles de la lutte antivirale

BERNARD LE GUENNO

Les virus ont évolué parallèlement aux organismes qu'ils parasitent. En dépit de la malignité de certains, il est impossible de les étudier tous.

Les virus, organismes frustes, sont souvent des hôtes indésirables. Ils pénètrent dans les cellules vivantes, lors d'un *Anschluss* biologique, et commandent la production des éléments indispensables à leur survie. Pour se multiplier dans les cellules, les virus détournent à leur profit les mécanismes de synthèse des protéines indispensables à la vie de ces cellules, aussi est-il difficile de lutter contre eux sans porter atteinte à leur hôte. Lorsque la cellule a fabriqué des constituants viraux en quantité suffisante, ceux-ci s'assemblent pour former de nouvelles particules virales qui quittent la cellule et propagent l'infection vers d'autres cellules.

Certains virus peuvent rester silencieux, sous forme de message intégré dans le patrimoine génétique de la cellule, et ne se «réveiller» que lors de stimulations spécifiques. Pour nombre de virus, on connaît un hôte naturel, animal ou plante, qui ne se ressent pas de cette intrusion : cette coexistence pacifique est le fruit d'une longue coévolution. La découverte des ribozymes, molécules d'ARN à propriétés enzymatiques, permet d'imaginer que les virus soient apparus avant les cellules, qu'ils continueront à évoluer parallèlement à celles-ci, et qu'on en découvrira toujours de nouveaux à mesure que l'on élimine certains par les vaccinations ou par la destruction des animaux porteurs. Hélas, les virus sont généralement maléfiques... pour l'homme, puisque nous raisonnons toujours de façon anthropocentrique. Hélas encore, il semble impossible qu'on puisse éliminer de l'organisme tous ces virus protéiformes, même avec toute l'armada des moyens de la biologie moléculaire.

La virologie est née il y a 100 ans, quand les biologistes ont observé que certains organismes, «les virus filtrants», traversaient des filtres que les bactéries ne pouvaient franchir. Au début, il a fallu utiliser des êtres vivants (souris, œufs) pour les étudier ; dès que l'on a pu

faire pousser des cellules dans des boîtes, cellules de mammifères, de plantes ou d'insectes, la virologie a fait un bond. Aujourd'hui, les virus les plus pathogènes sont connus, ceux qui le sont moins sont plus énigmatiques, et il est certain que nombre de virus non pathogènes sont inconnus.

Quand une maladie humaine apparaît, on cherche son responsable : c'est parfois un virus. Toutefois on sait qu'il y a, par exemple chez la souris, animal de laboratoire extrêmement étudié, beaucoup de virus non pathogènes. Si l'on étudiait *Homo sapiens* avec autant de soins, ce qui est presque impossible, on trouverait l'équivalent dans cette espèce.

Les virus ne sont pas une totale malédiction. Ils sont aussi utiles en tant qu'outils. Ainsi les phages, qui sont des virus de bactéries, ont été les premiers outils de la biologie moléculaire : aujourd'hui, les virus servent de vecteurs pour introduire, dans les cellules, des gènes dont l'expression supplée à certains déficits génétiques. Comme le virus n'infecte spécifiquement que certaines cellules, on peut copier son action de vecteur thérapeutique.

LES MUTATIONS IMPOSSIBLES

Il est très difficile, sinon impossible, d'imaginer que certains virus se transmettent de façon très différente de leur transmission actuelle.

Le premier avertissement repose sur l'apparition d'un mutant d'*Ebola*, virus responsable d'une fièvre hémorragique transmis par le sang, devenu transmissible d'homme à homme, par voie aérienne, comme la grippe ou la rougeole. Il faudrait, d'une part, que les cellules du tractus respiratoire, de la gorge et du pharynx, répliquent le virus pour que le malade l'excrète et, d'autre part, que les personnes saines aient des récepteurs appropriés dans le

nez ou la gorge. Ces mutations ne sont pas dans la logique de l'évolution des virus, ni dans celle de l'homme. Les virus mutent, mais pas de façon telle qu'ils puissent brusquement changer de récepteur. Les mutations des virus apparaissent très vite, c'est que leur génération est courte, de quelques minutes à un jour (environ 2 ans chez l'homme).

LES IMPOSSIBLES DE LA PRÉVENTION

On sait que des flambées de maladies virales ont résulté d'une modification de l'environnement favorable à la multiplication du réservoir. Ainsi, dans la Vallée du Rift, ce sont des moustiques. Si vous créez des zones où les gîtes larvaires peuvent être abondants, les moustiques vont se multiplier ; de plus, dans les pays secs, l'eau attire hommes et animaux. Ici, par malheur, vous introduisez le virus dans ce système, toutes les conditions sont remplies pour une épidémie. En Amérique du Sud, une épidémie due à un virus nouveau, *Guanarito*, résultait de la déforestation. Là c'est l'homme qui est au contact du réservoir, des rongeurs qui étaient sans doute infectés par le virus depuis des millénaires. L'homme, en perturbant l'écologie, soit favorise la transmission du réservoir naturel à l'homme, soit favorise la multiplication de ce réservoir.

Il est difficile de lutter contre le virus *Ebola*, car c'est l'un des rares dont on ne connaît pas le réservoir. L'OMS vient de monter un programme sur la Côte-d'Ivoire pour essayer de répondre à cette question. Toujours est-il qu'à partir d'un cas unique, une épidémie de fièvres hémorragiques due à *Ebola* s'est déclenchée à l'hôpital de Kikwit, en 1995, après celles de Maridi et Yambuku, en 1976. L'hôpital est une zone artificielle à risques où l'on injecte et où l'on soutire du sang. La transfusion sanguine et les injections ont propagé des maladies à transmission sanguine : hépatite B, SIDA, hépatite C. La connaissance du cycle naturel du virus permet de lutter contre lui avec des moyens extrêmement simples quand l'hôte naturel n'est pas l'homme. Hélas l'homme semble le seul réservoir du virus du SIDA, des herpès virus, des virus des hépatites B et C, de la poliomyélite.

LA VACCINATION ET LES MÉDICAMENTS

La grande question reste évidemment la thérapeutique. Il est difficile d'attaquer le virus sans détruire la cellule, et la plupart des médicaments antiviraux utilisés il y a encore dix ans étaient extrê-

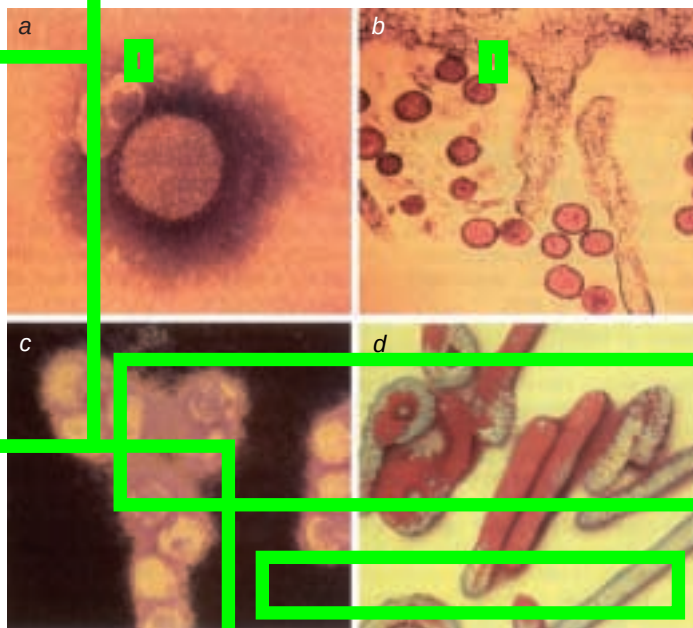
mement toxiques. Le premier antiviral efficace a été un médicament dirigé contre l'herpès, qui utilisait une enzyme spécifique du virus pour bloquer sa réplication. Très récemment, la thérapeutique contre le SIDA a fait un bond quand on a mis au point des molécules dirigées contre les protéases nécessaires à sa maturation.

Lors de la vaccination, on immunise l'individu comme il s'immunise naturellement. Quelqu'un qui a été atteint de la poliomyélite ou d'une des maladies virales de l'enfance ne rechutera pas. La meilleure vaccination se fait avec un virus vivant, qui se réplique dans la cellule, qui mime une infection naturelle, mais qui n'est pas pathogène.

Les vaccins les plus faciles ont été faits. Le plus vieux et le meilleur de tous est celui contre la fièvre jaune. Une injection de virus vaccinal de la fièvre jaune nous immunise au moins pour 30 ans, parce qu'il mime parfaitement une infection naturelle sans les effets néfastes du virus pathogène. Tous ces vaccins vivants ont été trouvés de façon empirique. Quand on ne peut trouver un virus vivant, on inactive le virus et on utilise certaines de ses protéines comme agents immunogènes. Pour la poliomyélite, les deux types de vaccins sont aussi efficaces l'un que l'autre.

En revanche, une maladie comme le SIDA ou l'herpès n'immunise pas. Le sujet infecté possède des anticorps et pourtant héberge le virus toute sa vie. Vous avez un bouton de fièvre, c'est que le virus herpès se réplique puis, qu'ensuite, il reste quiescent au niveau du ganglion pour réapparaître plus tard. Là il est très difficile d'imaginer un vaccin qui fasse mieux que la nature, et les essais de vaccin de ce type contre le SIDA le prouvent. Les protéines recombinantes constituent un espoir : au lieu d'utiliser une protéine du virus lui-même, on pense la fabriquer en laboratoire pour examiner ses effets.

Quand les anticorps ne sont pas protecteurs, il faut stimuler l'immunité cellulaire portée par les lymphocytes et les macrophages. Un tel virus est généralement plus difficile à maîtriser par le vaccin qu'un virus neutralisé par les anticorps. Outre leur rapidité de réplication, les virus à ARN évoluent beaucoup plus vite que les autres, parce que la



Les virus des fièvres hémorragiques ont des formes spécifiques. Le virus africain de Lassa (a) est un arénavirus, de forme sphérique. Les hantavirus (b) ont été responsables de épidémies en Corée, en Finlande et en France. Les flavivirus (c) forment un groupe de virus incluant les virus de la fièvre jaune et de la dengue. Le virus Ebola est un filovirus, ainsi dénommé pour son apparence filamenteuse (d).

machinerie cellulaire ne corrige pas les erreurs.

L'ÉVOLUTION DU VIRUS

Dans l'ordre il existe des enzymes cellulaires pour éviter les erreurs, parce que l'ADN étant le support de l'information des cellules eucaryotes et procaryotes, il est absolument indispensable que les erreurs de transcription soient corrigées. Les virus à ARN ne bénéficient pas de ce mécanisme ; le VIH responsable du SIDA est un virus à ARN. S'il s'intègre sous forme d'ADN dans le noyau, c'est au départ d'un virus à ARN. Les polymérases du virus à ARN font des erreurs non corrigées et, à chaque cycle, des mutations apparaissent.

Le virus de la grippe, lui, mute, parce que deux virus différents peuvent échanger des fragments de leur ARN pour constituer un virus nouveau. Pourquoi ne peut-on provoquer les mutations du virus en laboratoire pour avoir toute une gamme de vaccins appropriés ? Le problème est que les possibilités sont immenses, et il n'est pas envisageable de préparer à l'avance des milliers de souches vaccinales. Par chance pour les Européens, l'épidémie de grippe démarre généralement en Chine, où les canards et d'autres oiseaux aquatiques sont les réservoirs naturels des virus grippaux ; le temps que le virus arrive en Europe, on peut le caractériser et mettre au point le vaccin.

Il est évidemment impossible d'étudier tous les virus de façon systématique : il faudrait multiplier par plusieurs milliers le nombre actuel de chercheurs travaillant sur le seul virus du SIDA. Aussi travaille-t-on au coup par coup ; à chaque fois qu'une pathologie prend de l'importance, on réagit.

Il y a toutefois des gens qui travaillent sur des virus non pathogènes, parce que ce sont d'excellents modèles pour comprendre comment fonctionnent les virus en général ou pour explorer la cellule. Il y a deux aspects. On peut faire de la virologie pour le virus et on peut faire de la virologie pour étudier autre chose que le virus.

Pour étudier le SIDA, il fallait travailler sur les lymphocytes. C'est ainsi que l'équipe de R. Gallo a découvert un nouvel herpès virus, l'herpès virus n° 6, par hasard, parce que c'était un

virus qui était hébergé par les lymphocytes. Ce virus est absolument bénin, il donne une petite éruption dans l'enfance. La cause de cette maladie n'aurait pas été étudiée pour elle-même puisqu'elle n'a aucune importance en santé publique. De même, si nous connaissons quelques-uns des virus responsables de rhumes ou de grippes, des dizaines d'autres restent à découvrir.

La recherche sur des virus non pathogènes peut avoir des conséquences en santé humaine : on peut estimer que tous les membres d'une famille de virus répondent aux mêmes antiviraux, aux mêmes types de vaccins. Le jour où l'on trouvera un vaccin contre le SIDA, on saura fabriquer des vaccins contre les nouveaux rétrovirus susceptibles d'être découverts.

Paradoxalement notre méconnaissance des virus peut être un bien. On maîtrise tellement mal les causes de la pathogénicité qu'on ne peut pas encore le manipuler pour le rendre maléfique. C'est vouloir flatter les virologistes que penser que le VIH ou Ebola se sont échappés de laboratoires de guerre biologique.

Bernard LE GUENNO est directeur du Centre de Référence des fièvres hémorragiques virales à l'Institut Pasteur.

Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, sera diffusée sur France Culture le 6 mars 1996, à 9 heures.

Pièces détachées humaines

Existe-t-il des trafics d'organes humains en Asie ?

Comment accéder à l'éternité ? La mise au point des techniques de greffe a préoccupé les auteurs de science-fiction, qui ont imaginé des mondes où les greffes d'organes s'étaient généralisées : selon les cas, on cultivait des clones des individus afin d'avoir des pièces de rechange pour l'organisme, ou bien les sociétés punissaient de la peine de mort les moindres fautes, afin d'obtenir les organes nécessaires aux transplantations ; ou bien encore des organisations de collecte d'organes employaient de fantomatiques ramasseurs pour dépouiller les passants de leur intérieur et organiser des trafics qui allongeaient la vie des riches.

Nous n'en sommes pas là : les rumeurs de vols d'organes n'ont pas été confirmées, bien que la Chine prélève des organes sur les corps de prisonniers exécutés, et que l'Autriche ait institué des règles de « consentement présumé » qui permettent aux médecins de prendre des organes aux patients dont le cerveau a lâché à moins qu'ils ne se soient explicitement déclarés contre cette pratique.

On évoque aussi les ventes d'organes. Jusqu'en 1995, en Inde, une somme de 150 000 francs permettait d'acheter un rein à des médecins qui payaient moins de 5 000 francs les personnes à qui ils prélevaient les organes. Accusée de servir de réservoir de pièces détachées humaines à l'usage des nations riches et d'abriter des praticiens qui volaient les organes à leurs patients, l'Inde a voté des lois qui interdisent ce trafic, aujourd'hui illicite.

Depuis cette nouvelle législation, les médecins ont observé que le nombre de transplantations effectuées dans le pays a considérablement diminué. Rishi Rak Kishore, directeur général adjoint des Services sanitaires indiens, prévoit toutefois que ce nombre augmentera bientôt, à nouveau. En même temps que l'Inde limitait le trafic d'organes, elle se donnait une définition légale du concept de « mort cérébrale » : un individu est déclaré mort si son cerveau ne fonctionne plus, même si son cœur et ses autres organes continuent d'agir.

Cette loi diffère de celles de la plupart des pays d'Asie, qui considèrent qu'un corps est mort, et qu'on peut lui prélever ses constituants, si le cœur a cessé de battre. Cette définition pose des problèmes aux spécialistes de la transplantation, car un arrêt de la circulation pendant seulement quelques minutes rend les organes impropres à la transplantation si le corps reste à la température ambiante.

Certains pays, tel le Japon, étudient de nouvelles réglementations afin de favoriser les dons d'organes, mais des obstacles importants demeurent. En 1994, une société japonaise a dû abandonner un projet de récupération de reins aux Philippines, et un programme gouvernemental japonais de création d'un réseau de transplantation a trouvé peu d'écho dans les pays voisins du Japon.

En Inde, il y a assez de personnes cérébralement mortes pour assurer la demande du pays, mais il faudra convaincre les familles d'autoriser les dons et refondre l'infrastructure de transplantation pour les utiliser. La Chine, en

revanche, semble bien plus proche des visions de science-fiction : le pays s'approvisionne presque exclusivement sur les corps des condamnés à mort. Bien que les statistiques soient tenues secrètes, les organisations de protection des droits de l'homme estiment que la Chine exécute entre 3 000 et 20 000 personnes par an. Les dirigeants chinois ont assuré que les prisonniers ont accepté qu'on leur prélève les organes, mais quelle est la valeur du consentement des condamnés à mort ?

Selon Robin Munro, responsable de la section asiatique de l'association Human Rights Watch, le nombre de peines capitales en Chine ne semble pas dépendre de la demande d'organes, comme on l'avait craint, mais le grand nombre d'organes disponibles chaque automne, après les séries d'exécutions ordonnées par le gouvernement chinois, stimule le marché des organes.

R. Munro et d'autres sources indiquent en outre que les bourreaux chinois, au lieu d'exécuter les condamnés par tir d'une balle dans la nuque, injectent des poisons lents, qui donnent plus de temps aux équipes de transplantation.

Des histoires de ce type horrifient les spécialistes de transplantation des pays industrialisés, parce qu'ils craignent que les rumeurs ne provoquent des pénuries d'organes. Didier Houssin, directeur général de l'Établissement français des greffes, nous a vivement invités à écrire que la vente de pièces détachées humaines était un mythe. En France, un décret clarifiera le fonctionnement de l'organisation nationale en précisant la notion de mort, et un arrêté définit les règles de répartition des organes. Nicholas Halasz, directeur du comité d'éthique associé au réseau de transplantation américain, a indiqué que, avec ses collègues, il a même fait une enquête pour savoir si certaines célébrités ne bénéficiaient pas de traitement de faveur. Le comité a ainsi vérifié que la priorité revient effectivement aux personnes les plus malades, mais il n'a pas vérifié si les médecins avaient correctement déclaré l'état de santé des malades dont ils s'occupaient.

La détection d'anomalies serait grave pour le réseau de transplantation, car les particuliers ou les familles des personnes décédées risqueraient de refuser le don d'organes s'ils apprenaient que ceux-ci sont utilisés à des fins mercantiles. C'est d'ailleurs cette idée qui pousse certains spécialistes des greffes à refuser le paiement des organes, même à titre de participation aux obsèques des donateurs.

Paul WALLICH, Madhusree MUKERJEE et Sanjay KUMAR, à New Delhi.



Cœur humain préparé pour une transplantation cardiaque imminente.

L'amour chez les plantes

LONDA SCHIEBINGER

Carl Linné a classé les plantes selon leurs organes reproducteurs, leur attribuant des comportements sexuels qui reflètent les valeurs du XVIII^e siècle.

Les feuilles des fleurs [...] servent de couches nuptiales que le créateur a préparées, parées des nobles rideaux et parfumées de senteurs si douces que le jeune époux et sa promise peuvent y célébrer leurs noces dans la plus grande solennité. Lorsque la couche est ainsi préparée, c'est temps pour le jeune époux d'embrasser sa douce promise et de lui offrir ses présents [...]

Carl Linné, *Prealudia Sponsaliorum Plantarum*, 1729

De l'Antiquité à Darwin, les naturalistes ont prêté sexe et sexualité aux objets de leur observation. Le taxinomiste suédois Carl Linné ne fut pas le seul à imaginer des plantes dotées de vagins et de pénis et se reproduisant sur des «couches nuptiales». Depuis le Siècle des Lumières, la science s'est voulue neutre, située au-dessus de la confusion de la vie quotidienne, mais, en ce qui concerne la féminité, elle n'a guère été impartiale. Le sexe, qu'il s'agisse des relations réelles entre les sexes ou des interprétations culturelles de ces relations, a modelé l'histoire naturelle et, notamment, la botanique.

Cette discipline fut longtemps réservée aux femmes, car elle n'était pas assez «virile». La société du XVIII^e siècle la recommandait comme un passe-temps qui enseignait aux femmes une certaine discipline intellectuelle. En outre, les femmes étaient traditionnellement les dépositaires des secrets des plantes médicinales.

Parmi toutes les sciences, la botanique était considérée comme la moins violente pour les esprits délicats. Comme l'a souligné Jean-Jacques Rousseau, l'étudiant en anatomie était confronté au sang et au cadavre puant, l'entomologiste à l'insecte vil, le géologue à la poussière et à la saleté. Bien qu'après les études de Linné, la botanique semblât s'intéresser à la sexualité plus qu'il ne convenait aux dames, son étude continua à être encouragée, car elle était la

science qui permettait la meilleure perception de Dieu et de Son univers. Comme, selon Rousseau, les femmes sont dotées de génie, de «cette flamme céleste» qui embrase l'âme et qui est nécessaire aux innovations scientifiques, la science sérieuse était réservée aux hommes.

Les femmes étaient tenues à l'écart des universités et des académies scientifiques. Les rares femmes de science qui s'étaient fait une place en mathématiques, en physique, en astronomie ou dans le domaine de l'illustration scientifique y étaient parvenues par des voies détournées, telles que les salons fréquents par l'élite. Ainsi Maria Sybilla Merian, illustratrice de botanique et entomologie, qui se rendit au Surinam à la fin du XVIII^e siècle à la recherche de chenilles exotiques, présentait-elle ses illustrations dans des ouvrages façonnés avec soin, mais laissait-elle ses collègues masculins faire la classification des espèces qu'elle dessinait. En dépit de quelques incursions en botanique, les femmes sont restées longtemps en marge de la vie intellectuelle.

Entre 1650 et 1700, alors que les merveilles ramenées des nouvelles colonies déferlaient sur l'Europe, le nombre des végétaux connus quadrupla. Pour répertorier cette multitude de plantes, les botanistes cherchèrent des principes simples et universels de classification. L'usage médical des plantes céda la place aux questions générales et théoriques posées par la taxinomie.

Puis la sexualité des végétaux devint le centre d'intérêt des botanistes ; on ne s'intéressa plus qu'au «coït des végétaux», comme on nommait parfois la fécondation des plantes. Le naturaliste anglais Nehemiah Grew élaborait une théorie de la sexualité des végétaux à partir de celle des animaux et, dans son traité de 1682, *L'anatomie des plantes*, il identifia l'étamine comme l'organe mâle des fleurs :

La larve (ou étamine) présente quelques analogies avec le pénis ; elle est recouverte d'une enveloppe, à la façon d'un prépuce [...]. Et le pollen, ainsi que d'autres petites particules présentes sur le pénis ou pénis [...], sont le sperme du végétal. Lorsque le pénis est en érection, le pollen tombe sur l'utérus et lui transfère ses vertus fécondantes.

Au début du XVIII^e siècle, l'analogie entre les sexualités animale et végétale était bien établie. Dans son ouvrage, *Prealudia Sponsaliorum Plantarum*, Linné précisa les termes de la comparaison : chez le mâle, les filaments des étamines forment les canaux déférents, les anthères représentent les testicules, et le pollen qui s'en échappe le liquide séminal ; chez la femelle, le stigmate est la vulve, le style le vagin, le canal qui s'étend tout le long du pistil est la trompe de Fallope, le pédoncule est l'ovaire fécondé et les semences sont les œufs. Le médecin français Julien Offray de La Mettrie prétendait même, avec d'autres naturalistes, que le réservoir de nectar des plantes équivalait au lait maternel des femmes.

LA VIE PRIVÉE DES PLANTES

Pourtant, la plupart des fleurs sont hermaphrodites, dotées à la fois d'organes reproducteurs mâles et femelles. Il existe deux sexes – mâle et femelle –, mais trois genres de fleurs : les mâles, les femelles et les hermaphrodites, parfois nommés androgynes. La plupart des botanistes avaient accepté la notion de dimorphisme sexuel dans le règne animal, mais admettaient difficilement l'hermaphrodisme des végétaux. Ils refusaient ce genre qui ne leur était pas familier.

Niant l'hermaphrodisme des plantes, les botanistes d'alors ont accordé une importance induite à la reproduction sexuée des végétaux. Linné avoua : «La structure singulière et la fonction remarquable des étamines et du pistil m'intriguaient et je me demandais ce que la Nature y avait caché.» Il attribua même une reproduction sexuée aux «plantes qui se marient en secret», c'est-à-dire aux fougères, aux mousses, aux algues et aux champignons (on ignorait alors comment ils se reproduisent).

Non seulement les plantes étaient sexuées, mais, pour Linné, elles devenaient même des «époux» et des «épouses». Introduisant une nouvelle terminologie pour décrire les fleurs, Linné rejeta les termes d'étamine et de pistil, pour adopter *andria* et *gynia*, dérivés des suffixes grecs signifiant époux (*aner*) et épouse (*gyne*). La *Clé du système sexuel*, qu'il publia en 1737, contenait les secrets des mariages des plantes.

Quand les fleurs mâles et femelles se trouvaient sur la même plante, elles partageaient la même maison, mais pas le même lit ; quand elles se trouvaient sur des plantes séparées, elles vivaient dans deux maisons. Les fleurs hermaphrodites ressemblaient époux et épouses dans un seul lit.

Linné classa les végétaux d'après le nombre, la proportion et la position des étamines, et leur attribua des noms qui se terminaient par le suffixe *andria*. Monandria (qui n'a qu'un seul époux) signifiait que la fleur hermaphrodite n'avait qu'une seule étamine ; diandria indiquait la présence de deux étamines, etc. Ces classes étaient subdivisées en 65 ordres environ, fondés sur le nombre, la proportion et la position des pistils femelles : monogynia, digynia, trigynia, etc. Dès lors, un crocus, qui a trois étamines et un pistil, serait un triandria monogynia. Les ordres étaient divisés en genres, en fonction des caractéristiques du calice, de la fleur et d'autres parties du fruit ; puis en espèces, d'après diverses caracté-

ristiques de la plante, notamment des feuilles. Enfin venaient les variétés.

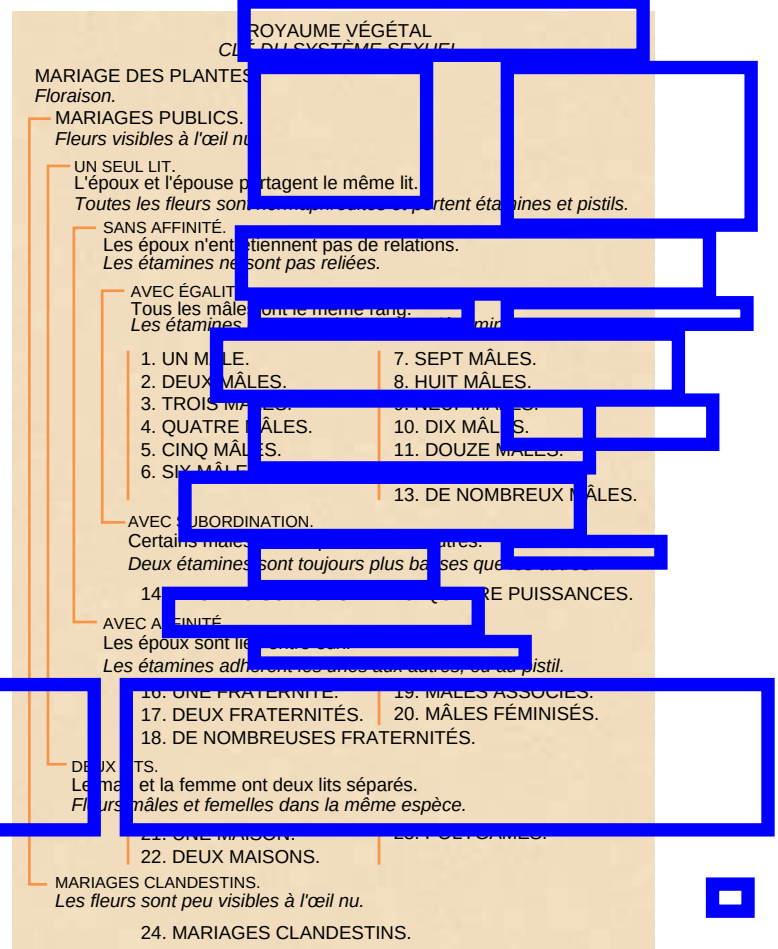
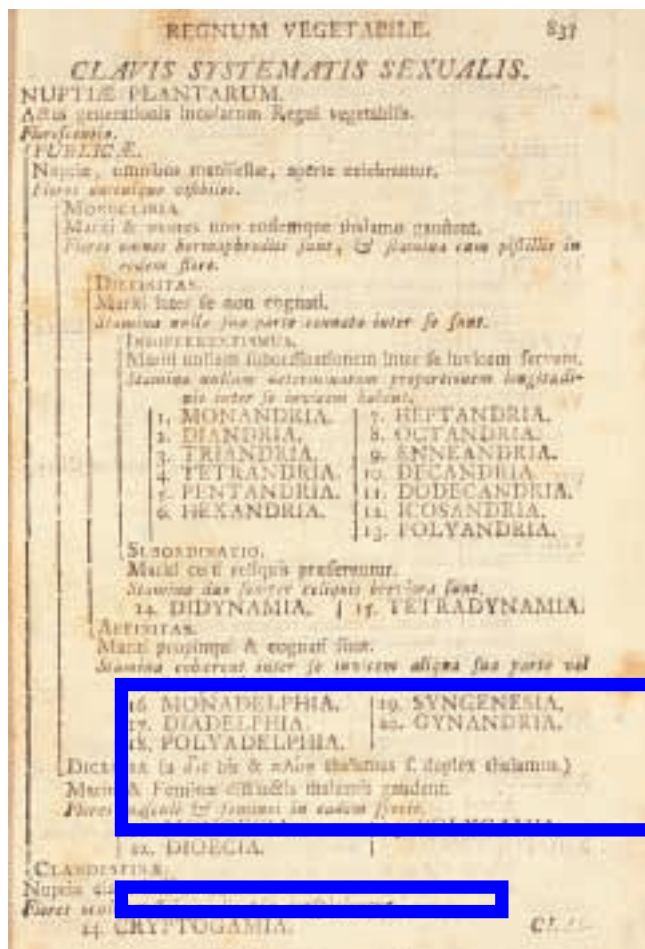
Linné s'intéressait autant aux noces des plantes qu'à leurs activités sexuelles. Avant leur mariage légitime, les arbres et les arbustes arboraient des «tenues nuptiales». Les pétales des fleurs s'ouvraient comme autant de «couches nuptiales» pour le jeune époux et sa dulcinée, tandis que le rideau de la corolle préservait l'intimité des amoureux. Linné divisa le monde végétal en fonction du type de mariage contracté, certains mariages étant publics et autres clandestins. En fait, ces deux types de mariage étaient inspirés des coutumes alors en vigueur en Europe ; ce n'est qu'en 1753, en Angleterre, que l'acte de mariage mit un terme aux mariages clandestins en imposant une proclamation publique.

En Europe, les coutumes nuptiales évoluaient rapidement, à mesure que les traditions se délitait. Les nobles, bourgeois et les paysans aisés qui arrangeaient le mariage de leurs enfants prenaient plus uniquement en compte

des considérations financières, mais acceptaient que l'amour et l'affection soient des raisons légitimes de se marier.

Si les plantes de Linné célébraient leurs noces, la majorité d'entre elles ne contractaient pas de mariage légitime. Seule une classe de végétaux, les manandria, dont le genre tropical *Canna* en est un exemple, pratiquait la monogamie. Les plantes des autres classes avaient des liaisons avec deux, trois, vingt «époux», voire davantage, qui partageaient la couche nuptiale (c'est-à-dire les pétales de la fleur) avec une épouse. L'iris commun, par exemple, avait trois maris.

François Darwin, le grand-père de Charles, a propagé la pensée de Linné en Angleterre, mais il ne limita pas les relations sexuelles des végétaux aux liens sacrés du mariage. Dans son ouvrage *Les amours des plantes* (1789), les végétaux de Darwin connaissaient toutes les formes imaginables d'union sexuelle. *Collinsonia*, dans un doux souvenir satisfaisait tous à tour de rôle deux frères. *Meadia*, une primevère commune,



LA CLÉ DU SYSTÈME VÉGÉTAL DE LINNÉ a été consignée dans une charte (à gauche) publiée dans son ouvrage *Systema Naturæ* (édition de 1759). La traduction (à droite) a d'abord été réalisée du latin à l'anglais par William Turton, en 1802, dans un ouvrage intitulé *Un système général de la nature*. Les plantes y sont classées selon leur type de «mariage». Celles dont les fleurs sont visibles font un mariage

public ; les autres des mariages clandestins. Quand les fleurs mâles et femelles sont présentes ensemble sur la même plante, les «époux» occupent la même maison, mais quand les organes mâles et femelles sont présents sur la même fleur, les couples partagent le même lit. Le nombre de maris dans un lit définit la classe de la plante, celui des femmes, les ordres (ces derniers n'ont pas été représentés ici).



MARIA SIBILLA MERIAN (en haut à droite) a voyagé des Pays-Bas jusqu'au Surinam, en 1699, alors qu'elle était âgée de 52 ans. Elle y a peint la faune et la flore, par exemple cette fleur de la passion et son fruit (*Cissampelos*). Malgré ses connaissances en botanique, elle ne s'aventura pas à proposer une classification des plantes, domaine alors réservé aux hommes.



on «l'ismonandrien», le lis symbolisant la virginité.

D'autres botanistes ont proposé des systèmes de classification. En 1799, 20 ans après la mort de Linné, quand le naturaliste anglais Robert Thornton publia une version simplifiée du système de Linné, il dénombrâ 2 systèmes différents. Un siècle auparavant, en Angleterre, John Ray avait imaginé comment établir des genres végétaux fondés sur la forme de la fleur, du calice, des

graines et de leur enveloppe. En France, Joseph Pitton de Tournefort définît les genres d'après les caractéristiques de la corolle et du fruit. En Suisse, au XVIII^e siècle, Albrecht von Haller déclara que l'environnement géographique modelait les plantes, et que le développement et l'apparence des végétaux devaient être mentionnés dans tout système de classification.

Malgré l'abondance de ces systèmes, celui de Linné, simple et pratique, fut adopté dans toute l'Europe, dès 1740, mais des polémiques longues et virulentes éclatèrent à propos des conséquences morales et scientifiques de la classification de Linné. Les «antisexualistes», les opposants à ce système, attaquèrent ce travail, déclenchant une controverse qui se poursuivit jusqu'au XIX^e siècle.

En 1740, William Smellie, le premier éditeur de l'*Encyclopædia Britannica*, attaqua violemment «les séductions charmantes» de l'hypothèse sexualiste et soutint que cette dernière ne résistait

pas aux faits. De nombreux animaux (il mentionna les polypes et les mille-pattes) se reproduisent sans étreinte sexuelle et, clamait-il, si ceux-ci sont les oubliés des «tendresses de l'amour», pourquoi le chêne et le champignon auraient-ils ce privilège? Smellie accusa Linné de pousser son analogie bien au-delà des limites de la décence, affirmant que les métaphores utilisées surpassaient «les

romans les plus obscènes». Cette opinion était assez partagée. Face à une telle opposition, les biologistes qui ont popularisé le système de Linné n'ont guère utilisé les images sexuelles, à l'exception d'Erasmus Darwin.

A cause de ces polémiques, personne ne remarqua que Linné fut l'un des premiers à souligner l'importance de la reproduction sexuée chez les végétaux. Le succès de son système ne tenait pas au fait qu'il était «naturel», reproduisant l'ordre de Dieu dans la nature : Linné reconnaissait lui-même que son système était artificiel, car il était fondé sur des caractères morphologiques qui varient souvent d'une fleur à l'autre sur une même plante. Linné a parfois placé dans la même classe des plantes n'ayant pas le même nombre d'étamines, sapant ainsi son propre système.

Au XVIII^e siècle, pourquoi l'étude de la sexualité végétale est-elle devenue une priorité pour de nombreux botanistes? En grande partie en raison de l'intérêt porté alors aux différences sexuelles chez l'homme. Cette ère de découverte coïncida avec la question des droits de la femme. Les différences sexuelles prirent une grande importance, au moment même où les philosophes posaient que «tous les hommes sont égaux en nature».

Si les femmes ne bénéficiaient pas des mêmes droits que les hommes (et c'était le cas), on devait le justifier par des causes naturelles. La totale subordination des femmes vis-à-vis de leur père et de leur mari semblait justifiée par la hiérarchie que Linné prétendait avoir trouvée dans le règne végétal.

Si les taxinomistes du XVIII^e siècle avaient compté des femmes dans leurs rangs, l'histoire aurait-elle été différente? La question reste ouverte, bien que le sexe des scientifiques ne devrait pas influencer leurs résultats. Toutefois, la science était alors l'apanage du sexe fort ; les chercheurs étudiaient la nature à travers le prisme des relations sociales, et la botanique, entre autres sciences naturelles, faisait souvent la confusion entre certains aspects du monde social et ceux du monde naturel.

Aujourd'hui, les femmes s'engagent de plus en plus dans l'aventure de la connaissance et participent aux découvertes scientifiques, mais nous devons rester vigilants et réfléchir à la façon dont la société façonne la science, en fonction des objectifs qu'elle se fixe.

Londa SCHIEBINGER est professeur d'histoire et dirige l'Institut Femmes, sciences et techniques, à l'Université de Pennsylvanie.

Paradoxes gustatifs

L'environnement des arômes ou des molécules sapides modifie la perception que nous en avons.

Un verre de vinaigre, imbuvable, devient supportable si l'on ajoute une grande quantité de sucre. Pourtant l'acidité mesurée par la concentration en ions hydrogène ne change pas. Pourquoi la sensation acide est-elle alors affaiblie ? Parce que la perception des saveurs dépend de l'environnement des récepteurs gustatifs. Les mêmes interactions existent autour des récepteurs olfactifs. Au Centre INRA de Nantes, Chantal Castelain et ses collègues cherchent à identifier ces synergies afin de poser les bases d'une aromatisation rationnelle des produits alimentaires.

La plupart des aliments sont composés à la fois d'eau et de matières grasses, insolubles dans l'eau ; selon leur composition chimique, les arômes se répartissent différemment dans ces phases. Puis, quand les aliments sont mis en bouche, les molécules aromatiques ou sapides atteignent les récepteurs gustatifs après avoir diffusé dans la salive (solution aqueuse) et dans les phases de type huile des membranes cellulaires où se trouvent les récepteurs gustatifs. Simultanément ils passent en phase vapeur, dans l'air contenu dans la bouche, où ils migrent vers les récepteurs olfactifs, logés aussi, comme les récepteurs gustatifs, dans des phases de type huile. Autrement dit, on ne peut maîtriser l'aromatisation des produits alimentaires que si l'on comprend les diffusions de molécules entre des phases liquides, de type eau ou huile, et des phases gazeuses.

Afin d'analyser ces migrations, les biochimistes nantais ont construit un dispositif où une huile neutre est en contact avec de l'eau, et où l'on peut mesurer la répartition des arômes entre quatre compartiments : dans de l'eau, dans de l'huile, dans l'air qui surmonte l'eau, et dans l'air qui surmonte l'huile (voir la figure). Ils dissolvent les arômes soit dans l'eau, soit dans l'huile, et ils mesurent la concentration dans les trois autres compartiments. Selon les conditions expérimentales, les molécules

aromatiques suivent des trajectoires différentes : quand on les dissout initialement dans l'huile, par exemple, elles passent dans l'air qui surmonte l'huile en même temps qu'elles diffusent dans l'eau et qu'elles passent de l'eau à l'air qui surmonte l'eau.

Plusieurs mélanges de molécules aromatiques ont été testés : d'esters, ou d'aldéhydes, ou d'alcools ou de cétones.

Qu'observe-t-on ?

Les transferts sont plus rapides de l'huile vers l'eau que

Dispositif utilisé pour tester le transfert de molécules aromatiques entre plusieurs phases. On mesure la concentration de ces molécules dans l'air qui surmonte l'huile (allongé latérale) ou l'eau (tube central).

de l'eau vers l'huile pour les esters et pour les cétones, et plus rapides de l'eau vers l'huile que de l'huile vers l'eau pour les alcools et les aldéhydes.

De tels résultats sont paradoxaux : puisqu'il est plus facile de dissoudre les alcools, par exemple, dans l'eau, on pourrait penser qu'ils migreraient difficilement vers l'huile ; de ce fait, le transfert, prévoyait-on, devait être plus lent de l'eau vers l'huile que de l'huile vers l'eau. Pourquoi l'expérimentation a-t-elle contredit cette intuition ? Parce que l'on mesure non seulement le transfert d'une phase liquide dans l'autre, mais aussi parce que les arômes diffusent ensuite dans

l'air qui surmonte les phases liquides ; or, si un composé est peu soluble dans l'huile, il aura tendance à quitter rapidement l'huile, pour atteindre la phase supérieure. Autrement dit, le transfert d'une phase liquide à la phase gazeuse qui le surmonte est plus rapide que le transfert entre deux phases liquides.

Pour mieux maîtriser l'aromatisation des produits alimentaires, ces études doivent être complétées par une exploration des effets des molécules aromatiques sur les récepteurs du nez, après traversée de la couche de mucus qui tapisse ces récepteurs et dissolution dans les phases hydrophobes des membranes cellulaires.

Aussi les chercheurs nantais étudient-ils aujourd'hui la perception des arômes au-dessus des phases eau et huile. Ayant dissous une même molécule aromatique dans deux liquides – de l'huile et de l'eau – en concentrations telles qu'un détecteur mesure la même pression partielle de la molécule aromatique au-dessus des deux liquides, ils ont analysé les perceptions de personnes qui respiraient l'air au-dessus des deux liquides.

Paradoxalement le nez humain perçoit parfois une différence. Pour certaines molécules le nez donne une indication très proche de celle des détecteurs (par exemple pour le linalol, à odeur de lavande ou de bergamote, selon les concentrations), mais aucune loi générale n'a été dégagée, puisque, pour d'autres arômes, la perception est différente : par exemple, pour le 1-octène-3-ol, à l'odeur de champignon, le benzaldéhyde, à l'odeur d'amande, et l'acétophénone, à l'odeur de miel-cire. Manifestement la présence de vapeur d'eau peut interagir avec la perception de l'arôme.

De tels phénomènes se retrouvent probablement pour la gustation : pensons au vinaigre additionné de sucre. Ils expliquent que la texture des aliments détermine les goûts et arômes, en modifiant la durée pendant laquelle les molécules sapides ou aromatiques sont en contact avec les

les vases de diffusion de ces molécules, ces aliments vers les récepteurs olfactifs ou gustatifs. Une mayonnaise trop acide le devient moins quand on la bat, parce que sa texture plus ferme ralentirait ces transferts.

Hervé This

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 27 mars 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Moisson de Jupiters

Trois planètes de la taille de Jupiter hors du Système solaire.

Les nuits d'été sont propices à l'admiration de la voûte céleste. Les observateurs attentifs retracent les constellations : vers minuit, à la mi-juillet, la Grande Ourse est au Nord-Ouest, la Vierge se couche à l'Ouest, Pégase se lève vers l'Est. Ces régions du ciel méritent notre attention : on y a découvert les premières planètes extra-solaires en orbite autour d'étoiles analogues à la nôtre.

Une étoile entourée de planètes tourne autour du centre de masse du système : pour un observateur terrestre, elle s'approche et s'éloigne périodiquement. Lorsqu'elle s'éloigne, les raies de son spectre lumineux sont décalées vers les grandes longueurs d'onde, par effet Doppler (comme la sirène d'une ambulance qui s'éloigne semble plus grave) ; lorsqu'elle se rapproche, les raies sont décalées vers les courtes longueurs d'onde. Ces variations de longueur d'onde des raies permettent de calculer la vitesse de l'étoile sur son orbite. Comme on connaît la masse de l'étoile, qui dépend de sa luminosité, les lois de Kepler indiquent, sans équivoque, les masses des planètes et leur distance à l'étoile.

Par cette méthode, trois corps ont été découverts en orbite autour de trois

étoiles de même masse que le Soleil : le premier, de la masse de Jupiter, à 0,05 unité astronomique de 51 de Pégase (l'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil), le second, de 2,8 fois la masse de Jupiter, à 2 unités astronomiques de 47 de la Grande Ourse et le troisième, de 6,4 fois la masse de Jupiter, à 0,5 unité astronomique de 70 de la Vierge. Dans le Système solaire, Jupiter est à 5 unités astronomiques du Soleil.

Quelle est la nature de ces corps ? Les planètes du Système solaire sont issues de l'agrégation de poussières en orbite au sein d'un disque protoplanétaire. Même les planètes géantes gazeuses ont un noyau solide. Le noyau de Jupiter, environ deux fois plus gros que la Terre, a attiré, par gravitation, l'hydrogène qui compose aujourd'hui 90 pour cent de la planète.

Une planète peut aussi se former par effondrement d'un nuage de gaz, comme une étoile. L'évolution d'un nuage de gaz qui s'effondre dépend de sa masse. Si cette masse dépasse 80 fois celle de Jupiter, les gaz comprimés au centre sont suffisamment chauffés pour que la réaction de fusion de l'hydrogène en hélium démarre : une

étoile analogue au Soleil se forme. Si la masse du nuage est comprise entre 13 et 80 fois celle de Jupiter, seule la réaction de destruction du deutérium en proton et en neutrons s'enclenche : l'étoile reste une naine brune. Enfin, si la masse est inférieure à 13 fois celle de Jupiter, aucune réaction n'est possible : la boule de gaz est alors nommée planète. Lors de la formation de l'étoile, le nuage de gaz peut se couper en deux, et donner naissance à un système d'étoiles doubles, ou à une étoile accompagnée d'une naine brune ou d'une planète.

GAZ OU POUSSIÈRES ?

Les paramètres orbitaux mesurés par les astronomes permettent parfois de trancher entre les deux scénarios de formation. L'orbite de la planète qui gravite au bout de 70 de la Vierge est une ellipse très excentrée. La formation à partir d'un disque protoplanétaire est donc peu probable : au sein d'un tel disque, les collisions aléatoires que subissent les poussières situées sur des orbites elliptiques transforment celles-ci en orbites circulaires (notons que l'orbite de Mercure, qui n'est pas circulaire, est une exception expliquée par l'attraction gravitationnelle des autres planètes du Système solaire). Si d'autres planètes perturbaient l'orbite de celle observée autour de 70 de la Vierge, elles seraient très massives et on les aurait observées aussi.

La découverte de ces premières planètes, et d'autres qui suivront bientôt, permettra de mieux comprendre la formation et la structure du Système solaire. On n'avait jusqu'à présent aucun point de comparaison sûr : la présence de planètes n'est que soupçonnée autour de β -Pictoris, une étoile semblable au Soleil, et l'histoire du système planétaire en orbite autour du pulsar 1257+12, une étoile à neutrons, est très différente de la nôtre.

En outre, si les planètes de 51 de Pégase, 70 de la Vierge ou 57 de la Grande Ourse se sont formées à partir d'un disque protoplanétaire, on peut spéculer sur l'existence de satellites de la taille de la Terre, constitués majoritairement de roches. Ces satellites pourraient-ils abriter la vie ? La température de surface du compagnon de 70 de la Vierge serait de 80 degrés, compatible avec la présence d'eau liquide. Les astronomes se mobilisent pour explorer plus avant ces nouveaux mondes. Le CNRS a décidé de constituer un regroupement national sur ce thème.

Jean SCHNEIDER
CNRS, Observatoire de Paris



Pour la première fois, des planètes ont été découvertes autour d'étoiles analogues au Soleil : 51 de Pégase, 70 de la Vierge et 47 de la Grande Ourse. La masse de ces planètes est comprise entre 1 et 6,4 fois la masse de Jupiter (les étoiles ne sont pas à l'échelle).

Le sens des mots

La statistique de la distance entre deux apparitions du même mot permet de distinguer deux catégories de mots.

Tous les mots de cette phrase n'ont pas la même importance pour sa compréhension. Pour s'en persuader, il suffit de la relire en supprimant soit les huit mots *Tous, les, de, cette, n, on, la, sa*, soit un seul des trois mots *phrase, importance ou compréhension*. Dans le premier cas, la phrase est encore compréhensible, dans le second, plus du tout. Certains mots organisent la syntaxe de la phrase : ce sont les mots que nous nommons «mots grammaticaux». D'autres servent plutôt à exprimer le sens, ce sont les «mots pleins». Nous présentons ici une méthode permettant de distinguer ces populations de mots selon la distance en mots séparant deux occurrences d'un même mot. La base de données utilisée est composée de deux années d'articles du quotidien *Le Monde*, soit environ 40 millions de mots.

Imaginons un texte où un mot *M* est réparti au hasard : en chaque position, la probabilité de trouver le mot *M* est indépendante de la nature des mots qui le précèdent. La loi de probabilité de la distance séparant deux apparitions de *M* est appelée, dans ce qui suit, loi de distribution aléatoire. Réciproquement, si la loi de distribution d'un mot est la loi de distribution aléatoire, la probabilité de le rencontrer en une position ne dépend pas des mots qui l'entourent.

En examinant la loi de distribution du mot *de*, on constate qu'excepté pour des petites distances (jusqu'à six mots), cette loi est très proche de la loi aléatoire : on rencontre le mot *de* dans un texte comme s'il y était réparti aléatoirement. En se fixant un seuil arbitraire de «ressemblance» par rapport à une distribution totalement aléatoire, nous pouvons établir une liste de mots qui ont ce comportement : par exemple, les prépositions *de, par*, les pronoms *il, les*, les déterminants, *la, les*, les formes conjuguées des verbes *mettre, faire*, qui sont des verbes support de la langue (verbes auxiliaires utilisés dans la nominalisation), les adverbes *probablement* et

relativement. Autrement dit, les mots grammaticaux ont une distribution quasi aléatoire. Le choix du seuil de vraisemblance est arbitraire, mais un mot ayant généralement plusieurs significations, la loi calculée est une moyenne sur ses différentes significations.

Pour les mots que nous ne savons classer dans l'une ou l'autre des catégories, la méthode fera un choix qui dépendra du seuil. Plus la tolérance sera faible, plus les mots trouvés seront «purement grammaticaux». Par exemple, le verbe *mettre* est un mot plein dans les phrases où il exprime le déplacement d'un objet, mais c'est un mot grammatical lorsqu'il est utilisé comme verbe support (comme dans *mettre dans l'embarras*).

Ce critère, qui permet de distinguer les mots grammaticaux n'est pas un critère de fréquence : certains termes fréquents comme *France* n'ont pas une distribution aléatoire. L'écart de ces distributions à la loi aléatoire pour les petites distances est le *score syntaxique* qui sépare deux occurrences successives du mot. C'est très peu probable, d'abord, que pour une distribution aléatoire, cette probabilité soit supérieure à celle de trouver deux occurrences séparées par un autre mot. De surcroît, la signature d'un mot (c'est-à-dire l'ensemble de la loi de probabilité) est relativement stable par

changement de corpus : dans des corpus aussi variés qu'une traduction de la Bible et un quotidien, la signature du mot *de* est semblable. La signature des mots grammaticaux ne dépend pas du contenu sémantique des textes, mais du style de l'auteur.

LES MOTS PLEINS

En revanche, on constate que la distribution des mots pleins (qui intuitivement semblent être les porteurs de sens) n'est pas aléatoire : la présence de certains mots dans une partie du texte dépend des autres mots de cette partie. Cette dépendance entre les différents termes est associée au contexte. Dans un article traitant de politique, il est plus probable de trouver des mots comme *ministre* ou *gouvernement*, que dans un article traitant de sport. Réciproquement, un article contenant le mot *gouvernement* traite plus probablement de politique que de sport. Ces deux remarques entraînent que, dans un article contenant le mot *gouvernement*, il est plus probable qu'ailleurs de trouver le mot *ministre*. On dit alors que le mot *gouvernement* a un effet de contexte positif sur le mot *ministre*, et le mot *match* a un effet de contexte négatif sur le mot *ministre*. Nous avons quantifié cet effet de contexte, en comparant la loi de distribution d'un mot dans un contexte donné, avec la loi de distribution aléatoire qu'il aurait s'il était à comparer à la loi aléatoire.

Les perspectives ouvertes par ces études sont au moins triples. La première est l'étude de méthodes de compression de textes (ou d'index) performantes, fondées sur la finesse de la description de la loi de distribution des mots. La deuxième est l'élaboration de catégories sémantiques autour d'un mot, par examen des effets de contexte. À terme, on pourrait lever l'ambiguïté sur le sens des mots en étudiant leurs contextes, ce qui pourrait être appliqué à la traduction automatique. Par exemple, pour le mot *jeu*, nous avons, d'une manière totalement automatisée, obtenu trois ensembles de mots appartenant à trois champs sémantiques distincts : le contexte sportif, le contexte

théâtral, le contexte musical et nous avons aussi obtenu une liste d'expressions contenant le mot *jeu* employé dans n'importe quel contexte. Enfin, on pourrait caractériser un auteur par les signatures, dans son œuvre, des mots à comportements grammaticaux. Jean SENELLART – LADL, Paris

	PG	PS	PPP	UDE	écologie	spectacle
Barre	0,65	1,20	2,70	4,12	1,80	1,55
Chirac	-0,08	0,86	5,97	3,64	1,49	-0,65
Cresson	-0,37	1,49	0,32	0,19	1,12	-1,30
Lalonde	0,28	2,77	1,19	1,66	9,43	-0,19
Mitterrand	2,51	2,22	2,21	1,22	5,22	1,22
... (autres noms partiellement visibles) ...	...	0,64	1,09	0,73	0,56	-1,22

Ces valeurs mesurent la probabilité de trouver une mention d'un personnage politique (*colonne*) dans un bloc de 100 mots autour de la mention d'un parti politique ou d'un autre mot (*ligne*). Plus la valeur est élevée, plus l'effet de contexte est important. La valeur maximale pour un personnage politique s'obtient généralement pour son propre parti, sauf pour le mot *Mitterrand* qui présente un comportement plus grammatical. Le mot *spectacle* à un effet de contexte négatif pour toutes les mentions de personnages politiques.

Les membranes de nos ancêtres

On trouve dans le pétrole la composition chimique des premières cellules vivantes.

Comment les premières cellules vivantes se sont-elles formées? La réponse que proposent Guy Ourisson, Yoichi Nakatani et leurs collaborateurs du Centre de neurochimie de Strasbourg se fonde sur des études *a priori* sans relation avec l'étude de la chimie prébiotique : l'analyse chimique du pétrole.

Il y a une trentaine d'années, G. Ourisson et Pierre Albrecht étudiaient les molécules constituant la matière organique des sédiments : pétroles, charbons, argiles, schistes, calcaires, etc. Ils observaient que la présence d'une molécule nommée cholestane dans de nombreux sédiments, est un indice de la présence initiale de cholestérol (ce dernier, que l'on considère comme un ennemi de nos artères, est un constituant des membranes cellulaires de tous les êtres vivants, à l'exception des bactéries). Le cholestane est fréquemment accompagné de ses dérivés portant un ou deux atomes de carbone supplémentaires, structures que l'on retrouve dans les stérols des plantes ou de certains micro-organismes. Les «fossiles moléculaires» de stérols sont souvent accompagnés de produits nommés diastéranes dont on peut obtenir le squelette par chauffage modéré des dérivés du cholestane avec des argiles : cette «simulation» renforce l'hypothèse d'une présence de cholestérol d'êtres vivants ayant conduit, par chauffage sous pression, dans les entrailles de la Terre, à la formation des pétroles.

Lors de cette étude de la matière organique des sédiments, les chimistes trouvèrent des composés qui furent nommés «géohopanoïdes», dérivés d'une molécule nommée hopane, à 30 atomes de carbone. Cette molécule est un triterpène, c'est-à-dire qu'elle est composée par l'enchaînement de motifs isoprène (voir la

figure), dont le squelette est formé de cinq atomes de carbone.

Les terpènes sont des molécules abondantes dans le monde naturel : on les trouve dans l'essence de térébenthine, dans l'écorce des bouleaux ou dans le parfum des roses ; ce sont des hormones de plantes, des constituants de membranes cellulaires d'archéobactéries, des hormones sexuelles d'animaux, des pigments de légumes... Leur structure fortement ramifiée rend leur biodégradation difficile, ce qui explique leur pérennité dans les sédiments.

Qu'en était l'origine de ces géohopanoïdes? Les chimistes étaient perplexes, car aucun produit naturel connu n'avait une structure moléculaire ayant pu, même par maturation dans les sédiments, se transformer en une molécule ayant cinq atomes de carbone de plus que le hopane,

au demeurant rare. Les géohopanoïdes étaient des structures «orphelines».

Nouvel détournement de l'histoire : les précurseurs des géohopanoïdes furent bientôt trouvés... dans des bactéries : ces «biohopanoïdes» étudiés par Michel Rohmer constituent une classe nouvelle de lipides bactériens : tous sont amphiphiles, avec une partie composée seulement d'atomes de carbone et d'atomes d'hydrogène, qui n'a pas d'affinité pour l'eau, et une queue hydrophile. On sait aujourd'hui, grâce à des résultats obtenus en Allemagne et à Strasbourg, que les biohopanoïdes sont localisés dans les membranes bactériennes, où ils jouent un rôle comparable à celui du cholestérol cellulaire : ils rigidifient les membranes.

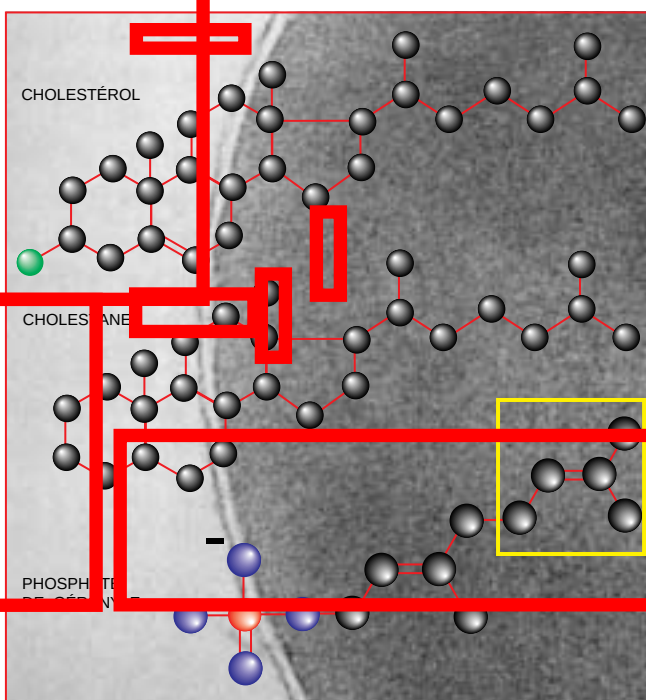
DU SÉDIMENT À LA MEMBRANE

Si les biohopanoïdes sont amphiphiles, comme les phospholipides qui composent les membranes de nos cellules, ils ont la même rigidité et les mêmes dimensions que le cholestérol, qui sert de renforteur de nos membranes cellulaires. D'autre part, les géohopanoïdes ne sont pas les seuls fossiles moléculaires dont les précurseurs soient des terpènes : l'équipe de P. Albrecht a trouvé un grand nombre de familles moléculaires différentes, dont certaines semblent dériver de lipides membranaires bactériens connus, tandis que d'autres sont encore orphelins, comme l'étaient les géohopanoïdes au moment de leur découverte.

Connaisant la structure de ces fossiles moléculaires, les réactions susceptibles de se produire au cours de la maturation dans les sédiments et les mécanismes généraux utilisés par les êtres vivants pour synthétiser leurs constituants, on en a déduit les structures des précurseurs des fossiles moléculaires isolés.

Les chimistes ont alors déterminé que ces précurseurs, connus ou postulés, étaient tous des dérivés terpéniques, qu'ils étaient tous amphiphiles et que leur partie hydrophobe avait soit les dimensions du cholestérol

soit une longueur double, avec deux têtes polaires hydrophiles. Ils en ont déduit – et vérifié expérimentalement – que toutes ces molécules avaient un rôle de renforcement comparable à celui du cholestérol dans les membranes modèles. Ainsi le rôle des dérivés terpéniques serait membranaire, dans tous



Trois molécules associées aux membranes (liseré sur l'image du fond) : le cholestérol (en haut), le cholestane (au milieu) et le phosphate de géranyle (en bas). Les atomes de carbone sont en noir et les atomes d'hydrogène ne sont pas représentés ; ils complètent à quatre la valence de chaque atome de carbone. En vert figure un groupe hydroxyle OH, en violet des atomes d'oxygène et en rouge un atome de phosphore. Le cadre jaune indique un motif isoprène.

les êtres vivants ; dans les archéobactéries, ces molécules seraient les constituants de base des membranes, et, dans les organismes supérieurs, elles serviraient seulement de renforçateurs.

Pourrait-on alors reconnaître, parmi les substances isolées, quelles sont les plus anciennes ? Une molécule semblait ancienne quand sa synthèse pouvait s'effectuer à l'aide de peu d'enzymes et quand les réactions de synthèse étaient analogues à des réactions supposées prébiotiques. Les chimistes ont établi un arbre phylogénétique de tous les terpénoïdes connus ou postulés comme constituants membranaires, et ils ont observé que les constituants membranaires les plus anciens devaient avoir été les phosphates d'alcools polyterpéniques.

MEMBRANES PRIMITIVES

Ces derniers étaient connus, puisqu'ils sont les précurseurs biosynthétiques de tous les terpénoïdes, mais on ne les avait jamais préparés en quantités suffisantes pour vérifier s'ils formaient des vésicules. À Strasbourg, N. Plobeck s'est livré à cette synthèse, et il a alors obtenu des phosphates de bis-polyterpényle : ceux qui portaient deux queues hydrophobes courtes, à cinq atomes de carbone, étaient solubles dans l'eau, mais ceux qui portaient deux queues longues, à 15 ou à 20 atomes de carbone, formaient des vésicules. De surcroît, même le phosphate de bis-géranyle, avec deux queues à seulement dix atomes de carbone, formait également des vésicules.

Une vésicule n'est pas une cellule, mais elle en possède plusieurs propriétés caractéristiques. Par exemple, l'intérieur de la membrane elle-même constitue une phase lipidique : l'ajout d'une trace d'un hydrocarbure fluorescent, insoluble dans l'eau mais soluble dans la membrane, rend fluorescente la mince pellicule qui enveloppe les vésicules. En outre, au moins sur de petites vésicules, l'environnement différent des couches interne et externe conduit à des différences d'acidité et à des possibilités de transport qui sont à l'étude.

D'où viennent les phosphates d'alcools terpéniques ? On suppose aujourd'hui qu'ils résultent de réactions entre des alcools et des polyphosphates, présents dans les eaux volcaniques. Une simple catalyse acide due à des argiles, par exemple, devrait permettre d'obtenir les alcools polyterpéniques à partir de constituants plus simples, tels l'isobutène et le formaldéhyde. Ainsi la recherche des membranes de nos ancêtres les plus lointains passe, aujourd'hui, par l'exploration chimique de classes de molécules universelles, retrouvées grâce à l'étude du pétrole. □

Vaccin anti-cocaïne

Chez la souris, un vaccin diminue les effets de la drogue.

Lorsque la consommation de cocaïne entraîne parfois des perturbations neurologiques, des anomalies comportementales et un besoin quasi irrésistible de consommer la drogue. Comment lutter contre cette dépendance ? George Koob et ses collègues de l'Institut de recherches Scripps ont considéré la cocaïne comme un agent étranger et « vacciné » les animaux contre cette substance. Ils ont publié dans la revue *Nature* que, de la même façon qu'un vaccin classique protège contre un micro-organisme pathogène, leur vaccin contre la cocaïne rend les souris vaccinées insensibles à la drogue.

Depuis plus de 1 000 ans, les feuilles de coca sont consommées pour leurs effets psychotropes. Selon les Incas, « les anges de Dieu » avaient fait cadeau à l'homme de la feuille de coca pour rassasier ceux qui avaient faim, donner une vigueur nouvelle à ceux qui éprouvaient fatigue et défaillance et faire oublier leurs misères aux malheureux. Les feuilles de coca sont apparues en Europe au milieu du XIX^e siècle. En 1863, un pharmacien corse, Angelo Mariani, a déposé le brevet du vin Mariani, une boisson aux extraits de coca, vite populaire en Europe. La frontière entre le poisson plaisante et médication s'est effacée, l'estomac s'est gâté quand, en 1886, le pharmacien américain John Pemberton a inventé la Coca Cola.

Les feuilles de coca produisent sensiblement les mêmes effets que la substance pure, mais la cocaïne se déverse plus progressivement dans l'estomac, puis dans le sang, et ses effets sont moins intenses que ceux de la poudre administrée par inhalation ou par injection.

La cocaïne favorise la libération de la dopamine et bloque sa recapture dans les zones « de la récompense », le noyau accumbens et le cortex préfrontal : la concentration en dopamine y augmente, procurant les effets mentionnés.

Pour dresser le système immunitaire contre un antigène étranger, celui-ci doit

être stable ; or la molécule de cocaïne se décompose spontanément par hydrolyse. Ainsi, il fallait trouver un moyen d'en empêcher la dégradation. L'équipe de G. Koob y est parvenue en associant un analogue stable de la cocaïne à une protéine-porteur étrangère : le composé ainsi obtenu était alors susceptible d'activer le système immunitaire.

Afin de tester l'efficacité de l'immunisation, les chercheurs ont d'abord évalué l'effet de la cocaïne sur des rats : leur activité locomotrice augmente, et leur comportement devient stéréotypé. Puis, ils ont administré à quelques animaux le « vaccin » contre la cocaïne. Après une injection et deux rappels, l'équipe américaine a injecté de la cocaïne aux rats vaccinés et observé leurs réactions : la drogue n'avait plus d'effet.

Après la vaccination, le système immunitaire produit des anticorps. Lors d'une injection ultérieure de la drogue, les anticorps se fixent sur la cocaïne, l'empêchant de traverser la barrière hématoencéphalique, d'entrer dans le cerveau et d'y exercer ses effets. L'immunisation contre la cocaïne abaisse la concentration en cocaïne dans le cerveau.

Si, devant le vide thérapeutique auquel sont confrontés les médecins qui veulent traiter les toxicomanes, ce résultat est encourageant, de nombreuses questions restent ouvertes : lors de l'expérience menée sur les rats vaccinés, la drogue n'était pas injectée par voie intraveineuse, mais par voie sous-cutanée, de sorte que les anticorps avaient le temps de se fixer sur la cocaïne et de l'empêcher d'agir. Lorsqu'un toxicomane s'administre la drogue par voie intraveineuse, l'action est immédiate et les anticorps neutralisants n'auraient pas le temps d'interdire à la cocaïne de pénétrer dans le cerveau. De surcroît, si les anticorps avaient le temps d'agir, les toxicomanes, n'éprouvant plus les effets qu'ils recherchent, risqueraient de s'administrer des doses croissantes, et de mourir d'overdose.

Enfin, le système immunitaire est très précis, et même s'il reconnaissait la cocaïne, il serait insensible aux analogues que les trafiquants ne manqueraient pas de synthétiser : ces molécules seraient suffisamment proches de la cocaïne pour en reproduire les effets, mais assez différentes pour échapper au système immunitaire. □



Publicité pour le vin Mariani.

Cycliophora

Un nouvel embranchement d'invertébrés marins.

Comment imaginer, lorsque nous découvrons des langoustines, que nous pourrions observer l'une des créatures les plus originales de la planète ? *Symbion pandora*, qui vit sur les parties buccales de ce crustacé, doit à sa petite taille d'être longtemps passé inaperçu. Cette nouvelle espèce est pourtant si différente de tous les autres animaux qu'un nouvel embranchement systématique a été créé pour elle seule : Cycliophora.

Les zoologues classent les animaux en catégories hiérarchisées. Les espèces sont regroupées en genres, les genres en sous-familles et les sous-familles en familles. On trouve ensuite les ordres, les classes, les embranchements et, au sommet, les règnes, animal et végétal. L'embranchement Cycliophora a des affinités avec deux autres embranchements d'invertébrés, essentiellement marins : les

Bryozoaires et les Kamptozoaires. Il en diffère tout d'abord par des aspects déterminants : son cycle de développement original, l'existence de phases sexuées libres, la structure de sa bouche, l'absence de tentacules, la simplicité de son appareil digestif et des organes excréteurs.

Les individus de *Symbion pandora*, d'environ 0,35 millimètre de long, vivent isolés. Ils sont asexués et se reproduisent en formant une larve par bourgeonnement interne. La larve, qui mûrit dans une chambre incubatrice, élabore elle-même un bourgeon interne : son nom, *pandora*, fait allusion à la jarre au contenu mystérieux que Zeus avait confiée à Pandore. Après sa libération, elle se fixe sur la langoustine et se métamorphose.

En période de mue de la langoustine, le bourgeon peut évoluer vers une forme mâle. Ce mâle nain, de 0,085 millimètre de long, incapable de s'alimenter, est libéré

à sa maturité sexuelle et se fixe sur un individu qui bourgeonne une larve femelle : lorsque cette dernière est libérée, elle contient un seul gros ovocyte. Après une période de vie libre et indépendante, elle se fixe et libère l'œuf qui produit alors une larve.

Les espèces de Bryozoaires qui produisent des larves n'incubent aussi qu'un œuf à la fois ; toutefois ces animaux ne sont jamais libres et solitaires : ils sont toujours composés de deux individus au moins. Certains Kamptozoaires sont solitaires et leurs bourgeons sont parfois capables de mener une vie libre, comme les larves de Cycliophora.

PAS DE TENTACULES

À l'état adulte, *Symbion pandora* est constitué de trois parties : un cône buccal en forme de cloche renversée, un tronc ovoïde et un pédoncule. La bouche, circulaire, est formée d'une alternance de cellules ciliées et de cellules musculaires, et fermée par deux sphincters successifs. Le tube digestif, recourbé en U, se termine par un anus indépendant de la bouche, comme chez les Bryozoaires (chez les Kamptozoaires, les deux orifices sont réunis par un anneau de tentacules). L'absence de tentacules autour de la bouche ou de l'anus est une autre caractéristique de *Symbion pandora*.

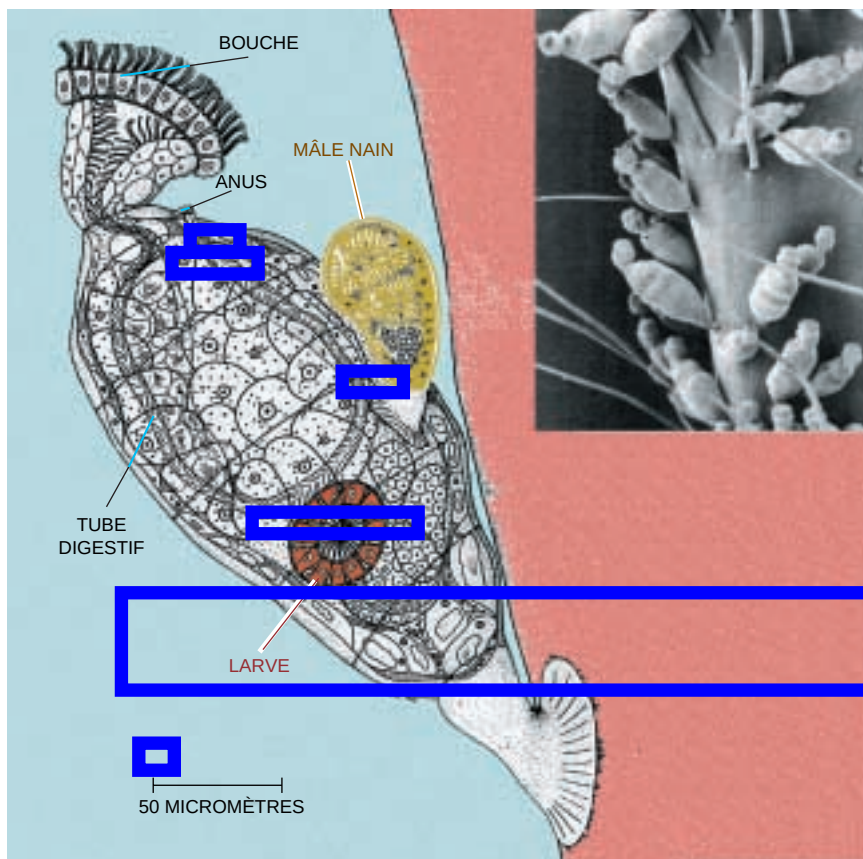
Le tube digestif est constitué d'un estomac, d'un intestin et d'un rectum. Il est formé précédemment chez la larve où il semble fonctionnel, comme chez des larves évoluées de Bryozoaires. Le tube digestif des adultes de ces derniers est toutefois plus complexe : il comprend des segments individualisés plus diversifiés (œsophage, cæcum digestif, pylore).

Deux protonéphridies, des organes ayant la même fonction que le rein chez les vertébrés, assurent l'excrétion. Ces organes sont présents en grand nombre chez les Kamptozoaires, mais inexistant chez les Bryozoaires. Un ganglion nerveux est situé à la partie antérieure du tronc, au niveau du pore anal et de la limite du cône buccal et de l'estomac ; il semble moins complexe que chez les Bryozoaires.

Comme chez deux des trois classes actuelles de Bryozoaires, le tube digestif et le ganglion nerveux de *Symbion pandora* dégénèrent périodiquement : ils sont ultérieurement remplacés par des vicières bourgeonnés à l'intérieur de l'organisme à partir de l'épiderme. On n'observe pas ce phénomène chez les Kamptozoaires ; toutefois la plupart des ganglions nerveux de la larve disparaissent lors de sa métamorphose.

Jean-Loup D'HONDT
CNRS, MNHN

Laboratoire de biologie
des invertébrés marins et malacologie



Symbion pandora, seule espèce de l'embranchement Cycliophora, vit sur les parties buccales de la langoustine (photographie à droite). Il se reproduit par bourgeonnement interne d'une larve. Une différenciation sexuelle peut apparaître : un mâle nain est produit. Il se fixe alors sur un autre individu et féconde la larve contenue par ce dernier.

Gènes et anxiété

Certains facteurs de l'anxiété sont héréditaires.

Sil on dispose aujourd'hui de médicaments qui soulagent l'anxiété, on comprend encore mal les différents mécanismes qui la déclenchent. Quand deux lignées de souris consanguines sont élevées dans des conditions identiques, et que l'une d'elles présente des comportements plus anxieux que d'autres, des facteurs génétiques sont vraisemblablement en cause. La difficulté reste de trouver ces gènes liés à l'anxiété parmi la multitude des autres gènes. Nous avons utilisé des souris qui ont en commun la quasi-totalité de leur génome, hormis les gènes qui déterminent une caractéristique physique facilement identifiable (un pelage marron, une pigmentation claire ou encore de petites oreilles) et quelques gènes voisins. Certaines manifestent des réactions anxieuses exacerbées : l'anxiété serait modulée par des gènes localisés sur des fragments de chromosome qui contiennent aussi les gènes codant ces caractéristiques physiques.

Nous disposons d'une lignée de souris consanguines dite ABP/Le, où tous les sujets sont génétiquement identiques et présentent six caractères identifiables à l'œil nu, telles la couleur de la robe ou la taille des oreilles. Ces caractères sont commandés par des gènes situés sur de petits fragments de chromosomes dont la localisation est connue. Ces petits fragments comportent aussi des gènes inconnus. Dans le cas de la lignée ABP/Le, les caractères sont récessifs, c'est-à-dire que le caractère morphologique apparaît seulement quand la souris a le gène en double exemplaire.

Le gène *b* produit la couleur brune de la robe ; il est situé sur le chromosome 4 de la souris. Le gène *p*, responsable de l'éclaircissement de la pigmentation du pelage et des yeux, est situé sur le chromosome 7. Enfin le gène *se* qui produit les petites oreilles est localisé sur le chromosome 9. En croisant des souris ABP/Le avec des souris d'une autre lignée, on obtient, à la deuxième génération, des animaux porteurs d'une seule caractéristique morphologique commandée par ces gènes *b*, *p* ou *se* (c'est-à-dire porteurs de deux copies de l'un de

ces gènes). On peut comparer ces animaux avec d'autres qui possèdent une seule copie d'un de ces gènes, ou même qui n'en ont aucune. Si l'on observe une différence de comportement entre les sujets qui présentent un caractère morphologique et ceux qui en sont dépourvus, on attribue la différence à des gènes situés sur le fragment de chromosome qui commande la couleur du pelage ou la taille des oreilles.

En utilisant cette méthode, nous avons effectivement montré que certaines souris sont plus anxieuses que d'autres. Comment évalue-t-on l'anxiété chez ces animaux ? On qualifie d'anxieux des animaux qui passent plus de temps que les autres dans la périphérie d'une enceinte qu'ils doivent explorer : ils « n'osent » pas s'aventurer en zone découverte, au centre de l'enceinte. De même, le comportement de toilettage (les animaux se lèchent) est généralement déclenché par un stress et, par conséquent, associé à l'anxiété. Par ailleurs, on constate que les médicaments anxiolytiques administrés aux souris « anxieuses » suppriment ces comportements : traitées par les benzodiazépines, par exemple, elles explorent plus facilement une enceinte et leur activité de toilettage diminue.

Ainsi, nous avons constaté que les souris qui portent deux exemplaires des gènes *b* ou *p* évitent davantage le centre des enceintes inconnues que les autres, et que celles qui ont deux copies du gène *se* ont une activité de toilettage plus fréquente. Nous en avons déduit qu'un ou plusieurs gènes situés sur les chromosomes 4, 7 et 9 favorisent les comportements « anxieux » chez la souris.

On sait que le récepteur du GABA, sur lequel agissent les benzodiazépines, intervient dans l'anxiété. Or les gènes *b* et *p* sont localisés à proximité de gènes codant diverses sous-unités de ce récepteur. De même, le gène *se* se situe proche du gène codant un des récepteurs de la sérotonine, un neurotransmetteur dont l'activité est perturbée chez les sujets anxieux. Les gènes *b*, *p* et *se* perturbent-ils l'expression de certains gènes proches qui participent à l'anxiété ? Sont-ils eux-mêmes anxiogènes ? Ces questions restent ouvertes.

Il reste difficile de préciser la part de l'acquis et de l'inné dans l'anxiété, et des travaux complémentaires devront confirmer que ces résultats, obtenus dans des lignées particulières de souris, s'appliquent à d'autres rongeurs, voire à d'autres mammifères. Toutefois, il semble désormais acquis que plusieurs gènes participent au déclenchement des comportements anxieux.

Yan CLÉMENT et Georges CHAPOUTHIER
CNRS – Université Paris VI



SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT

PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

Les impossibles
de
l'agriculture

avec
GUY DARRAS
président de l'INRA

LE SAMEDI 9 MARS 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

L'évolution des galaxies anciennes

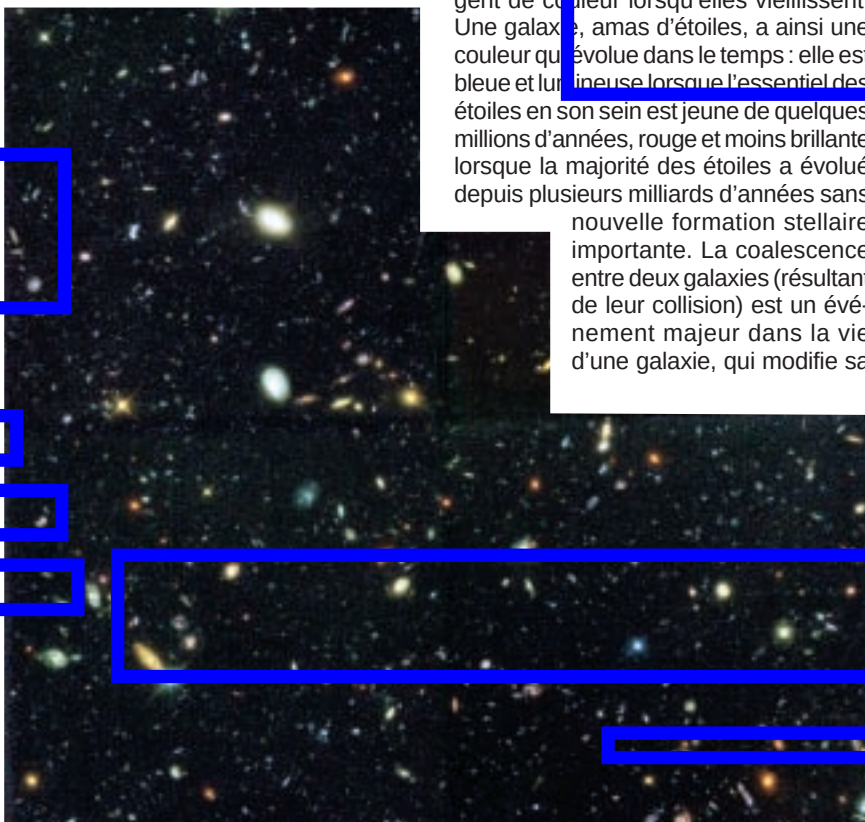
La coalescence de deux galaxies engendre une flambée d'étoiles jeunes.

Le ciel est tapissé de milliards de galaxies bleues. Ces galaxies, les plus anciennes qu'on puisse observer, nous éclairent sur les mécanismes d'évolution des galaxies. Très lointaines et très peu lumineuses, elles étaient mal connues ; les nouvelles observations de notre équipe franco-canadienne apportent les premiers éléments quantitatifs sur l'évolution de ces galaxies. L'étude a montré que l'évolution temporelle passive des populations stellaires dans les galaxies et leur coalescence expliquent le grand nombre de galaxies peu lumineuses.

Au début des années 1980, l'astronome américain John Tyson et ses collègues poussent le télescope de Cerro

Tololo, au Chili, à ses limites. Grâce aux nouveaux détecteurs à transfert de charge et à de très longs temps de pose avoisinant une nuit entière, les images explorent une profondeur inégalée : une nouvelle population de galaxies d'éclat très faibles apparaît. Ces galaxies ont deux propriétés spécifiques : elles sont très bleues, et leur nombre, observé en projection sur le ciel, est extrêmement élevé. On en compte plus d'un demi-million par degré carré (une surface équivalente à cinq fois celle de la pleine lune), soit 5 à 15 fois plus que ce qui était extrapolé à partir de la densité locale des galaxies.

Quelles peuvent être les raisons de ces fortes densités ? Elles sont expliquées par l'histoire des galaxies, lesquelles changent de couleur lorsqu'elles vieillissent. Une galaxie, amas d'étoiles, a ainsi une couleur qui évolue dans le temps : elle est bleue et lumineuse lorsque l'essentiel des étoiles en son sein est jeune de quelques millions d'années, rouge et moins brillante lorsque la majorité des étoiles a évolué depuis plusieurs milliards d'années sans nouvelle formation stellaire importante. La coalescence entre deux galaxies (résultant de leur collision) est un événement majeur dans la vie d'une galaxie, qui modifie sa



Sur cette photographie, prise par le télescope spatial Hubble, on voit les galaxies les plus lointaines observables et donc les plus anciennes. Elles sont plus nombreuses que ce que l'on pensait : dans ce champ (celui du chas d'une aiguille tenue à bout de bras), on en distingue 1 500 à divers stades de leur évolution. Une période de formation stellaire intense et de coalescence entre galaxies accroît leur luminosité et augmente le nombre de galaxies visibles.

morphologie et entraîne une flambée d'étoiles.

Ces deux phénomènes expliqueraient la forte densité de galaxies bleues. Une formation d'étoiles plus élevée par le passé fait que les galaxies sont alors plus bleues et plus lumineuses, ce qui permet d'observer un plus grand nombre de galaxies de faibles masses. Si la coalescence est importante durant la vie d'une galaxie, les observations profondes doivent révéler un nombre de galaxies beaucoup plus important que ce qu'une simple extrapolation à partir de la densité locale ne laissait supposer.

ÉLOIGNEMENT ET ÂGE DES GALAXIES

Pour dater les galaxies, ce qui est indispensable pour connaître leur évolution, on mesure leur distance, les deux données étant liées par l'expansion de l'Univers : en observant les galaxies lointaines, on observe le passé. La mesure du décalage vers le rouge d'une galaxie (et donc de sa distance) nécessite dix fois plus de temps que l'enregistrement d'une image ; cette mesure est trop longue pour être systématiquement appliquée.

Fin 1992, notre groupe franco-canadien commence un sondage spectroscopique avec le télescope de 3,6 mètres de diamètre Canada-France-Hawaii. Grâce à la nouvelle technique multi-spectrale (qui consiste à enregistrer l'émission lumineuse d'une centaine de galaxies en une pose), notre équipe a mesuré l'éloignement de 600 galaxies lointaines en un temps record. Les galaxies les plus lointaines sont vieilles de six à sept milliards d'années. L'étude de cette population ancienne permet de retracer l'histoire des galaxies.

La luminosité des galaxies les plus bleues diminue d'un facteur trois en six milliards d'années. En revanche, pour les galaxies plus rouges, on observe peu de changements de luminosité sur une période analogue, ce qui dénote que leur âge est supérieur à la moitié de l'âge de l'Univers. Ces observations conjointes, réalisées à l'aide du télescope spatial Hubble, montrent que les galaxies bleues les plus anciennes ont des formes plus torturées, indicatrices d'importantes interactions et de flambées localisées d'étoiles. La coalescence de petites galaxies avec des galaxies beaucoup plus massives a été très fréquente par le passé. Les traces de phénomènes plus violents, comme la rencontre de deux galaxies, chacune de masse comparable à celle de notre Voie lactée, sont, elles aussi, souvent observées.

Olivier LE FÈVRE
DAEC, Observatoire de Paris-Meudon

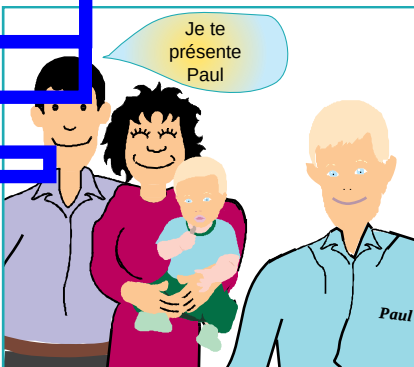
Photos révélatrices

Les bébés ressemblent à leur père.

Comme il ressemble à son père ! Quand les parents ou amis prononcent cette phrase rituelle, ils savent bien qui est le père. Qu'en serait-il s'ils l'ignoraient ? La ressemblance est-elle parente ? Des psychologues de l'Université de San Diego l'ont évaluée en montrant à des volontaires des photographies fournies par 22 familles. Les enfants avaient été photographiés quand ils avaient 10 et 20 ans et leurs parents, quand l'enfant avait un et 20 ans. Les 122 volontaires devaient apparier les photographies de l'enfant avec une mère ou un père choisis parmi trois photographies de femmes ou d'hommes (et où figurait effectivement la mère ou le père).

Les enfants de 10 et 20 ans ne ressemblent pas davantage à leurs parents qu'à des personnes prises au hasard. Les enfants de un an ne ressemblent pas à leur mère. En revanche, les appariements de photographies d'enfants de un an et de leur père sont corrects une fois sur deux (un appariement aléatoire ne serait juste qu'une fois sur trois, puisqu'il fallait choisir entre trois photos).

Pourquoi les enfants de un an (filles ou garçons) ressemblent-ils à leur père, plus qu'à leur mère ? Selon les psychologues responsables de l'étude, cette ressemblance spécifique aurait un avantage adaptatif pour le bébé : si la mère est sûre que l'enfant est d'elle, le père n'est pas. La ressemblance renforcerait l'instinct du père, rassuré sur sa paternité : reconnaissant l'enfant, il s'occuperait davantage de lui. Reste une question : quel est le handicap pour les enfants dont le père n'est pas celui que l'on pense, et qui représenteraient environ 10 pour cent des nouveau-nés ?



INSTITUT DE CALCUL MATHÉMATIQUE

L'Institut de Calcul Mathématique annonce le premier numéro de la "Lettre de l'Institut", qui paraîtra tous les trois mois et sera consacrée à des informations et à des débats à propos de la recherche et de ses applications. Sont concernés : les étudiants, à partir de la maîtrise, et les chercheurs.

Au sommaire du premier numéro, daté 1er janvier 1996 :

- Editorial, par Bernard Beauzamy
- Les problèmes du mathématicien dans une Université non scientifique, par Jacqueline Fleckinger
- Les mathématiques vont-elles survivre ? Commentaire par un article de M.I. Arnold
- Les processus mentaux de la création, par Gustave Choquet
- Nouvelles diverses
- Page culturelle

Au sommaire du deuxième numéro (parution au 1er avril) : Un dossier sur l'emploi en mathématiques

Abonnement annuel : 100 francs pour quatre numéros

Institut de Calcul Mathématique
37, rue Tournefort
75005 PARIS
Tél : 47-07-52-92
Fax : 48-07-83-97

Reconstitutions

En combinant tomographie, dessin assisté par ordinateur et stéréolithographie, on reconstitue des fossiles anciens sans les manipuler.

Nos connaissances sur l'évolution de l'homme reposent essentiellement sur des comparaisons de squelettes fossiles rares et incomplets. Leur reconstitution est un puzzle dont un grand nombre de pièces font défaut. De plus, la plupart des ossements sont si friables qu'on risque de les endommager lorsqu'on les dégage de leur gangue de roche, qu'on procède à des moulages d'empreintes ou qu'on les manipule lors d'une reconstitution.

Aussi nous avons mis au point une collaboration entre l'Institut d'Anthropologie et l'Institut d'Informatique de l'Université de Zurich pour développer et valider des méthodes assistées par ordinateur. Ces méthodes permettent d'extraire du peu de matériel fossile disponible un maximum d'informations sans recourir à la manipulation physique des échantillons. Elles reposent sur la combinaison de trois techniques : la tomographie assistée par ordinateur, l'imagerie sur ordinateur et la stéréolithographie.

La tomographie assistée par ordinateur, utilisée en médecine, est parfaitement adaptée au relevé des structures osseuses. Les ossements sont éclairés par un faisceau de rayons X qui les traverse par tranches successives. Les données accumulées sont traitées par ordinateur pour engendrer l'image complète.

Toutefois les images tomographiques telles qu'elles apparaissent sur l'écran ne sont pas très parlantes, et leur exploitation scientifique requiert le traitement de quantités énormes de données. Un

modèle solide est plus expressif, donc plus utile. La stéréolithographie permet de les reconstituer. Cette méthode, couramment utilisée par les ingénieurs pour créer des prototypes réels à partir d'éléments conçus par ordinateur, consiste à polymériser et durcir couche par couche une résine liquide par un rayonnement laser à ultraviolets. Cette technique n'est qu'une variante de haute technologie de la construction de maquettes de paysages à partir de couches de carton.

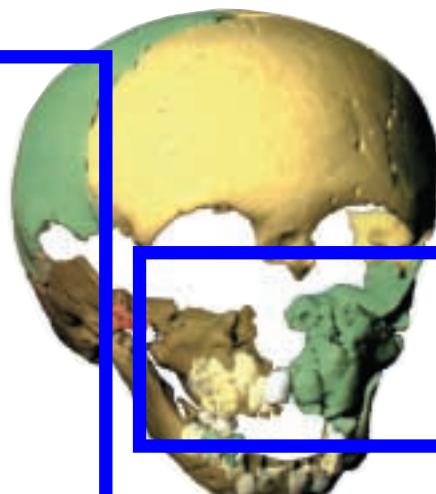
Nous avons aussi développé des logiciels réalistes, à partir des données tomographiques, des modèles tridimensionnels précis de fragments de fossiles que l'on pouvait manipuler de manière interactive à l'écran, mesurer, modifier si nécessaire, puis figer dans les répliques stéréolithographiques.

L'ENFANT DE NÉANDERTAL

Nous avons débuté nos recherches anthropologiques sur les fragments de crâne d'un enfant de Néandertal décédé depuis quelque 40 000 ans. Ces ossements ont été trouvés à Gibraltar et portent le nom du lieu de leur découverte :

Devil's Tower (La Tour du Diable). Ce fossile est d'autant plus intéressant que seuls cinq fragments sont bien conservés et il n'était pas certain qu'ils provenaient du même individu.

Avec la tomographie, nous avons reconstitué le crâne virtuel sur l'écran d'une station graphique (voir la figure 1). Au cours de ce processus, nous nous sommes efforcés de tirer le meilleur



1. Reconstitution virtuelle du crâne de l'enfant de Néandertal découvert à Devil's Tower à l'aide de coupes tomographiques. Les fragments conservés (en jaune) ont été placés dans leur position correcte sur l'écran et les parties manquantes ont été complétées grâce à l'image-miroir des parties disponibles (en vert).

parti de l'ensemble des données tomographiques pour localiser les divers fragments dans leur position anatomique correcte. Les parties manquantes ont pu être reconstituées à partir de l'image-miroir de celles dont nous disposions, ce qui illustre les avantages du traitement des images : alors que dans le passé, les conservateurs passaient des semaines d'un travail manuel pénible et minutieux pour reconstituer une telle image-miroir tridimensionnelle, l'ordinateur les construit en quelques secondes.

La reconstitution du crâne débuta par la mâchoire inférieure : grâce à une opération de chirurgie virtuelle, nous avons pu compléter la branche gauche manquante du maxillaire et implanter des copies symétriques des molaires de lait gauches sur la partie droite. Nous avons alors placé la mâchoire supérieure gauche munie de ses dents ainsi que son image-miroir. Un point reste encore impossible



2. Répliques des fragments du crâne de l'enfant de Devil's Tower obtenues par stéréolithographie d'après les données de la tomographie (à gauche), et reconstitution par ordinateur du crâne (à droite).

3. Cartographie d'épaisseur des os de l'enfant de Devil's Tower (à gauche) et d'un enfant actuel de même âge (à droite). Les os du fossile néandertalien sont nettement plus épais.

à vérifier sur les ordinateurs actuels, aussi puissants soient-ils : le contact au niveau des dents. C'est pourquoi nous avons contrôlé l'ajustement de la dentition sur un modèle produit par stéréolithographie, tout comme le fait un dentiste sur un plâtre.

Nous avons visualisé les osselets de l'organe auditif. Ces derniers nous servirent de points de repère anatomiques précis et fiables pour placer correctement l'os temporal. Lors de l'étape suivante, nous avons ajusté l'os frontal avec l'os temporal gauche, et complété l'os temporal droit manquant. Puis nous avons placé la boîte crânienne ainsi reconstituée sur la base du crâne qui avait été reconstruite indépendamment. Les deux parties s'emboîterent au millimètre près, ce nous permit de conclure sans ambiguïté qu'elles provenaient d'un seul et même individu. Grâce à la technique stéréolithographique, nous avons matérialisé la reconstitution par ordinateur de notre crâne virtuel (voir la figure 2).

COMPARAISON MORPHOLOGIQUE

Nous avons utilisé cette méthode pour reconstituer deux autres crânes d'enfants de Néandertal qui avaient été découverts l'un en Belgique, l'autre en France. Dans ce cas, l'ordinateur nous fut d'un grand secours pour corriger les déformations des os par la roche environnante. Ce n'est qu'après cette étape que nous avons effectué les relevés anthropométriques permettant de comparer ces crânes à ceux d'enfants actuels.

On savait depuis longtemps que l'homme de Néandertal possédait des os plus épais que l'homme moderne. Mais comme l'épaisseur de l'os de la calotte crânienne est très variable, les mesures manuelles ne donnaient pas de résultats précis. Grâce à l'ordinateur, on a établi une cartographie de l'épaisseur de la couche osseuse permettant ainsi des comparaisons détaillées entre individus (voir la figure 3).

La morphologie crânienne de l'homme de Néandertal se différenciait nettement, dès l'âge de trois à cinq ans, de celle de l'homme moderne. Les reconstitutions montrent les détails morphologiques typiques de l'homme de Néandertal, tels que la mâchoire inférieure en saillie avec son menton arrondi, une partie frontale relativement courte et une forme générale de crâne plutôt oblongue. À notre avis, ces différences d'épaisseur des os et les autres détails anatomiques sont tellement marqués qu'ils imposeraient la classification de ces deux formes d'hominiens dans deux espèces différentes.

Christoph ZOLLIKOFER
et Marcia PONCE de LEON

Discrete séduction

Chez certains oiseaux tropicaux, les mâles parodent sous un éclairage qui donne à leurs couleurs un maximum de contraste.

Quelle facette de l'évolution Darwin n'a-t-il pas analysée? Citons-le : «D'autre part, j'admets volontiers qu'un grand nombre d'animaux mâles, tels que tous nos oiseaux les plus magnifiques, (...) ont acquis la beauté pour la beauté elle-même ; mais ce résultat a été obtenu par la sélection sexuelle, c'est-à-dire parce que les femelles ont continuellement choisi les plus beaux mâles». En liant le succès reproducteur des mâles à l'éclat de leurs couleurs lors de la parade amoureuse, Darwin expliquait l'évolution des plumages magnifiques de nombreuses espèces d'oiseaux tropicaux. Toutefois, si ces couleurs attirent les femelles sur les lieux de parade, ne risquent-elles pas d'attirer l'attention des prédateurs? Nous allons voir que, chez certains oiseaux, les couleurs et le comportement de parade ont évolué conjointement, conciliant séduction et camouflage.

La visibilité de l'oiseau pour ses congénères et ses prédateurs dépend de la composition de la lumière et de la façon dont son plumage réfléchit cette lumière (le «spectre de réflectance»). En se montrant dans des conditions de lumière spécifiques, le mâle tirerait le meilleur parti de son plumage lors de la parade et serait presque indétectable le reste du temps. Nous avons testé cette hypothèse chez trois espèces d'oiseaux qui vivent dans

la forêt tropicale en Guyane française : le coq-de-roche (orange, plumes jaunes, noires et blanches), le manakin à front blanc (poir tacheté de jaune, turquoise, blanc et orange) et le manakin à gorge blanche (poir à reflets bleu iridescent, taches blanches). Dans ces espèces, les mâles se regroupent sur des sites de parade pour séduire les femelles. Les mêmes sites sont utilisés pendant plusieurs générations. Les femelles, de coloration brune ou verdâtre, choisissent un mâle et l'accouplent sur des «arènes nuptiales» puis s'occupent seules de la construction du nid, de la couvaison et de l'élevage des jeunes.

Afin de comprendre comment ces oiseaux utilisent la lumière, nous avons noté les comportements de parade et leur fréquence dans différents environnements lumineux. Ces «qualités» de lumière sont déterminées par la couverture végétale, l'heure et l'état du ciel. Nous avons échantillonné la lumière à l'emplacement occupé par l'oiseau dans différentes conditions d'ensoleillement, puis nous avons comparé ces éclaircissements à ceux des abords du site de parade et de la forêt alentour. Enfin nous avons mesuré le spectre de réflectance de chaque élément coloré du plumage du mâle, ainsi que le spectre des éléments végétaux qui formaient l'arrière-plan.

La comparaison des spectres montre que les couleurs des mâles sont différentes de celles des fonds visuels, alors que celles des femelles et des jeunes sont proches de l'arrière-plan végétal. Alors que les femelles et les jeunes sont légèrement plus lumineux que l'arrière-plan, les mâles se sont beaucoup plus, à l'exception du mâle coq-de-roche. D'autre part, les taches de couleur des mâles sont soit très saturées, soit très lumineuses.

SE MONTRER PAR ÉCLIPSES

En outre, nos mesures révèlent que la visibilité des oiseaux varie beaucoup d'un environnement lumineux à l'autre. Par exemple, la parade des mâles coq-de-roche requiert un temps ensoleillé et la présence de petites taches de soleil sur leurs perchoirs. Cet éclairage n'existe qu'à certaines heures et résulte de l'architecture de la végétation au-dessus des arènes nuptiales. Les parades sont plus actives quand la tache de soleil n'illumine qu'une partie du corps orange du mâle : dans cette configuration, les flancs ornés de plumes jaunes sont éclairés alors que le reste du plumage demeure dans l'ombre. L'oiseau optimise ainsi les contrastes de luminosité et de couleur entre les éléments de son plumage ainsi que le contraste de chaque élément avec le fond.

Les mâles s'affrontent pour occuper cette position ; au cours de la journée, ils se déplacent le long de la branche pour rester au bord de la tache lumineuse ou coupent des feuilles pour que leur perchoir reste luminé. L'accouplement a lieu au sol, dans l'ombre de l'arène : dans ces conditions spectrales, le mâle comme la femelle sont moins visibles et moins vulnérables. On observe des relations similaires entre couleur, lumière et parade nuptiale chez les deux autres oiseaux étudiés : aux heures et lieux de parade, la visibilité des femelles est minimale et celle des mâles est maximale à la distance où se tiennent les femelles. Les conditions lumineuses optimales varient d'une espèce à l'autre. Chez le manakin à front blanc, la parade se déroule dans l'ombre du sous-bois quand le soleil est masqué par les nuages : sa robe turquoise se détache sur le reste du plumage.

En considérant les caractéristiques spectrales d'un milieu forestier, il est possible de prévoir les couleurs les plus utilisées dans cet environnement lumineux et vice versa. De telles analyses «éclaircissent» les relations entre couleurs corporelles, comportements de parade, rythmes d'activité et microhabitat lumineux.

Marc THÉRY, Muséum d'histoire naturelle, CNRS URA1183
John ENDLER, Université de Californie



Lors de la parade, le mâle coq-de-roche se tient à la frontière d'une tache de lumière : le contraste est maximal entre les plumes jaunes éclairées et le reste du corps orange, dans l'ombre.

Cerveau bilingue

Le cerveau travaille plus pour la seconde langue.

Richard, prince de Metternich, ambassadeur d'Autriche auprès de Napoléon III était, à n'en pas douter, parfaitement bilingue : il ne commit que trois fautes à la dictée proposée par Prosper Mérimée pour distraire la cour. Toutefois, son cerveau ne traitait sans doute pas de la même façon le français et sa langue maternelle, l'allemand. Une zone du cerveau est activée spécifiquement lorsque des sujets parfaitement bilingues parlent leur deuxième langue : un contrôle moteur supplémentaire serait nécessaire.

Comment le cerveau traite-t-il le langage ? Quels neurones interviennent-ils dans ce traitement ? Une équipe de neuropsychologues de l'Université Mc Gill, à Montréal, observe, par tomographie par émission de positons, l'évolution du flux sanguin en tout point du cerveau pendant l'expression orale. Plus le flux sanguin est élevé, plus les neurones de la zone considérée sont actifs. Des exercices de répétition et de traduction orale de mots ont été proposés à des personnes bilingues en anglais et en français, qui parlent quotidiennement les deux langues. L'anglais était leur langue maternelle et elles n'avaient appris le français qu'après l'âge de cinq ans. La comparaison du flux sanguin cérébral au cours de ces exercices révèle des différences selon la langue parlée. Un noyau cérébral de l'hémisphère gauche (tous les sujets étaient droitiers) est plus actif lors de la prononciation du français, la seconde langue.

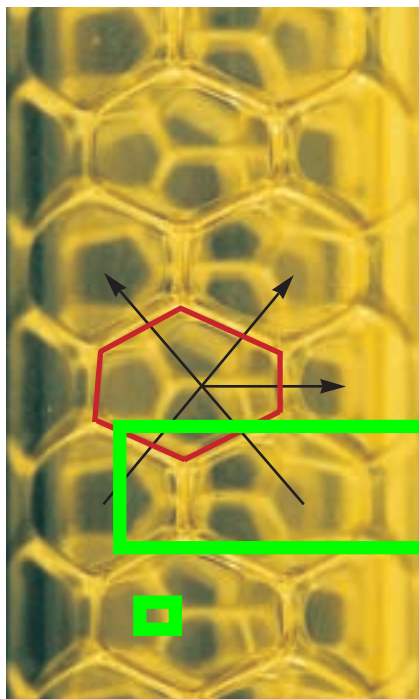
Cette différence proviendrait d'une mobilisation accrue des ressources du cerveau pour contrôler l'articulation : les mouvements nécessaires à la prononciation des deux langues sont légèrement différents. La zone plus active, le putamen, appartient au cortex pré-moteur, qui envoie des décharges vers les neurones activant les muscles. En outre, le putamen n'est pas seulement actif lorsque la personne doit seulement comprendre la seconde langue dans un exercice de traduction du français vers l'anglais. La bonne prononciation d'une seconde langue nécessite des instructions plus précises du cerveau, vers les muscles qui commandent la parole, que celle de la langue maternelle. □

Tiges de bulles

Des bulles dans un tube se répartissent comme les feuilles sur les tiges des plantes.

En 1992, Denis Weaire et ses collègues de *Trinity College*, à Dublin, fabriquent une solution savonneuse où ils insufflent de l'air de façon régulière. Ils obtiennent des bulles de diamètre uniforme. Ayant placé un entonnoir au-dessus de la buse soufflante, afin de récupérer les bulles dans un tube de verre vertical, ils observent alors que les bulles s'empilent en spirale. Les diverses structures spirales observées, selon les tailles relatives des bulles et du tube, rappellent des structures observées en botanique : capitules des fleurs de tournesol, feuilles sur les tiges...

À l'Université de Strasbourg, N. Pitet, P. Boltenhagen et N. Rivier ont répété les expériences en modifiant le quotient du diamètre des bulles par le diamètre du tube collecteur : quand ces deux diamètres sont égaux, les bulles s'empilent comme



Empilement de bulles dans un tube de verre d'un centimètre de diamètre. Le système représenté correspond au triplet 5, 5, 0. Les flèches représentent une partie des spirales qui passent par la bulle de contour rouge.

les segments des tiges de bambou ; quand le tube est plus large que les bulles, chacune d'entre elles appartient à trois spirales.

En physique des bulles comme en botanique, trois nombres k , l , m permettent de décrire les structures spirales. Sur la figure, par exemple, on passe d'une bulle à une des deux bulles adjacentes de la rangée supérieure en suivant une spirale de pas égal à cinq bulles ; on passe aux bulles de la même rangée en suivant un cercle horizontal, c'est-à-dire une spirale de pas égal à zéro bulle ; ainsi l'empilement représenté est noté 5, 5, 0. Pour tout empilement, le nombre k est égal à la somme de l et de m , ce qui correspond à une relation que l'on retrouve dans les plantes : les pétales du tournesol, par exemple, appartiennent à des spirales obéissant à cette relation, qui préside à la formation des nombres de Fibonacci, est encore observée.

Les physiciens ont d'abord répertorié tous les systèmes d'empilement possibles. Ils ont montré que le premier système pour lequel une bulle ne touche pas les parois est le système 5, 3, 2. Puis, afin d'étudier les transitions entre systèmes d'empilement, ils ont progressivement augmenté le débit de l'air insufflé dans l'eau (plus le débit est élevé, moins la pression est forte, et plus les bulles sont grosses). Les systèmes d'empilement qui se succèdent quand on diminue la taille des bulles ne sont pas identiques à ceux que l'on observe quand on grossit les bulles, après avoir atteint une certaine taille. Par des simulations, ils ont expliqué les transitions entre systèmes d'empilement, et ils savent prévoir le système d'empilement vers lequel évolue un système donné. Ils ont également étudié l'influence du drainage du liquide dans les parois des bulles : en ajoutant du liquide au sommet du tube, ils augmentent l'épaisseur des parois liquides entre les bulles et induisent des transitions entre systèmes d'empilement.

À quoi servent leurs bulles empilées ? L'analogie botanique fait naturellement penser qu'un même mécanisme fondamental est en œuvre dans les empilements de bulles et dans les plantes, mais l'hypothèse est osée. En revanche, le mécanisme physique qui préside à l'empilement des bulles se retrouve probablement dans les organites intracellulaires nommés microtubules, qui assurent le mouvement des organites dans les cellules : ces microtubules sont également composés de spirales qui changent de configuration selon les conditions chimiques du milieu intracellulaire. Ainsi trouverait-on la clef de mécanismes biologiques fondamentaux... en coïncant les bulles. □

Les anti-protéases

Elles inhibent la formation de particules virales actives.

Mélanger le VIH, le virus de l'immunodéficience humaine responsable du SIDA, est l'objectif de nombreuses équipes qui, de part et d'autre, recherchent un traitement contre ce virus. Les molécules qui inhibent une enzyme virale, la protéase, forment une nouvelle classe d'agents antiviraux. Une question reste ouverte : seront-ils efficaces pendant longtemps, ou le virus, d'une extrême variabilité, saura-t-il leur échapper ?

Pour qu'une molécule empêche le VIH de se multiplier, elle doit bloquer l'activité d'une molécule indispensable à sa réplication. C'est déjà le cas de l'AZT, par exemple, qui inhibe la transcriptase inverse ; cette enzyme traduit l'information génétique du virus, présente sous forme d'ARN, en ADN qui peut être incorporé dans le génome de l'hôte. Le virus peut alors produire les protéines indispensables à sa reproduction. La protéase est une autre enzyme cible. Normalement, elle assure la maturation finale des protéines virales : elle découpe de grandes protéines virales produites par la cellule infectée en protéines de structure et en enzymes qui représentent les constituants des nouvelles particules virales.

Quelques dizaines de patients ont été traités par une association de deux inhibiteurs de la transcriptase inverse et d'un inhibiteur de la protéase et les résultats ont montré que la réplication virale semble notablement diminuée : au bout de quelques semaines de traitement, le nombre de particules virales dans le sang des patients traités est parfois devenu inférieur au seuil de détection. L'association de ces trois antiviraux semble beaucoup plus efficace que celle des deux inhibiteurs de la transcriptase inverse que l'on utilise, aujourd'hui, en routine pour abaisser la charge virale.

Même si ces résultats doivent être confirmés, cette triple association représente un progrès notable dans le contrôle de la réplication virale. Toutefois, en raison de la persistance du virus et de sa variabilité, qui favorise l'apparition de mutants résistants, on ignore encore comment évoluera l'infection. □

La contrebande de matières nucléaires

PHIL WILLIAMS • PAUL WOESSLI

Plusieurs saisies de matières nucléaires transportées en contrebande font redouter le pire. Des États ou des organisations criminelles pourraient fabriquer des bombes atomiques... et s'en servir.

Jadis les contrebandiers qui franchissaient les frontières par des chemins détournés cherchaient principalement à échapper aux droits de douane. Dans les années 1970 et 1980, de la drogue a ainsi commencé à passer les frontières : des menaces sanitaires se sont ajoutées à l'illégalité des échanges. Depuis cinq ans, le trafic d'uranium et de plutonium menace la

actifs saisis par les polices occidentales ne provient, sans équivoque, de stocks ; une partie du plutonium que les trafiquants tentent d'écouler provient de déchets nucléaires.

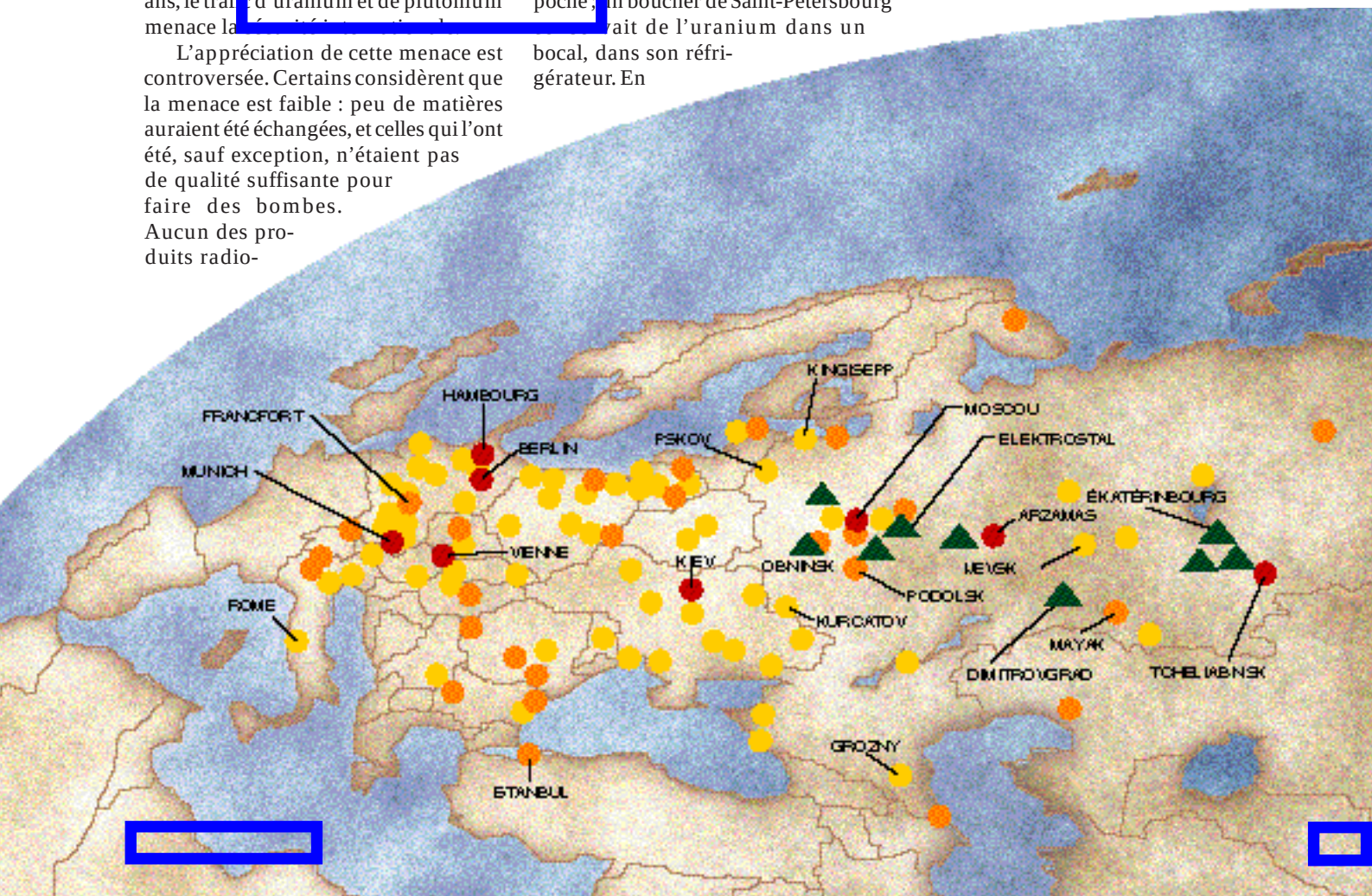
La plupart des trafiquants de matières nucléaires sont des amateurs, qui ne savent pas bien ce qu'ils trafiquent. Un Polonais est mort irradié après avoir transporté du césium dans sa poche ; un boucher de Saint-Petersbourg trait de l'uranium dans un

outre, des déchets nucléaires stables rendus temporairement radioactifs par exposition à un rayonnement, ou obtiennent de grosses avances en échangeant des échantillons minuscules.

La maladresse de la plupart des trafiquants indiquerait que, en Allemagne au moins, les seuls acheteurs sont des journalistes, des policiers ou des agents de renseignements. Certains experts

L'appréciation de cette menace est controversée. Certains considèrent que la menace est faible : peu de matières auraient été échangées, et celles qui l'ont été, sauf exception, n'étaient pas de qualité suffisante pour faire des bombes. Aucun des produits radio-

bocal, dans son réfrigérateur. En



vont même plus loin : ils prétendent que des États tels que l'Iran, l'Irak, la Libye ou la Corée du Nord ne seraient pas intéressés par l'acquisition d'arsenaux nucléaires, au moment où ils tentent de renouer des relations avec l'Occident.

La partie cachée du trafic

Doit-on vraiment être optimiste? La partie visible des marchés illicites, comme celle des icebergs, est toujours la plus petite. Pourquoi la contrebande des matières nucléaires ferait-elle exception? La police saisit au plus 40 pour cent des stupéfiants qui entrent aux États-Unis, par exemple, et en Europe occidentale. Le marché des matières nucléaires est plus petit que celui de la drogue, mais les douanes ont aussi moins d'expérience pour intercepter.

Il est plus facile d'intercepter que pour saisir de la marijuana ou du haschich : il serait imprudent de penser qu'elles interceptent plus de 80 pour cent de cette contrebande.

En outre, même un trafic de faible volume aurait des conséquences graves. Un kilogramme de plutonium a un volume d'environ 50,4 centimètres cubes, soit le septième de celui d'une

canette de bière. Malgré la confidentialité des travaux sur les bombes atomiques, on estime que 3 à 25 kilogrammes d'uranium enrichi ou 1 à 8 kilogrammes de plutonium (une canette de bière!) suffisent pour fabriquer une bombe.

Un contrôle rigoureux des transports internationaux permettrait la saisie d'une partie des matières nucléaires de contrebande, mais certains des isotopes les plus dangereux, tels l'uranium 235 et le plutonium 239, ne sont que peu détectés par les compteurs Geiger ou aux autres appareils de détection. Des appareils à neutrons, utilisés dans les aéroports pour détecter les explosifs chimiques, détecteraient des radio-nucléides illicites, mais leur efficacité pratique est limitée, car ils ne sont pas adaptés à cet effet.

Déjà petites en valeur au poids, les quantités de matériaux radioactifs nécessaires pour fabriquer des armes

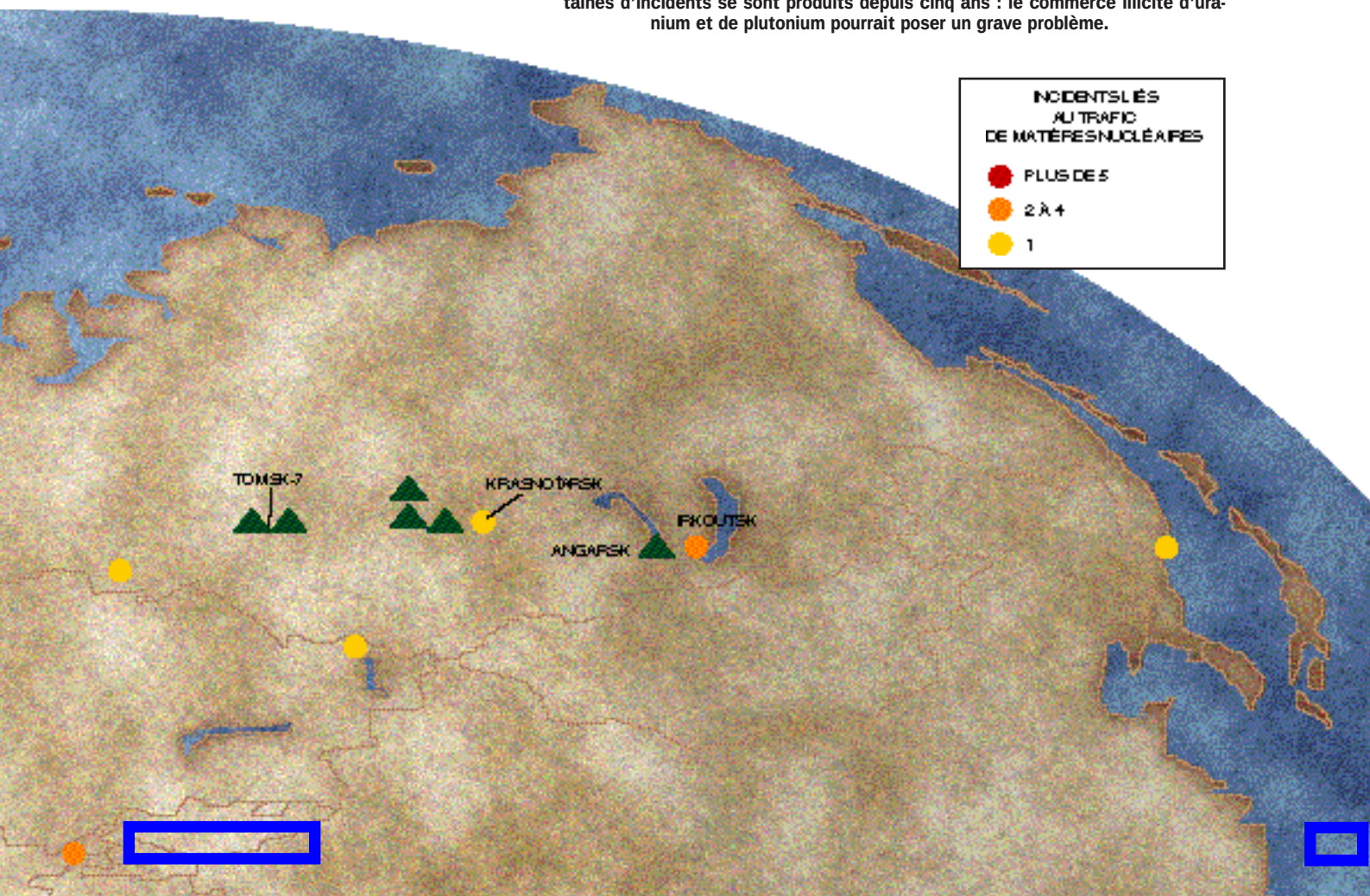
nucléaires sont infimes quand on les compare aux énormes réserves d'uranium et de plutonium enrichis, en particulier russes, dont l'inventaire et la surveillance posent problème. Les réserves mondiales de plutonium, qui s'élevaient à près de 1 100 tonnes en 1992, atteignent aujourd'hui 1 600 à 1 700 tonnes.

En l'an 2000, assez pour fabriquer 200 000 bombes de 10 kilotonnes. Avec la mise en application des accords de désarmement, 100 tonnes supplémentaires de plutonium de qualité militaire seraient disponibles aux États-Unis et en Russie. Paradoxalement les nations seraient plus avisées de stocker du plutonium qu'elles ne le font.

De surcroît, les États-Unis et les États de l'Union soviétique possèdent chacun environ 650 tonnes d'uranium enrichi. Ces énormes réserves sont inquiétantes, car leur surveillance est difficile. Les entrepôts russes, notamment, sont insuffisamment protégés et leur contenu est inconnu et margéré.

Les instruments de mesure de la pro-

1. LA CONTREBANDE NUCLÉAIRE s'étend de l'Europe centrale à la côte Pacifique de la Russie (les disques indiquent les lieux de saisie, d'origine ou de transfert, les triangles indiquent les stocks de matière nucléaire, les usines de retraitement et les laboratoires qui fabriquent des armes). Le renforcement de la sécurité de certains entrepôts est en cours, mais des conditions économiques et politiques instables sapent les efforts. Quelques centaines d'incidents se sont produits depuis cinq ans : le commerce illicite d'uranium et de plutonium pourrait poser un grave problème.



duction de plutonium sont obsolètes. En l'absence d'un état précis des stocks, comment avoir ce qui manque ?

Depuis la disparition du KGB, les installations nucléaires ne sont plus surveillées. Sous le régime soviétique, la surveillance sévère était souvent superflue car les employés du secteur nucléaire étaient bien payés et bénéficiaient d'un statut social élevé. Avec la dégradation des salaires et de la situation économique, le mécontentement s'est généralisé. La croissance de l'insatisfaction, le bas niveau des salaires et les retards de paiement ont accru les tentations de vol de matières nucléaires, au moment même où la surveillance s'est relâchée.

Les pommes de terre sont mieux surveillées que l'uranium

En novembre 1993, un voleur a pénétré, par une brèche d'une clôture, dans une aire (en principe) protégée du chantier naval de Sevморput, près de Mour-

compartiment de stockage de combustible pour sous-marins nucléaires et il s'est emparé de trois éléments de combustible contenant chacun 50 kilogrammes d'uranium enrichi. L'alarme a immédiatement été déclenchée, mais le fonctionnaire qui a mené l'enquête a écrit dans son rapport : « Aujourd'hui, même les pommes de terre sont pro-

bablement mieux gardées que les matières radioactives. » Il n'y avait aucun système d'alarme, pas d'éclairage et très peu de gardes ; et malgré le vol, la surveillance de la base n'a pas été beaucoup renforcée.

La situation n'est pas désespérée, car les anciennes villes secrètes où les matières nucléaires étaient mises au point et fabriquées semblent bien protégées, et les matières de qualité militaire seraient mieux surveillées que celles de moindre qualité. Bien que les tentatives d'effraction de ces sites ont augmenté, les 6 années ayant doublé l'an dernier, son système de sécurité serait resté efficace. Moscou s'efforce activement de rétablir la sécurité dans toute son industrie nucléaire, mais, malgré l'aide des États-Unis, la tâche est gigantesque : un millier d'entrepôts d'uranium et de plutonium enrichis sont disséminés à travers l'ex-Union soviétique.

Dans ce contexte, l'augmentation du nombre de cas de contrebande nucléaire, ces dernières années, n'est pas étonnant. Les autorités allemandes en ont signalé 41 en 1991, 158 en 1992, 241 en 1993 et 267 en 1994. Bien que la plupart des matières saisies ne conviennent pas à la fabrication de bombes, l'accroissement du nombre de cas augmente la probabilité d'un trafic de matières de qualité militaire.

En mars 1993, les autorités turques ont signalé que six kilogrammes d'uranium enrichi étaient entrés en Turquie par le poste frontière d'Aralik, dans la province de Kars. Le produit aurait été acheminé de Tachkent à Grozny, serait passé entre les mains de groupes criminels tchétchènes, puis au Nakhitchevan, via la Géorgie, pour parvenir à Istanbul. Bien que le degré d'enrichissement de l'uranium n'ait été confirmé, cette affaire a fait augmenter les craintes que des groupes mafieux tchétchènes n'aient accédé à l'uranium enrichi du Kazakhstan. La signature d'un accord en 1994, aux termes duquel le Kazakhstan transfère son uranium enrichi aux États-Unis, renforce ces craintes.

En octobre 1993, la police d'Istanbul a saisi 2,5 kilogrammes d'uranium 238 et a arrêté quatre hommes d'affaires turcs, ainsi que quatre agents présumés des services secrets iraniens. Selon un magazine allemand, l'uranium enrichi serait entré en Turquie via l'Allemagne. L'un des prévenus turcs, un professeur impliqué aupa-

Bestiaire nucléaire			
	Usage légal	Usage illégal	
Américium 241 	Source de particules alpha pour détecteurs de fumée et autres dispositifs	Escroquerie (substance recherchée)	
Béryllium 	Réflecteur de neutrons pour réacteurs ou bombes	Réacteurs illégaux ; armes nucléaires	
Césium 137   	Source de rayonnement pour applications médicales ou industrielles ; présent dans les déchets radioactifs des réacteurs	Escroquerie ; meurtre par irradiation	
Cobalt 60  	Source de rayons gamma pour applications médicales ou industrielles	Escroquerie ; meurtre par irradiation	
Lithium 6 	Bombes thermonucléaires	Bombes thermonucléaires	
Plutonium   	Source de particules alpha pour détecteur de fumée ; armes nucléaires ; combustible pour réacteurs nucléaires	Escroquerie ; armes nucléaires	
Polonium 210  	Source de particules alpha et de neutrons pour applications industrielles	Armes nucléaires	
Uranium   	Combustible pour réacteurs nucléaires ; armes nucléaires	Escroquerie ; armes nucléaires	
Zirconium 	Matériau pour la structure de réacteurs nucléaires	Réacteurs illégaux	

ravant de la rafle d'Andriyko, a révélé que ses complices avaient transporté l'uranium en avion de tourisme à partir d'un aéroport privé près de Hambourg, propriété de marchands d'armes italiens.

Des matières de grande pureté

Des matières de qualité militaire ou quasi militaire ont été saisies à plusieurs reprises. En 1984, la police de Tengen, en Allemagne, a trouvé six grammes de plutonium 239 en fouillant la demeure d'un homme d'affaires Adolf Jaekle, à la recherche d'autres produits de contrebande. Le plutonium a été découvert par hasard, dans le garage d'un fabricant de nombreuses relations, notamment avec d'anciens officiers du KGB et de la police

Est allemande, et avec la Société Kintex, une fabrique d'armes bulgare suspectée depuis longtemps de nombreuses activités illégales. Peut-on éviter de croire que cette petite quantité de plutonium n'était qu'un échantillon, en vue d'une plus grosse livraison ultérieure ?

Le 10 août 1994, la police muniçoise a arrêté, à grand bruit, un Colombien et deux Espagnols en possession de 363,4 grammes de plutonium 239 et 364 grammes de lithium 6 (un composant des bombes à hydrogène). Ils avaient transporté ces produits de Moscou à Munich à bord d'un avion de la Lufthansa. Les trois hommes n'avaient aucun lien avec les trafiquants du secteur nucléaire. Ils ont une expérience de la contrebande : ils avaient

seulement tenté de résoudre leurs problèmes financiers en trafiquant du lithium et du plutonium.

De surcroît, des agents des services de renseignement allemands avaient incité ces hommes à frauder. Cette manœuvre a suscité une grande controverse en Allemagne : les services secrets surveillaient-ils la contrebande nucléaire ou la créaient-ils ? Un point important n'a toutefois pas été éclairci : comment les trafiquants amateurs se procurent-ils des matières de bonne qualité ?

Puis, le 14 décembre 1994, la police de Prague a arrêté trois hommes en possession de 2,7 kilogrammes d'uranium 235 enrichi à 87,7 pour cent. Deux d'entre eux étaient des citoyens tchèque, un Russe et un Biélorusse. Le troisième homme était un

La France et la sécurité des matières nucléaires

En France, une réglementation assure la protection et le contrôle des matières nucléaires : l'uranium, le plutonium, le thorium, le deutérium, le tritium. Elle obéit à trois principes : la responsabilité de la protection et du contrôle revient aux exploitants ; cette responsabilité s'exerce sous le contrôle des pouvoirs publics, qui s'appuient sur l'expertise de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) ; des sanctions sont prévues si les exploitants ne mettent pas en œuvre les moyens nécessaires à l'application de la loi, et pour toute infraction à la réglementation.

Trois types de contrôles sont prévus. D'abord ils tiennent une comptabilité précise des entrées et des sorties de matière, afin de connaître en permanence l'état de leurs stocks. Chaque mouvement entre installations ou ensembles techniques est en outre signalé dans les 24 heures à l'IPSN qui tient une comptabilité centrale. Un inventaire physique annuel permet de vérifier la concordance entre le stock réel et le stock comptable. Ces inventaires sont contrôlés et les exploitants sont inspectés par le ministère de l'Industrie.

Ensuite l'exploitant surveille en permanence la localisation des matières. Des dispositifs de sécurité empêchent les sorties accidentelles ou frauduleuses. Enfin des mesures de protection sont prises pour empêcher les vols, par la détection rapide des intrus et le ralentissement de leur progression jusqu'à l'arrivée d'une force d'intervention. Ce système a prouvé son efficacité : les principaux incidents notés sont la découverte, au cours d'inventaires, d'éléments de combustible égarés avant l'entrée en vigueur de la réglementation actuelle, en 1980.

Le trafic de matières nucléaires n'est pas comparable au trafic de drogue. La drogue pousse dans des champs,

difficile à repérer ; un petit laboratoire suffit pour sa production et elle n'émet pas de rayonnement. La production et l'enrichissement des matières nucléaires nécessitent des installations lourdes. Une usine de retraitement ne passe pas inaperçue ! Il y a aucune raison de penser qu'en plus des matières saisies, un trafic important existe.

On ne peut toutefois pas affirmer que l'on détecterait toute matière nucléaire ou radioactive qu'un trafiquant essaierait d'entrer en fraude sur le territoire français. Les Douanes françaises mènent actuellement une enquête en collaboration avec l'IPSN pour tester des détecteurs. Toutefois l'instrument principal de lutte contre le trafic reste le renseignement. Les services de police s'en préoccupent, en lien avec leurs collègues étrangers.

Le meilleur moyen d'empêcher le trafic de matières nucléaires est d'empêcher les fuites à la source. Aussi la France apporte-t-elle son aide à la Russie dans ce but. Contrairement aux États-Unis, qui fournissent surtout du matériel, la France oriente son action vers la formation des personnels et la mise en place d'une culture de sécurité : nous avons organisé plusieurs séminaires de formation. La structure et les procédures de sécurité de la Russie sont transposables en France. Comme la Russie est un pays centralisé ; toutes les étapes de traitement du combustible civil y sont présentes, de la mine au retraitement des déchets ; la structure du parc de réacteurs est analogue à celle du parc français. Par ailleurs, le Commissariat à l'énergie atomique apporte son aide à la Russie pour le démantèlement des armes nucléaires et le transport des matières nucléaires qui en sont issues, dans le cadre d'un accord intergouvernemental.

Denis FLORY, IPSN

physicien nucléaire tchèque, qui ne travaillait plus officiellement à l'énergie nucléaire depuis plusieurs années. En 1994, un échantillon d'uranium d'enrichissement semblable avait été saisi en Bavière et, le 22 mars 1995, deux hommes, dont un officier de police, ont été arrêtés dans le cadre de l'enquête sur la saisie de décembre.

Depuis ces arrestations publiques, le nombre de saisies a diminué, du moins en Allemagne. Les trafiquants semblent passer plutôt en Italie, via la Suisse et l'Autriche. D'autres, sans doute plus nombreux, prennent les routes du Sud, via les républiques d'Asie centrale et la mer Noire.

Ainsi les contrebandiers semblent-ils reprendre, en sens inverse, les mêmes itinéraires que ceux qui ont permis d'introduire des produits occidentaux en Union soviétique.

Dans ces régions, les contrôles douaniers sont beaucoup moins rigoureux qu'en Europe occidentale, et les clients potentiels sont plus proches.

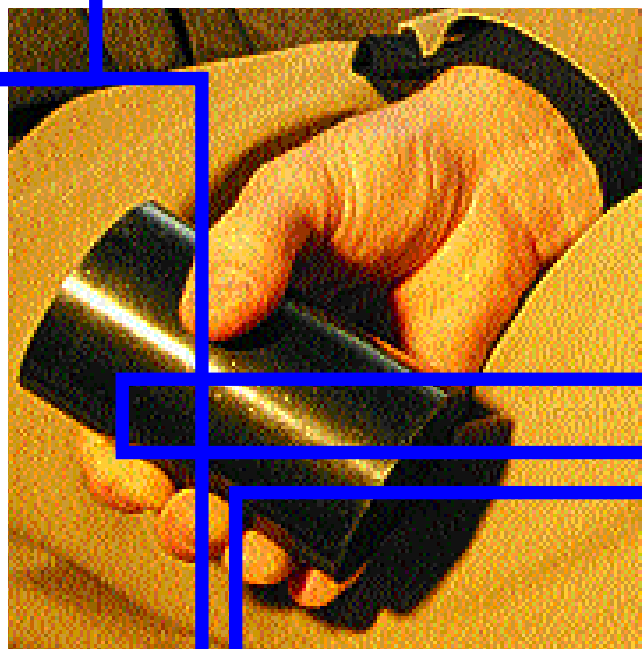
Un trafic bien organisé

Certaines régions, comme l'Allemagne et la Turquie montrent que des États tels que l'Iran tentent d'acquérir des matériaux nucléaires de haute qualité par leurs propres réseaux. La Libye et l'Irak possèdent déjà de tels réseaux pour importer, via des sociétés écrans, des produits et des matériels destinés à la mise au point d'armes chimiques.

En outre, comme le démontre l'affaire Jaekle, les trafiquants ne sont pas tous des professionnels. Parfois, qu'une mafia nucléaire organisée n'existe pas, d'anciens espions de l'Union soviétique auraient un rôle prédominant dans les réseaux professionnels.

Les trafiquants rejoints par des hommes d'affaires se livrant au commerce des armes, dont les activités s'étendent continuellement du légal à l'illégal.

Les profits potentiels de ce trafic attirent aussi des groupes criminels organisés. Des bandes turques, qui ont fait leurs armes dans l'exportation clandestine d'antiquités, auraient



2. CE LINGOT D'URANIUM APPAUVRI, qui tient dans la main, pèse environ sept kilogrammes. La même quantité d'uranium enrichi suffirait pour fabriquer une bombe capable de détruire une petite ville.

leurs activités au commerce de l'uranium, qui est pour eux une marchandise comme une autre. En Italie, le magistrat Romano Dolce, qui enquête sur le trafic nucléaire, a été arrêté pour sa participation aux délits qu'il poursuivait. Aurait-il orienté l'enquête vers des aspects mineurs du trafic, afin de la détourner d'autres transactions ?

La préoccupation des organisations criminelles russes : la contrebande nucléaire n'est pas leur priorité, parce qu'elles ont d'autres activités à la fois plus lucratives à court terme et moins risquées, mais des indices de plus en plus solides montrent que certaines s'orientent vers le commerce de matériels radioactifs.

Bien que l'on attaque sérieusement le problème à la source, la réaction de la communauté internationale est lente. L'Agence russe pour la sûreté nucléaire emploie 200 personnes, mais son autorité sur l'ancienne bureaucratie nucléaire, civile et militaire, est incertaine. Le surcroît, même si cette auto-

surveillance prendra des années, pendant lesquelles les trafiquants ne resteront pas les bras croisés. La recherche de renseignements et la rigoureuse application des lois seraient des priorités pour les cinq prochaines années. Malheureusement, les agences internationales dotées d'une compétence nucléaire ne collaborent pas efficace-

ment avec celles chargées d'enrayer le commerce illégal. Le Département de prévention du crime, la justice pénale de l'ONU et l'Agence internationale de l'énergie atomique sont situés tous deux à Vienne, mais le mandat de cette dernière ne lui permet pas d'enquêter. Les contacts entre les deux agences restent donc épisodiques.

À Washington, les premières mesures contre la contrebande nucléaire ont été prises.

Données. Depuis 1994, le FBI a repris la direction de la lutte et travaille étroitement avec l'Agence nucléaire militaire et avec l'Agence de renseignements de la Défense, mais les États-Unis n'ont pas encore de politique globale en la matière.

Nous invitons les Nations à prendre très rapidement des mesures internationales pour empêcher les vols, démanteler le trafic et décourager les acheteurs. Les États-Unis, la France, l'Allemagne, la Russie et d'autres États préoccupés par le problème nucléaire doivent...

«galerie volante», investie d'un pouvoir d'initiative, capable de mener des actions contre-terroristes et de contre-extorsion, et constituer une équipe de gestion des catastrophes. Cette proposition est proportionnée à la menace : n'attendons pas une catastrophe nucléaire pour prendre des mesures draconniennes.

Phil WILLIAMS dirige le Centre Ridgway d'études sur la sécurité internationale de l'Université de Pittsburgh. Paul WOESSNER est chercheur dans ce centre.

Oleg UKHARIN et William POTTER, «Potatoes Were Guarded Better», in *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 51, n° 3, pp. 46-50, mai-juin 1995.

Paul N. WOESSNER, *Chronology of Nuclear Smuggling Incidents, July 1994-June 1995*, in *Transnational Organized Crime*, vol. 1, n° 2, pp. 288-329, été 1995.

Phil WILLIAMS et Paul N. WOESSNER, *Nuclear Material Trafficking: An Interim Assessment*, in *Transnational Organized Crime*, vol. 1, n° 2, pp. 206-238, été 1995.

Le coût du désarmement

MARCO CATTANEO

La destruction des armes fabriquées au cours de la guerre froide coûtera beaucoup plus cher que leur fabrication.

L'économie mondiale est une économie de guerre. La preuve? La Bourse de New York a flambé en 1990, lorsque George Bush a annoncé que les États-Unis entraient en guerre contre l'Irak.

Quelques chiffres confirment cette triste réalité. La guerre du Golfe aurait coûté plus de 4 000 milliards de francs aux pays arabes. En 1993, les conflits qui ont fait au moins 1 000 victimes ont été au nombre de 24. 61 millions de réfugiés, 188 millions de mines antipersonnel disséminées à travers le monde tuent ou blessent au moins 800 personnes (un million au total, lors des 20 dernières années, dont 80 pour cent de civils). Dans des pays à hauts risques, tels l'Angola, l'Irak, le Koweït, le Cambodge et l'Afghanistan, le sol contient une mine pour trois à cinq habitants.

La paix coûte d'autant plus cher que les dépenses militaires ont été importantes. La destruction de toutes les mines antipersonnel éparpillées sur la planète coûterait entre 1 000 et 2 000 milliards de francs.

On peut acheter 15 francs en Chine coûte 10 000 francs. Le traité START II stipule que les États-Unis et la Russie devront démanteler, avant 2003, près de 20 000 têtes nucléaires stratégiques, mais le coût serait de 10 000 à 120 000 francs par tête, soit un coût total de 1 à 2,5 milliards de francs, sans tenir compte de l'élimination des matériaux fissiles.

Selon Michael Renner, de l'Institut Worldwatch, les gouvernements du monde entier consacrent aux dépenses militaires 150 à 250 milliards de francs.

Chaque franc investi dans la paix, les opérations de déminution et la prévention des conflits. Les pays occidentaux qualifient souvent d'exorbitantes les dépenses de l'Organisation des Nations unies pour des opérations de pacification, mais beaucoup d'entre eux exportent des armes et tirent des bénéfices du soutien militaire aux pays en

développement. Lorsque le gouvernement de Bill Clinton, en juin 1994, a proposé au Congrès américain d'allouer 1,5 milliard de francs (soit 0,1 pour cent du budget de la Défense) à des opérations de paix, le projet a été rejeté.

L'ONU fait la quête

L'insuffisance du budget de l'ONU pénalise souvent ses opérations de paix. Dans la plupart des cas, les financements proviennent d'initiatives temporaires et exceptionnelles : alors que les dépenses annuelles du Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés ont été multipliées par 100 depuis 1960, passant cinq milliards de francs en 1993, alors que les fonds américains d'assistance aux réfugiés ont pratiquement doublé et que l'aide humanitaire versée par l'Union Européenne a plus que triplé, au cours des neuf premiers mois de 1993, l'ONU a dû lancer 17 appels de fonds pour rassembler 20 milliards de francs destinés à assister plus de 20

millions de réfugiés d'une vingtaine de pays.

L'absence de décisions internationales aggrave cette désorganisation financière et entraîne souvent un retard aussi coupable que retentissant dans les interventions de l'ONU. Ce fut le cas au Rwanda : au début du mois d'avril 1994, lorsque la guerre civile a éclaté dans ce pays, le Conseil de sécurité de l'ONU a décidé de réduire les forces de paix présentes dans le pays. À la fin du mois d'avril, le secrétaire général, Boutros Boutros Ghali, a proposé de renforcer le contingent en le portant à 5 500 hommes, pour un coût prévu de 500 millions de francs.

L'opposition des États-Unis a retardé cette intervention, de sorte qu'au mois de juillet, alors que le conflit avait déjà fait plus de 500 000 victimes et provoqué le regroupement d'un grand nombre de réfugiés dans des camps, au Zaïre, le coût de l'opération était estimé à plus de 2,5 milliards de francs. À la fin de ce même mois de juillet, B. Clinton



1. L'HEURE EST À LA DÉTENTE entre les grandes puissances nucléaires : elles réduisent leurs stocks d'armes. Toutefois, la destruction des armes, ici des missiles russes SS-23, coûte plus cher que leur fabrication.

a annoncé que les États-Unis paieraient la quasi-totalité de cette somme.

Lorsque les conflits sont arrêtés, les pays rencontrent le difficile et coûteux problème de la démobilisation des troupes. Selon Francisco José Aguilar Urbina, de la fondation costaricienne Arias, dans de nombreux états, «des décennies de guerre ont produit une ou deux générations d'illettrés des personnes qui savent se servir d'un fusil automatique ou placer des mines, mais qui sont incapables de travailler la terre ou de lire les instructions pour utiliser un puits qui fournissait de l'eau à toute une communauté». L'expérience acquise en Angola, au Mozambique, au Nicaragua ou au Zimbabwe, si elle ne fournit pas une méthode à suivre partout, est utile pour l'évaluation des coûts de démobilisation d'un grand nombre de soldats. La réintégration des militaires dans la société civile est souvent difficile, et les programmes de réinsertion sont coûteux : pour l'ensemble des quatre pays cités précédemment, la démobilisation de 270 000 soldats a coûté 2,5 milliards de francs. Malgré ces efforts, la violence a continué en Angola, les forces de l'ONU doivent assurer la paix au Mozambique et le programme de réinsertion des combattants a échoué au Nicaragua. Les États-Unis eux-mêmes, où les moyens et les programmes étaient certainement plus importants, ont eu de grandes difficultés pour la réinsertion des anciens combattants du Viêt Nam.

Coûteux traités

Même les mesures qui visent à réduire les risques de guerre coûtent cher. La crise économique mondiale et la dissolution rapide de l'Union soviétique ont abouti à des accords pour le démantèlement d'une partie des arsenaux. Accepterons-nous d'en payer le prix ?

La Convention d'interdiction des armes chimiques, qui entrera en vigueur six mois après sa ratification par 60 pays, prévoit la destruction

et les usines de fabrication existantes seront détruits. Une Organisation pour l'interdiction des armes chimiques a été créée : elle vérifiera la destruction de tous les arsenaux chimiques. Toutefois, les pays occidentaux souhaitent en réduire le personnel de 1 000 à 365 personnes et limiter son budget à 375 millions de



2. EN SIGNANT LA CONVENTION d'interdiction des armes chimiques, les États s'engagent à détruire celles qu'ils possèdent.

francs, au lieu de 750 à 900 millions de francs.

L'élimination des armes chimiques coûtera dix fois plus que leur fabrication. En 1993, Boris Eltsine a déclaré que le programme de destruction de l'arsenal chimique russe coûterait plus cher que tous les autres plans de désarmement réunis.

C'est aussi pour cette raison que l'arsenal de l'ex-URSS est resté intact. Ce programme, qui coûtera 10 et 15 milliards de francs,

devrait commencer en 1997, avec une contribution étrangère de 30 à 40 pour cent. L'interdiction des armes chimiques américaines coûtera presque 50 milliards de francs, auxquels il faudra en ajouter 90 pour se débarrasser des produits chimiques. Heureusement les États-Unis ont mis à disposition de l'organisme chargé de la destruction de l'arsenal chimique ont passé de un milliard de francs au début des années 1980 à 2,5 milliards de francs en 1994.

Le traité sur les Forces conventionnelles en Europe a entraîné la réduction de grands systèmes d'armement, tels les chars d'assaut et les avions de combat. En Europe de l'Ouest, l'Allemagne a dû réaliser les réductions les plus rapides, surtout en raison du lourd équipement militaire hérité de la République fédérale d'Allemagne.

Le gouvernement allemand a déjà dépensé plus de cinq milliards de francs entre 1991 et 1994 pour se soumettre à ses obligations. Les autres pays touchés par le démantèlement de l'armement conventionnel sont en Europe de l'Est, tels la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie. Toutefois, une bonne partie des armes n'ont pas été détruites, mais revendues.

La Russie et les États-Unis semblent envisager la réduction de leur potentiel nucléaire, mais une telle décision ne semble pas partagée par la Chine, le Royaume-Uni, Israël (qui n'a pas signé le Traité de non-prolifération nucléaire) et la France, qui a même procédé à plusieurs essais nucléaires en 1995 et 1996. Un traité est en cours de négociation pour l'interdiction totale des essais nucléaires : empêchera-t-il le développement de nouvelles armes ?

La résolution des conflits et la réduction des armements sont menées sans cohérence. On peut évaluer le montant des dépenses militaires d'un pays à partir des budgets du Ministère de la Défense, mais il est difficile d'estimer le montant des dépenses de désarmement. Aucune organisation internationale ne se consacre entièrement à la construction de la paix. L'Agence internationale de l'énergie atomique aurait pu se charger de faire respecter les traités START, mais son budget a été fortement réduit et elle n'a pas identifié à temps les problèmes nucléaires irakiens.

Combien coûterait une agence internationale de contrôle des traités de désarmement ? Tout dépendrait de ses fonctions et de ses objectifs. De 15 milliards de francs en 1989 (la fin de la course aux armements), les dépenses globales pour la paix et la démilitarisation ont passé à 80 milliards de francs en 1994, ce qui ne représente toujours que 1,5 pour cent des dépenses militaires. La mise en place d'une agence internationale pour le maintien ou, plutôt, pour l'obtention de la paix coûterait certainement d'un ordre de grandeur inférieur.

La mise en place d'un fonds international qui se chargerait de l'assistance pour la reconstruction des pays meurtris par les guerres, des efforts de démantèlement et de reconversion des structures militaires, et de la construction d'un système de paix mondial.

Marco CATTANEO est journaliste à la revue *Le Scienze*.

Michael R. LINDER, *Budgeting for disarmament*, worldwatch paper, november 1994

Antonella PANNOCCHIA, *Le armi chimiche*, Cooperativa Centro di Documentazione Pistoia, 1985.

The military balance 1993-1994, The International Institute for Strategic Studies, London, 1994.

Notizie NATO, n° 2, avril 1994.

Il libro dei fatti 1995, ADN-KRONOS, 1995.

Régime et vieillissement

RICHARD WEINDRUCH

Un régime alimentaire allégé, mais apportant suffisamment de protéines, de lipides, de vitamines et de sels minéraux améliore la santé et la longévité des rongeurs. En serait-il de même pour l'homme?

Il y a 60 ans, Clive McCay et ses collègues de l'Université Cornell découvrirent que des rats soumis à un régime hypocalorique vivaient quatre ans au lieu de trois, atteignaient le stade adulte plus tardivement et souffraient moins souvent de maladies liées au vieillissement que les autres rats captifs mangeant sans restriction. Depuis cette étude, le régime hypocalorique est le seul moyen que l'on connaisse pour ralentir efficacement le vieillissement des rongeurs (qui, comme nous-mêmes, sont des mammifères), des insectes, des araignées, des protozoaires unicellulaires aux vers, aux mouches et aux poissons.

Vieillissons-nous moins vite si nous mangions moins? La question reste ouverte, mais l'étude d'animaux variés fait penser que la réponse est affirmative. Diverses observations faites chez le singe et chez l'homme étayaient cette hypothèse.

Pourtant, même si la restriction calorique était une fontaine de jouvence, il n'est pas certain que nous boirions de son eau : qui voudrait vivre, longtemps de surcroît, en ayant faim? Pour que le résultat soit utilisable, il faudrait que des médicaments ou des techniques thérapeutiques imitent ou reproduisent les effets d'un apport calorique limité. Afin d'établir les bénéfices faits d'un régime hypocalorique en conservant une alimentation quasi normale, plusieurs équipes tentent de comprendre par quels mécanismes cellulaires et moléculaires les régimes hypocaloriques retardent le vieillissement chez les animaux.

1. LA DURÉE DE VIE de divers animaux est prolongée, souvent notablement, par un régime hypocalorique qui ne carence pas en éléments nutritifs essentiels. On n'a pas encore démontré qu'une restriction calorique augmente aussi la longévité de l'homme.



HOMME

Régime normal

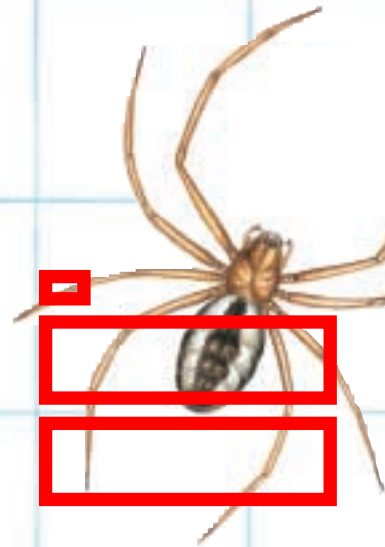
Longévité moyenne : **75 ans**

Longévité maximale : **110 ans**
(avec quelques rares valeurs supérieures)

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : ???

Longévité maximale : ???



RAT

Régime normal

Longévité moyenne : **23 mois**

Longévité maximale : **33 mois**

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : **33 mois**

Longévité maximale : **47 mois**



Maigres, mais vieux et en bonne santé

À condition que les besoins en éléments nutritifs soient couverts, un apport calorique limité a plusieurs effets bénéfiques. Dans la plupart des études, les animaux (sont des souris ou des rats qui reçoivent 50 à 70 pour cent des calories données aux animaux témoins et ont un poids inférieur de 30 à 50 pour cent ; la quantité de protéines, de lipides, de vitamines et de sels minéraux est suffisante pour assurer un bon fonctionnement de leurs tissus. Autrement dit, ces animaux sont soumis à un régime strict, mais mangent assez pour éviter la malnutrition.

Quand les besoins en éléments nutritifs sont assurés, le régime hypocalorique augmente notablement la durée de vie moyenne et augmente aussi la longévité maximale, c'est-à-dire la durée de vie des individus qui vivent le plus longtemps. Ainsi les régimes hypocaloriques inhibent le processus du vieillissement.

Des mesures qui éviteraient les décès prématurés, causés par exemple par les accidents ou par les maladies, augmenteraient l'espérance de vie moyenne, mais quand les individus les plus résistants dépassent la longévité maximale, c'est que le vieillissement a effectivement été ralenti.

De plus, on a observé que les régimes hypocaloriques retardent également chez les rongeurs, la plupart des maladies de la vieillesse, notamment les cancers du sein, de la prostate et du tube digestif. En outre, sur les quelque 300 paramètres du vieillissement étudiés, près de 90 pour cent correspondent à des valeurs plus élevées au régime hypocalorique, à des valeurs

enregistrées normalement chez les rongeurs jeunes. Par exemple, certaines réactions immunitaires diminuent chez les souris normales à partir de l'âge de un an (la durée de vie moyenne est de deux ans) ; chez des souris génétiquement identiques, mais plus minces, elles ne diminuent que vers l'âge de

ARAIGNÉE

Régime normal

Longévité moyenne : 50 jours

Longévité maximale : 100 jours

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : 90 jours

Longévité maximale : 139 jours



GUPPY

Régime normal

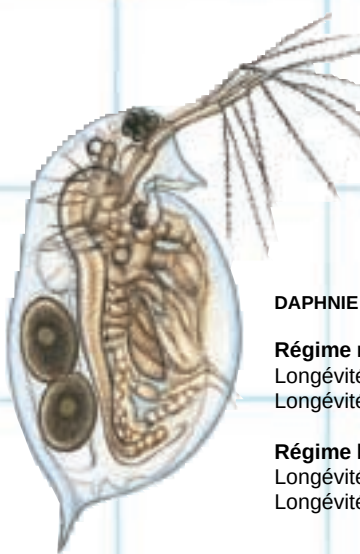
Longévité moyenne : 33 mois

Longévité maximale : 54 mois

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : 46 mois

Longévité maximale : 59 mois



DAPHNIE

Régime normal

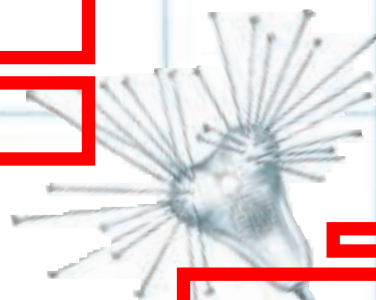
Longévité moyenne : 30 jours

Longévité maximale : 42 jours

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : 51 jours

Longévité maximale : 60 jours



PROTOZOAIRE

Régime normal

Longévité moyenne : 7 jours

Longévité maximale : 13 jours

Régime hypocalorique

Longévité moyenne : 13 jours

Longévité maximale : 25 jours



deux ans. De même, les rongeurs vieillissants ont une régulation amoindrie du métabolisme du glucose, et ils finissent par perdre du poids. On a également observé que la restriction calorifique ralentit la synthèse des protéines indispensables, la réticulation progressive des protéines stables au cours du vieillissement, la masse musculaire diminue et les fonctions d'apprentissage diminuent. Chez les animaux soumis à un régime hypocalorique, toutes ces modifications sont retardées.

La réduction de l'apport calorifique, c'est-à-dire la restriction calorifique, est elle-même responsable des avantages liés aux régimes hypocaloriques? Ou bien

n'en est-ce qu'une cause indirecte, s'accompagnant d'une limitation des apports en lipides ou en d'autres substances? La première hypothèse est la bonne: les régimes appauvris en lipides ou en protéines ou en sucres, mais riches en calories, n'augmentent pas la durée de vie. Les régimes hypocaloriques sont bénéfiques, même quand ils ne comprennent qu'un milieu de vie. Nous avons été heureusement surpris de découvrir qu'un régime hypocalorique instauré au milieu de la vie prolonge la longévité maximale de 20 à 30 pour cent et prévient l'apparition du cancer. En outre, même si l'efficacité principale

est obtenue par une réduction de moitié de l'apport calorifique (par rapport à des animaux qui se nourriraient à volonté), une restriction moins drastique, quel que soit l'âge où elle commence, est également bénéfique.

De tels régimes retarderaient-ils également le vieillissement chez l'homme? On étudie cette question en reprenant les études chez le singe (plus proche de l'être humain) voire chez l'homme lui-même. Les résultats ne seront convainquants que si les personnes testées sont suivies pendant de nombreuses années, ce qui nécessite une bonne organisation. Aujourd'hui, deux équipes étudient le singe.

Les bienfaits de la restriction calorifique

Depuis 1900, les progrès de la médecine ont considérablement augmenté la durée de vie moyenne de personnes vivant dans les pays industrialisés (courbes a), parce qu'ils ont prévenu et traité les maladies responsables de décès prématurés. Toutefois la longévité maximale (à l'extrême droite, en a) a peu varié; elle semble dépendre des mécanismes intrinsèques du vieillissement (les courbes et les données présentées sont des extrapolations: on a indiqué l'année de naissance et l'on a supposé que les conditions qui déterminent la durée de la vie ne changent pas). Les régimes hypocaloriques augmentent la longévité moyenne et la longévité maximale (b); on ne connaît pas d'autre méthode pour ralentir le vieillissement des mammifères. Peut-être utilisera-t-on un jour de tels régimes chez l'homme.

Bien qu'un régime sévère prolonge davantage la vie qu'un régime moins sévère, une étude a montré qu'un régime hypocalorique léger, mais administré à des souris dès leur plus jeune âge (à trois semaines), présente quelques avantages (c). Cette observation pourrait avoir des conséquences médicales importantes. En outre, la restriction calorifique chez les rongeurs prolonge à la fois la durée de la vie et la jeunesse des animaux. La souris photocopiee, soumise à une restriction calorifique, a vécu jusqu'à un âge inhabituel; la plupart des souris alimentées normalement meurent à 40 mois, tandis qu'elle était âgée de 53 mois au moment de l'étude. On ne sait pas encore pourquoi on vit un mois plus tard d'une cause inconnue.

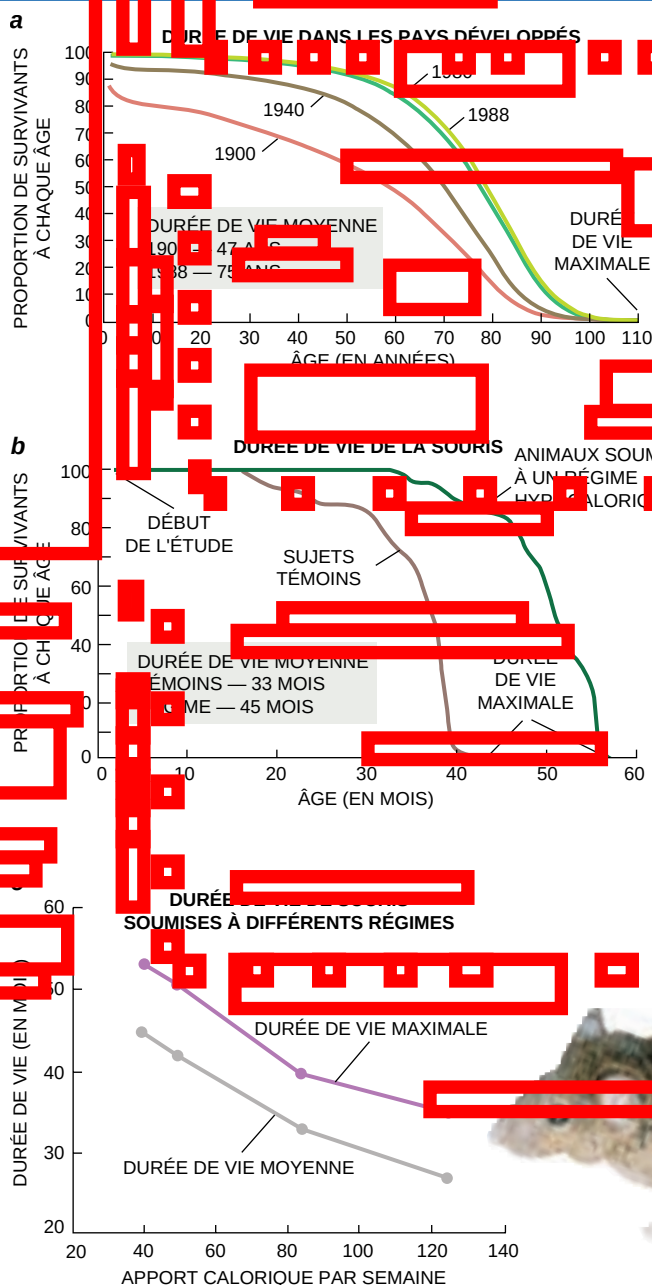
QUELQUES EFFETS DE LA RESTRICTION CALORIFIQUE CHEZ LES RONGEURS

Retarde les augmentations :
de l'ajustement métabolique ; de la réparation de l'ADN ; de l'efficacité du système immunitaire ; de la capacité d'apprentissage ; de la masse musculaire ; de la synthèse des protéines.

Ralentit les augmentations :

de la réticulation des protéines stables ; de la production de radicaux libres par les mitochondries ; des lésions oxydatives non réparées dans les tissus.

Retarde l'apparition de maladies tardives, notamment : des maladies auto-immunes ; des cancers ; de la cataracte ; du diabète ; de l'hypertension ; de l'insuffisance rénale.



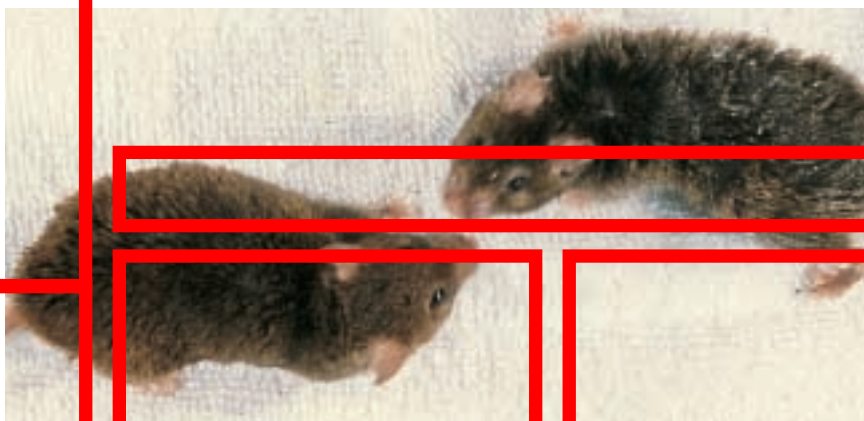
Il est trop tôt pour savoir si les régimes prolongent la vie ou la jeunesse des singes, mais on a mesuré les effets de la restriction calorique sur des biomarqueurs du vieillissement, c'est-à-dire sur des caractéristiques biologiques qui évoluent avec l'âge et qui reflètent la durée de vie en bonne santé. Par exemple, lorsque les primates vieillissent, leurs concentrations sanguines en insuline et en glucose; simultanément, la sensibilité à l'insuline (la capacité des cellules d'absorber du glucose en réaction aux signaux transmis par l'insuline) diminue. Un régime hypocalorique qui retarde ces modifications ralentit sans doute le vieillissement.

Depuis 1987, à l'Institut américain de recherches sur le vieillissement, George Roth et ses collègues étudient des singes rhésus (qui vivent une trentaine d'années) et des saïmiris (qui vivent rarement plus d'une vingtaine d'années). Certains animaux ont été mis au régime dès l'âge de un ou deux ans, d'autres seulement après la puberté. L'expérience a été menée également sur des singes rhésus, à commencer en 1989 : à l'Université de Madison, nous mettons les singes au régime dès qu'ils sont nés. À des âges compris entre 8 et 14 ans. Dans ces deux études, l'apport calorique est environ 30 pour cent inférieur à celui dont bénéficient les témoins alimentés normalement.

Prime jeunesse chez les primates

Les animaux sont en bonne santé et heureux, malgré la faim qu'ils manifestent au moment des repas. Leur organisme semble réagir au régime comme celui des rongeurs : la tension artérielle et la glycémie sont inférieures à celles des animaux témoins, et la sensibilité à l'insuline est supérieure. Les concentrations sanguines en insuline sont inférieures.

Personne n'a encore étudié rigoureusement les effets à long terme des régimes hypocaloriques chez des êtres humains de poids moyen. Les études des populations que la pauvreté affame ne sont guère concluantes, car ces personnes n'absorbent pas les substances nutritives indispensables. Toutefois, certaines observations indiquent, de façon indirecte, que les régimes hypocaloriques semblent être bénéfiques :



2. DEUX SOURIS DU MÊME ÂGE (40 mois) : celle qui a été soumise à un régime hypocalorique dès l'âge de 12 mois (à gauche) a l'air plus jeune et en meilleure santé que celle qui a été nourrie normalement (à droite).

ainsi, la plupart des habitants de l'île d'Okinawa, qui mangent une nourriture pauvre en calories, mais qui couvre les besoins vitaux; on y compte 40 fois plus de centenaires que dans les autres îles japonaises. De plus, les enquêtes épidémiologiques montrent que certains cancers, notamment le cancer du sein, du côlon et de l'estomac sont moins fréquents chez des personnes qui consomment peu de calories.

Enfin, l'expérience Biosphère 2, près de Tucson, a donné d'étonnants résultats. Cette expérience devait montrer qu'un homme pouvait survivre en autarcie, dans un environnement totalement fermé. Les rendements agricoles ayant été médiocres, les huit personnes qui se sont enfermées pendant deux ans ont dû diminuer notablement leur ration alimentaire. Bien des aspects de l'expérience ont été critiqués, mais les nutritionnistes ont bénéficié de la participation au projet de Roy Walford : l'effet de la restriction calorique et du vieillissement, il aida ses collègues à éviter la malnutrition et suivit divers aspects de leur physiologie. Il constata que, comme chez les rongeurs et chez les singes, la restriction calorique réduit la tension artérielle et les concentrations en glucose et en cholestérol total.

Si les résultats obtenus sur le singe et sur l'homme sont seulement préliminaires, ceux qui ont été obtenus chez les rongeurs et les primates sont concluants. Un régime hypocalorique a plusieurs effets bénéfiques. Quelle modification contribue le plus à la longévité et à la jeunesse? Plusieurs des hypothèses sont déjà repoussées. Si un apport calorique restreint retarde la croissance et limite l'accumulation de graisses dans l'organisme, par exemple, ce n'est pas par ces deux effets qu'il augmente la longévité.

D'autres hypothèses sont étayées par des résultats expérimentaux. L'une d'entre elles stipule que la restriction calorique ralentirait la division cellulaire dans de nombreux tissus. La prolifération est liée au cancer, ce ralentissement expliquerait pourquoi les animaux soumis à un régime hypocalorique ont moins de cancers vers la fin de leur vie. Selon une autre hypothèse, la restriction calorique abaisserait la glycémie; de la sorte, les protéines stables se lieraient moins au glucose et conserveraient plus longtemps leurs fonctions normales.

L'hypothèse la mieux étayée envisage les radicaux libres, des molécules très réactives qui dérivent généralement de l'oxygène et qui portent un électron non apparié. La restriction calorique serait bénéfique, parce qu'elle préserverait les mitochondries contre ces radicaux libres (les mitochondries sont de minuscules structures intracellulaires qui fournissent leur énergie aux cellules). On sait que les radicaux libres participent aux mécanismes du vieillissement, parce qu'ils captent des électrons et qu'ils activent chimiquement des enzymes qui dégradent les protéines. Dès les années 1950, à la Faculté de médecine du Nebraska, Denham Harman avait conjecturé que leur apparition au cours du métabolisme normal dégradait progressivement les cellules. Des études faites en 1988, par des biologistes ont montré que les mitochondries étaient les principales cibles de ces radicaux.

Les radicaux libres pourraient accélérer le vieillissement en interférant avec la synthèse de l'ATP dans les mitochondries. L'ATP, ou adénosine triphosphate, est la molécule qui fournit l'énergie nécessaire aux mécanismes

cellulaires, par exemple au transport des ions à travers les membranes cellulaires, à la contraction des fibres musculaires ou encore à l'élaboration de protéines. La molécule est synthétisée à l'issue d'une série complexe de réactions, auxquelles participent divers complexes moléculaires localisés dans la membrane interne des mitochondries. Ces complexes utilisent l'oxygène pour tirer de l'énergie des éléments nutritifs et synthétiser l'ATP.

Malheureusement, la machinerie mitochondriale qui tire de l'énergie des éléments nutritifs fabrique aussi des radicaux libres ; on pense même que les mitochondries produisent la plupart des radicaux libres présents dans les cellules. L'un d'eux est le radical superoxyde O_2^- (le point représente un électron supplémentaire) ; il est par lui-même et susceptible d'être transformé en peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), qui forme facilement le radical libre hydroxyle ($OH^\cdot$), extrêmement agressif.

Les radicaux libres endommagent les protéines, les lipides (les graisses) et l'ADN. Les cellules des mitochondries elles-mêmes, notamment la

machinerie de synthèse de l'ATP et l'ADN mitochondrial, qui code une partie des protéines nécessaires à cette machinerie, semblent les plus vulnérables. Ils sont particulièrement exposés parce qu'ils sont au cœur même de la production des radicaux libres et qu'ils sont bombardés en permanence par des agents oxydants. En outre, l'ADN mitochondrial est dépourvu des protéines qui protègent l'ADN nucléaire contre les agents destructeurs. Les radicaux libres semblent endommager l'ADN mitochondrial plus que l'ADN nucléaire extrait du même tissu.

Ainsi, les radicaux libres endommageraient la synthèse de l'ATP et favoriseraient la production de nouveaux radicaux libres ; à leur tour, ces radicaux altéreraient les constituants des mitochondries, inhibant encore davantage la synthèse d'ATP. Simultanément, les radicaux libres attaqueraient les composants cellulaires situés à l'extérieur des mitochondries, perturbant également le fonctionnement des cellules. L'ensemble de ces phénomènes réduirait leur efficacité et leur physiologie serait menacée. L'organisme

tente de compenser les effets délétères des agents oxydants à l'aide d'enzymes antioxydantes, qui réparent les dommages causés par l'oxydation, mais ces systèmes n'ont pas une efficacité absolue. Les dommages s'accumulent au fil du temps.

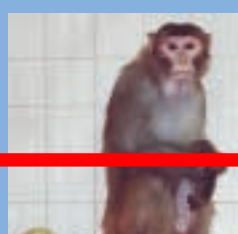
Alimentation et radicaux libres

Plusieurs équipes ont étudié les relations entre le vieillissement et l'action des radicaux libres sur les mitochondries et sur divers composants cellulaires. Notamment Rajindar Sohal, William Orr et leurs collègues de l'Université méthodiste de Dallas ont observé que, chez des rongeurs, des mouches, des porcs ou des vaches, le vieillissement s'accompagne d'une production accrue de radicaux libres dans les mitochondries ; simultanément la membrane mitochondriale interne (siège de la synthèse de l'ATP), ainsi que les protéines et l'ADN mitochondriaux subissent des attaques oxydatives. Chez plusieurs de ces espèces, plus la production de radicaux libres est rapide, plus la durée de vie moyenne et la durée de vie maximale diminuent.

De surcroît, la synthèse d'ATP dans le cerveau, dans le cœur et dans les muscles squelettiques, diminue avec l'âge : c'est compréhensible si l'on admet que les mitochondries des cellules chondriales de ces tissus sont irrémédiablement endommagées par les radicaux libres. Chez l'homme, ces phénomènes seraient responsables des maladies dégénératives du système nerveux et du cœur, qui sont fréquentes chez les personnes âgées ; ils expliqueraient également pourquoi la masse musculaire et la force diminuent.

Les travaux de R. Sohal et de ses collègues indiquent que la restriction calorique retarderait le vieillissement en ralentissant les mécanismes oxydatifs dans les mitochondries : les concentrations en radical superoxyde et en peroxyde d'hydrogène, dans des mitochondries extraites du cerveau, du cœur et des muscles, sont

inférieures à celles des souris alimentées normalement. De plus, la production de radicaux libres augmente moins avec l'âge dans le groupe soumis au régime que dans le groupe témoin ; les protéines et l'ADN mitochondriaux sont également moins endommagés.

REGIME ALIMENTAIRE	REGIME ALIMENTAIRE
■ Apport alimentaire : 688 calories par jour ■ Poids : 15,5 kilogrammes ■ Proportion des graisses par rapport au poids : 24%	■ Apport alimentaire : 477 calories par jour ■ Poids : 10,5 kilogrammes ■ Proportion des graisses par rapport au poids : 14%
MARQUEURS BIOLOGIQUES	MARQUEURS BIOLOGIQUES
■ Tension artérielle : 129/60 (systolique/diastolique) ■ Glycémie : 71 (en milligrammes par décilitre de sang) ■ Insulinémie : 93 (en micro-unités par millilitre de sang) ■ Triglycérides : 169 (en milligrammes par décilitre de sang)	■ Tension artérielle : 121/51 (systolique/diastolique) ■ Glycémie : 56 (en milligrammes par décilitre de sang) ■ Insulinémie : 29 (en micro-unités par millilitre de sang) ■ Triglycérides : 67 (en milligrammes par décilitre de sang)
	

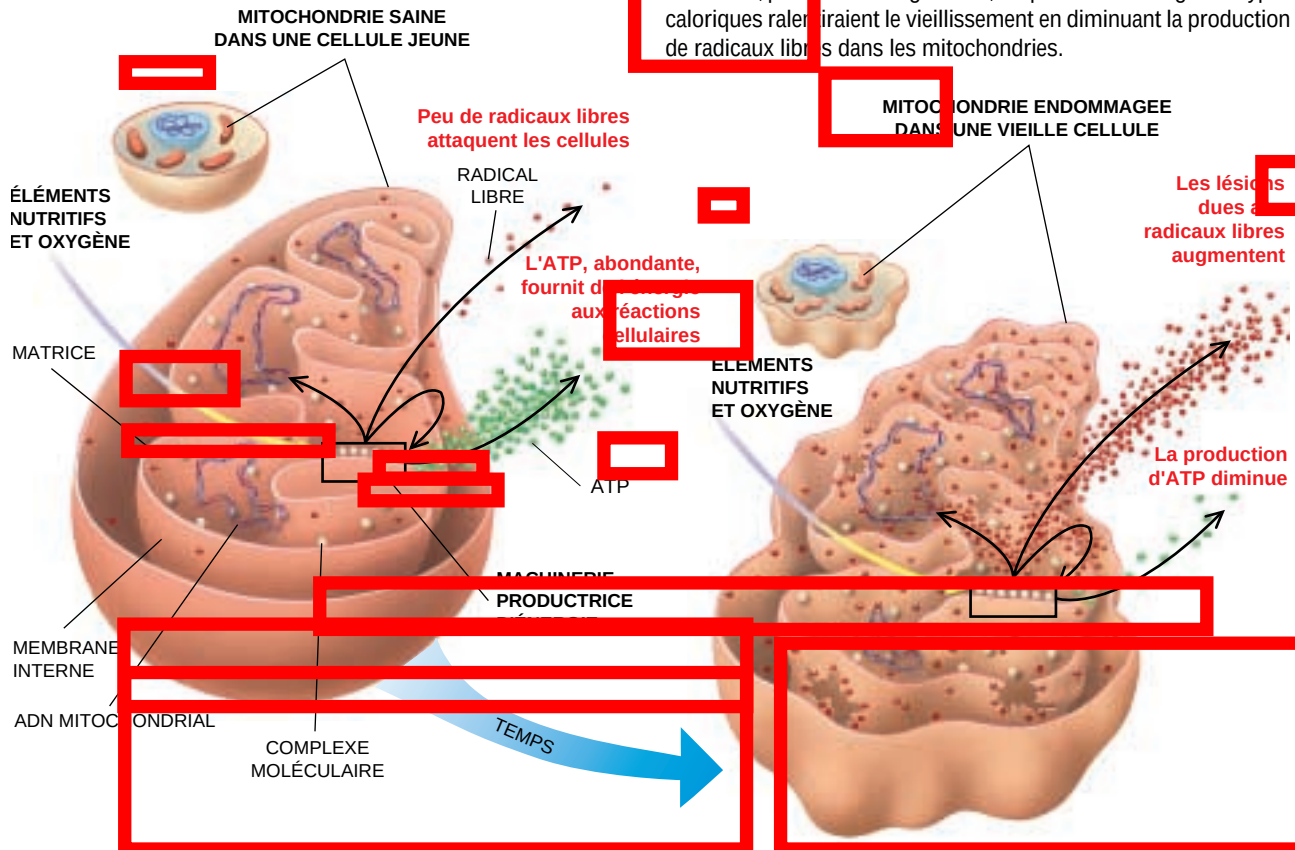
3. LES RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES d'études en cours sur la restriction calorique chez le singe rhésus n'ont pas encore révélé si un régime hypocalorique prolonge la durée de la vie. Toutefois, en comparant un groupe témoin (à gauche) avec des animaux soumis depuis cinq ans à un régime drastique (à droite), on constate que certaines constantes biologiques qui augmentent habituellement avec l'âge évoluent moins vite chez les animaux mis au régime. La tension artérielle est ici légèrement inférieure chez les animaux soumis à la restriction calorique, mais la baisse a été plus marquée pendant une grande partie de la durée de l'étude.

Une théorie du vieillissement

Pourquoi vieillissons-nous? Certains physiologistes mettent les radicaux libres (en rouge) produits dans les mitochondries, les centrales qui fournissent leur énergie aux cellules. Des radicaux libres se forment (à gauche) lorsque la machinerie produisant l'énergie dans les mitochondries (petit cartouche noir) utilise les éléments nutritifs et l'oxygène (en vert) pour synthétiser de l'ATP (l'adénosine triphosphate), la molécule (en vert) qui fournit l'énergie nécessaire à la plupart des activités cellulaires. Ces radicaux endommagent irré-

versiblement la machinerie elle-même et l'ADN mitochondrial, qui code une partie des éléments constitutifs. Ils peuvent également attaquer d'autres composants mitochondriaux et cellulaires.

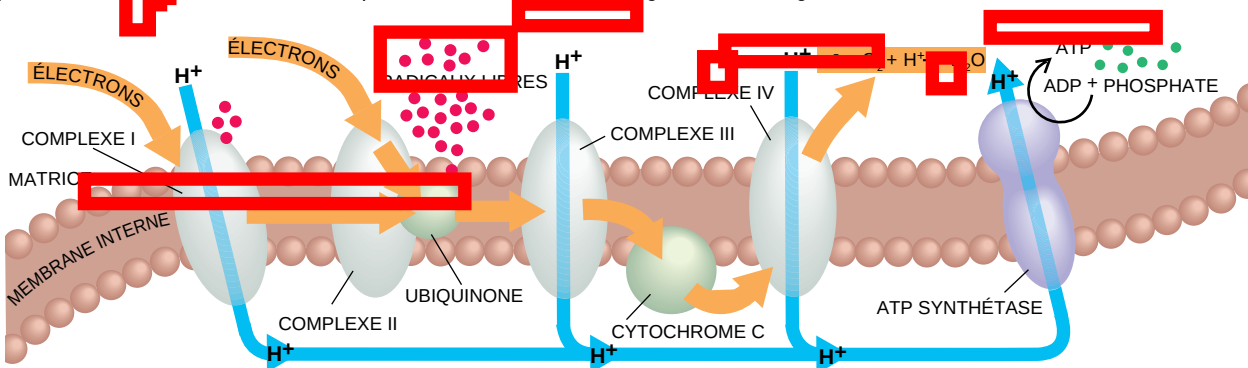
Progressivement (à droite), les lésions accumulées dans les mitochondries réduisent la production d'ATP et accélèrent la formation de radicaux libres et, par conséquent, la destruction des composants cellulaires. Lorsque les cellules sont endommagées et qu'elles manquent d'énergie, leur efficacité diminue. Le fonctionnement des tissus, puis de tout l'organisme, est perturbé. Les régimes hypocaloriques ralentiraient le vieillissement en diminuant la production de radicaux libres dans les mitochondries.



Production d'énergie... et de radicaux libres

La machinerie qui produit de l'énergie dans les mitochondries est une chaîne de transport d'électrons, constituée de quatre gros complexes moléculaires (en gris) et de deux complexes plus petits (en vert clair). Les complexes I et II (à gauche) extraient des électrons des aliments (flèche orange) et les transfèrent à l'ubiquinone, le principal transporteur de radicaux libres. L'ubiquinone envoie les électrons vers le complexe IV, où ils interagissent

avec des atomes d'oxygène et d'hydrogène pour former de l'eau. Des protons (H^+) migrent vers un autre complexe (flèches bleues), celui de l'ATP synthétase (en violet), qui utilise l'énergie fournie par les protons pour synthétiser de l'ATP (en vert foncé). Des radicaux libres se forment lorsque des électrons s'échappent de la chaîne de transport et se combinent avec des atomes d'oxygène du voisinage.



Par quels mécanismes un régime hypocalorique agit-il sur la production de radicaux libres ? On l'ignore, mais on suppose que lorsque l'apport calorique est réduit, les mitochondries de toutes les cellules ou d'une partie d'entre elles consomment moins d'oxygène ou l'utilisent de façon plus efficace, limitant la production de radicaux libres par unité d'oxygène consommée.

Et l'homme ?

Les médecins ne préconiseront pas de régime hypocalorique draconien tant qu'ils ne seront pas convaincus par des expériences rigoureuses menées sur des primates. Néanmoins, ils donnent déjà quelques conseils : toute restriction alimentaire serait préjudiciable aux enfants, puisqu'elle retarde la croissance. De plus, les enfants supportent moins bien le jeûne que les adultes, et ils seraient plus sensibles aux effets négatifs potentiels d'un régime hypocalorique (même si la restriction calorique n'est pas équivalente au jeûne). En revanche, un régime hypocalorique commencé vers l'âge de 20 ans devrait allonger la durée maximale de vie.

De combien devrait-on réduire l'apport calorique ? Lors des premières expériences, les rongeurs soumis à leur régime à l'âge adulte ne vivaient pas plus longtemps que les autres, sans doute parce qu'ils étaient mis trop rapidement au régime ou parce que ce régime était trop strict. Nous avons montré qu'une diminution progressive de l'apport calorique jusqu'à 65 pour cent de sa valeur usuelle augmentait la survie de souris âgées de un an.

Comment déterminer l'apport calorique optimal pour notre espèce ? Une extrapolation des résultats obtenus sur des rongeurs est difficile, mais diverses observations indiquent que de nombreuses personnes se porteraient bien en réduisant leur poids de 10 à 15 pour cent par rapport à leur « valeur d'équilibre ». La détermination du poids de référence est elle-même assez difficile et, plutôt que d'essayer de l'estimer, les personnes qui se soumettraient à un régime hypocalorique devraient (avec l'aide de leur médecin) trouver par approximations successives l'apport calorique qui abaisse leur glycémie ou leur concentration en cholestérol, ou qui modifie d'autres paramètres liés à l'état de santé.

Les recherches faites sur les animaux montrent qu'un régime hypocalorique raisonnable pour l'homme correspondrait à un apport quotidien de 1 gramme de protéines et d'un demi-gramme environ de lipides par kilogramme de poids corporel. Cela réduirait la quantité de glucides complexes (les longues molécules formées par enchaînement de sucres simples), afin d'obtenir la quantité de calories voulue. Pour obtenir les doses nécessaires en éléments nutritifs indispensables, on devrait choisir avec soin les aliments à consommer et ajouter notamment des vitamines.

Les personnes qui suivraient des régimes hypocaloriques devraient être suivies par un médecin, car ces régimes ont des inconvénients pires que la seule sensation de faim : la perte de poids qui résulterait du régime très strict provoque de la stérilité, en bloquant l'ovulation ; le surcroît, un état anovulatoire prolongé, accompagné d'une diminution de la production d'œstrogènes, risque d'augmenter les risques d'ostéoporose (l'effritement des osseux) et de fonte de la masse musculaire au cours de la vieillesse. Enfin, les régimes trop stricts risquent de diminuer la résistance à divers stress, par exemple aux infections. La résistance aux stress n'ayant guère été étudiée chez les rongeurs soumis à un régime hypocalorique, on en ignore les conséquences.

Il faut donc peut-être encore 10 ou 20 ans pour que l'on sache si la restriction calorique est aussi bénéfique pour l'homme qu'elle l'est pour le rat, pour la souris et pour divers autres animaux. D'ici là, on comprendra mieux les mécanismes du vieillissement et l'on aura peut-être trouvé des moyens de le retarder, par des régimes, par des médicaments ou par tout autre méthode qui reste à découvrir.

Richard WEINDRUCH, professeur de médecine, dirige l'Institut de recherches sur le vieillissement de Medicine

Richard WEINDRUCH et Roy L. WALFORD, *The Retardation of Aging and Disease by Dietary Restriction*, Charles C. Thomas, 1988.

Free Radicals in Aging, sous la direction de Byung P. Yu, CRC Press, 1993.

Modulation of Aging Processes by Dietary Restriction, sous la direction de Byung P. Yu, CRC Press, 1994.

Le futur de la micro-électronique

DAN HUTCHESON • JERRY HUTCHESON

La fin de la croissance de l'industrie micro-électronique pourrait obliger les fabricants de circuits intégrés à proposer plus de variété.

Depuis l'utilisation des premières tablettes d'argile, à Sumer, la mise au point de nouveaux moyens de stockage de l'information a bouleversé les systèmes juridiques, politiques et sociaux. La science moderne, également, se développe en symbiose avec le traitement de l'information : les progrès scientifiques permettent le stockage, la lecture et le traitement de volumes croissants d'informations, qui donnent, en retour, les bases nécessaires à de nouveaux progrès.

Au cours des dernières décennies, la micro-électronique est devenue une force motrice cruciale de l'entreprise scientifique, inaugurant une ère nouvelle. Les circuits intégrés sont à l'origine des ordinateurs personnels, qui ont transformé le monde des affaires ; ils sont utilisés dans des systèmes de commande qui permettent aux moteurs et aux machines de fonctionner de façon plus propre et plus efficace, et ils sont au cœur d'appareils médicaux qui contribuent à sauver des vies. Ce faisant, ils ont engendré une industrie dont le chiffre d'affaires dépasse plusieurs centaines de milliards de francs et qui emploie des millions de personnes. Tous ces avantages, et bien d'autres, résultent principalement des efforts de miniaturisation : l'industrie micro-électronique a réussi à placer de plus en plus de transistors sur

les puces, à des coûts de plus en plus faibles.

Cette miniaturisation est si régulière qu'elle sert de base aux raisonnements qui président aux développements industriels. Néanmoins, des experts ont craint que des obstacles techniques et économiques ne ralentissent le rythme

du développement : physiciens, chimistes ou ingénieurs, les Cassandres qui annonçaient l'imminence d'une fin à la croissance ont été contredits par la créativité et par l'ingéniosité de leurs pairs.

Pourtant, ne sommes-nous pas, cette fois-ci, devant une situation nouvelle ? Le coût d'une nouvelle ligne avoisine aujourd'hui les dix milliards de francs et la densité des transistors approche des limites techniques des techniques utilisées. Aussi peut-on se poser la question : qu'advient-il de cette industrie lorsqu'elle se trouvera finalement face à des barrières techniques infranchissables ?

De plus en plus de transistors

En 1965, six ans après l'invention du circuit intégré, Gordon Moore, cofondateur de la Société *Intel*, en 1968, observa que le nombre de transistors placés sur les puces doublait chaque année et il prédit que ce doublement continuerait. Ce phénomène, aujourd'hui nommé loi de Moore, a eu des conséquences d'une grande portée.

Comme les doublements de densité avaient lieu sans augmentation du prix, le coût par transistor diminuait de moitié à chaque année. Ainsi, pour plus de transistors, une puce mémoire stocke deux fois plus de données. Les microprocesseurs sont composés d'un nombre sans cesse croissant d'unités fonctionnelles qui, moins espacées, interagissent plus vite. Ces progrès ont donc donné aux utilisateurs une plus grande puissance de calcul pour un coût égal, stimulant ainsi les ventes de

puces et la demande d'une puissance toujours plus grande.

Au grand étonnement de beaucoup d'experts — G. Moore compris —, la miniaturisation se poursuivait rapidement. À la fin des années 1970, la progression avait un peu ralenti (le nombre de transistors doublant seulement tous les 18 mois), mais ce rythme s'est maintenu depuis, aboutissant à des circuits intégrés qui en comptent aujourd'hui plus de six millions de transistors. Les composants électroniques de ces puces mesurent 0,35 micromètre (ou milliardième de mètre) de large. Dans quelques mois, les circuits intégrés qui seront commercialisés comporteront dix millions ou plus de transistors qui ne mesureront que 0,25, voire 0,16 micromètre de large.

Contrairement à ce que laisse penser la loi de Moore, le chemin menant à la puce d'aujourd'hui n'a pas été régulier. À plusieurs reprises, les fabricants de puces ont dû surmonter d'importantes limitations de leurs appareils et de leur technologie de fabrication.

Aucun de ces problèmes n'a été l'obstacle réel dont la solution aurait été si coûteuse qu'elle aurait ralenti ou même arrêté la progression, conduisant cette industrie à la ruine. Néanmoins, les difficultés sont devenues de plus en plus nombreuses, liées aux techniques de fabrication des semi-conducteurs.

On obtient les circuits intégrés en façonnant des transistors interconnectés sur un disque de silicium. La fabrication consiste en une série d'étapes, nommées «niveaux de masquage», où des films de matériaux variés — dont certains sont photosen-

sibles – sont placés sur le silicium et exposés à la lumière. Après ces étapes de dépôt et d'exposition, on grave sélectivement les zones photoactivées ou, au contraire, les couches inertes, afin d'obtenir des motifs qui, une fois alignés et combinés avec ceux des autres couches, forment les transistors et leurs connexions. Habituellement, on fabrique plus de 200 puces sur un mince disque de silicium, ou galette (voir la figure 2).

Dans une première série de niveaux de masquage, on dépose des films d'oxyde isolants afin de fabriquer les transistors. Ensuite, on coule sur ces films un enduit photosensible que l'on expose avec un «photo-répéteur», un appareil semblable aux agrandisseurs photographiques ; la lumière traverse un motif réticulé et expose le film. On a ainsi un film composé de parties opaques et de parties transparentes. Après exposition de la résine photosensible, un développement délimite les «trous de contact», où les différentes couches conductrices sont interconnectées : une étape de gravure dans le film permet de réaliser les contacts électriques entre les transistors, puis la résine est éliminée.

D'autres étapes de photogravure, analogues à la première, permettent de fabriquer les films conducteurs de métal ou de silicium microcristallin qui relient les transistors. La fabrication d'un circuit intégré nécessite une vingtaine d'étape.

Les phénomènes physiques utilisés lors de cette fabrication pourraient limiter les efforts de miniaturisation. L'un de ces obstacles est le critère de Rayleigh, ainsi nommée d'après John William Strutt, troisième baron de Rayleigh, qui obtint le prix Nobel de physique en 1904 : la dimension des plus petits détails pouvant être résolus par un système optique d'ouverture circulaire est proportionnelle au quotient de la longueur d'onde de la source lumineuse par l'ouverture de l'objectif. Autrement dit, plus les longueurs d'onde sont petites et plus l'ouverture est grande, meilleure est la résolution.

Cette limite physique limite le nombre de transistors que l'on peut placer sur une puce. La source de lumière dont on se sert le plus souvent pour la lithographie des circuits intégrés est la lampe à vapeur de mercure, dont deux rayonnements sont utilisés : la raie g du mercure, à une longueur d'onde de 0,436 micromètre, et la raie i, à une longueur d'onde de

0,365 micromètre. La première est visible à l'œil nu, tandis que la seconde est située dans le violet proche. Les ouvertures utilisées sont comprises entre 0,28 micromètre et 0,65 micromètre pour les technologies à 0,65 micromètre pour celles des systèmes lithographiques de pointe. Avec ces valeurs, et dans les conditions particulières qu'impose la fabrication, la résolution est d'environ 0,54 micromètre pour les lentilles utilisées avec la raie g, et de 0,48 micromètre pour celles qui sont utilisées avec la raie i.

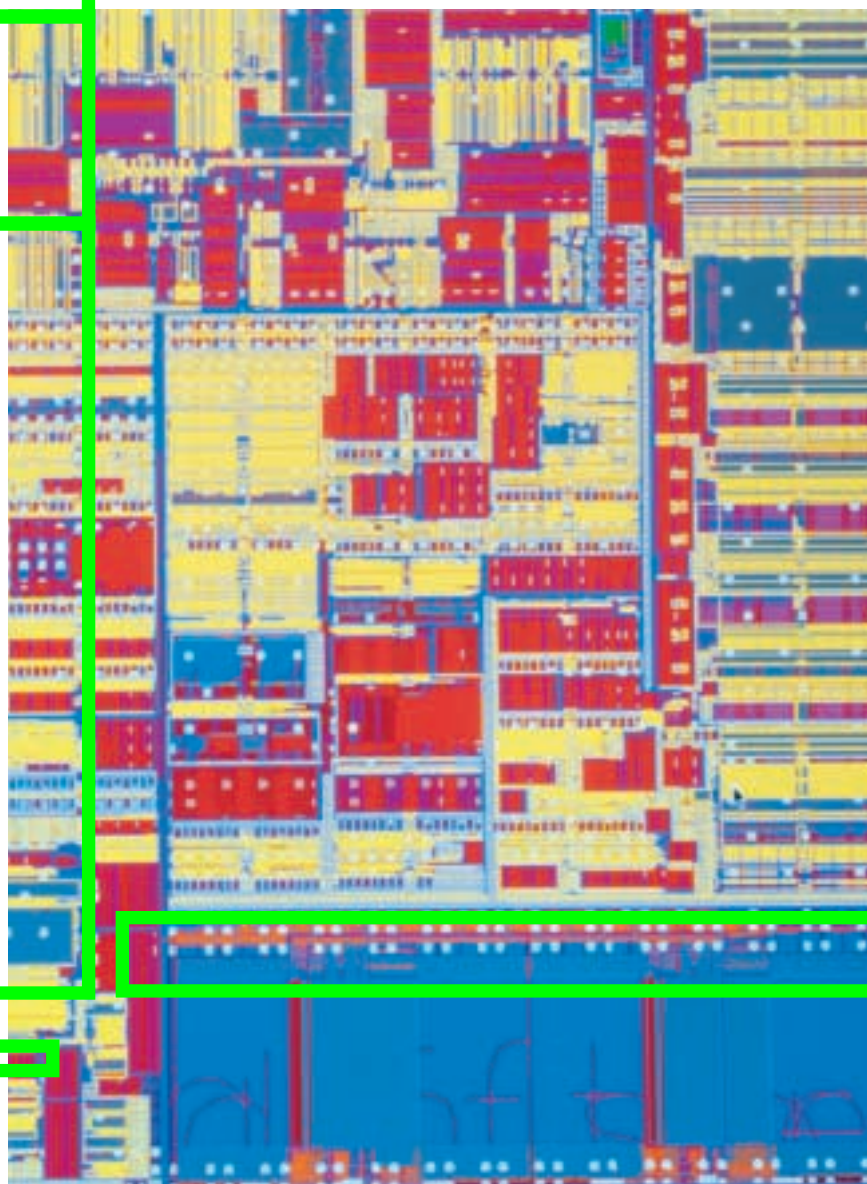
Jusqu'au milieu des années 1980, on pensait que la raie g était la seule utilisable en pratique, mais on a progressivement levé les obstacles à l'utilisation de la raie i. L'histoire de ce

progrès illustre la complexité des relations qui existent, dans l'industrie, entre l'économie et la technique : non seulement les progrès techniques ont permis de dépasser les limites physiques, mais on a dû découvrir que d'autres barrières n'étaient que des conséquences du niveau de risque que des entreprises considéraient comme tolérable. Cette histoire se répète

micro-électronique commence à être gênée par les limites pratiques imposées par l'utilisation de la raie i.

Le spectacle doit-il continuer ?

La raie i semblait naguère inutilisable, parce que les verres classiques



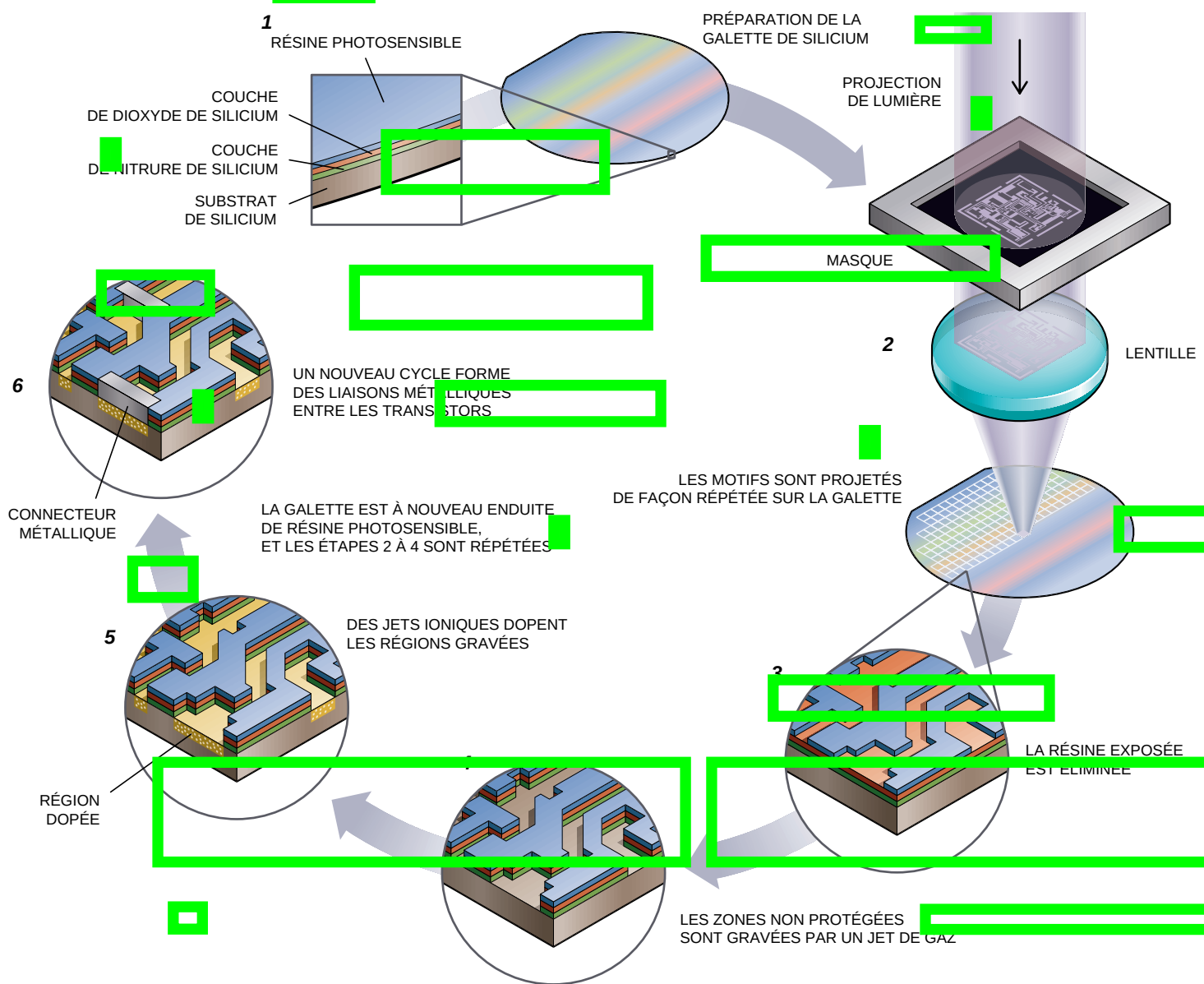
1. LES SCHÉMAS DE CIRCUIT permettent aux concepteurs de s'y retrouver dans les plans des puces. Sur ce schéma d'une partie du prochain microprocesseur de Motorola, le PowerPC 620, les différentes couches sont représentées par des couleurs distinctes.

sont opaques aux ultraviolets, ce qui oblige à utiliser des matériaux transparents. On pensait initialement que, même si l'on avait pu fabriquer des lentilles de quartz appropriées, on aurait difficilement vérifié l'alignement de motifs invisibles. En outre, comme 70 pour cent seulement de la lumière ultraviolette est absorbée par le quartz, on craignait que l'énergie lumineuse absorbée ne chauffe la lentille, ce qui aurait déformé l'image.

D'autres difficultés semblaient condamner les progrès. Le critère de Rayleigh déterminait la profondeur de champ ; et plus la profondeur de champ est faible, meilleure est la résolution. Pour les meilleurs résultats, l'uti-

lisées avec la raie g, la profondeur de champ est d'environ 0,52 micromètre et, pour celles de la raie i, de 0,50 micromètre. D'aussi faibles profondeurs de champ nécessitent des galettes de silicium beaucoup plus planes que celles qui étaient produites il y a quelques années. Des innovations ont résolu ces problèmes. Des méthodes d'aplanissement ont procuré des surfaces optiquement planes, et la limite de Rayleigh a été dépassée grâce à des réglages fins aux bords des motifs, dans le masque ; en changeant la phase des rayonnements de la raie i, on a

obtenu une meilleure définition des bords et, donc, des détails de gravure plus fins. Enfin, comme la constante de proportionnalité entre la longueur d'onde de la résolution dépend du contraste de l'image projetée sur la galette de silicium au cours de la lithographie, le fabricant a dû chercher à contrebalancer une constante de proportionnalité inférieure à celle qui semblait nécessaire. En contrepartie, afin de conserver une proportion faible de défauts, ils ont dû réduire les tolérances des opérations de lithographie, de dépôt et de gravure. Ces innovations permettent aujourd'hui l'utilisation de la raie i pour la réalisation



2. LA FABRICATION DES PUCES consiste en un cycle qui peut être répété jusqu'à 20 fois. Un grand nombre de puces sont fabriquées simultanément sur une galette de silicium enduite d'un revêtement photosensible (1). Chaque cycle commence par la projection répétée d'un nouveau motif sur la galette (2). À l'endroit où se forme une image correspon-

dant à une puce, l'enduit photosensible est dissous (3), puis les zones exposées sont attaquées par des gaz (4). Ces zones sont ensuite dopées par des ions, conduisant à la formation de transistors (5). Ces transistors sont reliés entre eux à mesure que de nouveaux cycles ajoutent des couches de métal et d'isolant (6).

de transistors de 0,35 micromètre de côté.

Au cours de tous ces développements, l'enjeu était la diminution du contraste que les entreprises étaient prêtes à tolérer. Lorsque le contraste est parfait, l'image créée sur la résine photosensible est nette. Comme tant d'autres leçons de l'industrie, le contraste semblait techniquement fondamental, mais il n'était déterminé que par un choix de risques industriels. On trouva finalement que l'affaiblissement du contraste ne réduisait pas les rendements si le contrôle de qualité était renforcé à d'autres moments de la fabrication.

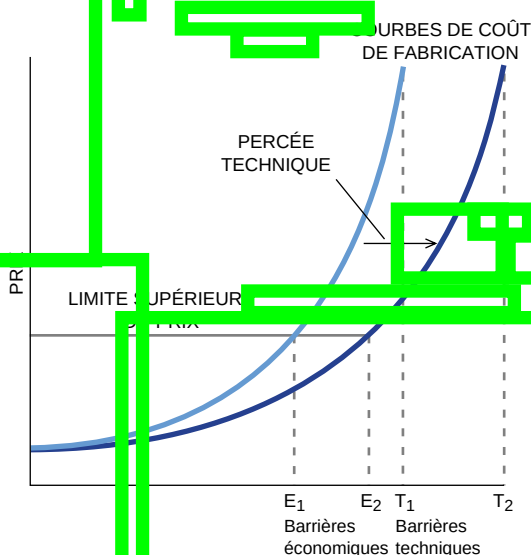
Quand le flot des innovations se tarira-t-il ? C'est difficile à dire, mais, lors de l'amincissement du flot en un mince filet, les conséquences économiques de l'approche des barrières techniques pourraient se faire sentir avant que les barrières économiques ne soient

atteintes : le coût des augmentations de performances des puces croît rapidement lorsque les techniques de fabrication sont utilisées à leur limite, de sorte que les prix de vente, devenant excessifs, risquent de conduire à une stagnation du marché avant l'épuisement des innovations techniques.

Pourtant, le mûrissement d'une nouvelle technique s'accompagne d'une réduction du prix de revient des circuits intégrés. L'industrie passe alors d'une courbe de rendement associée à l'ancienne technique à une autre courbe, correspondant au nouveau procédé. Une découverte permettant de changer de technique de fabrication abaisse la courbe du prix de revient, et donc la courbe des performances (voir la figure 3). On obtient alors, sans augmentation du prix de revient, des performances supérieures, ce qui pousse les acheteurs à remplacer leur ancien matériel. Ce phénomène est important dans l'industrie électronique, car les produits sont rarement utilisés avant de devenir obsolètes.

Les procédés de fabrication et les mécanismes technico-commerciaux évoqués s'appliquent à toutes les sortes de puces, mais le marché principal est celui des puces mémoires. Le prix d'un méga-octet de mémoire a baissé, de 2,5 millions de francs il

LE PRIX DE REVIENT EN FONCTION DU PRIX



3. LE PRIX DE REVIENT DES PUCES DÉPEND DE LA TECHNIQUE

T_1 et T_2 correspondent à des barrières techniques : des accroissements minimes des performances des puces deviennent très coûteux. Cependant, les barrières économiques apparaissent bien avant les barrières techniques. Ces barrières se trouvent aux intersections E_1 et E_2 des courbes avec la droite représentant le prix maximum que le client est disposé à payer. Les percées techniques ont pour effet d'abaisser la courbe jusqu'à la position de la courbe la plus foncée. Les performances s'améliorent alors, ce qui déplace les barrières en E_2 et T_2 .

Il y a 25 ans, jusqu'à moins de 200 francs aujourd'hui. Au cours de la même période, le coût d'une usine de fabrication de telles puces a augmenté, de moins de 20 millions de francs, jusqu'à un peu plus de 6 milliards de francs, ce qui a entraîné une augmentation de la plupart des entreprises, à l'exception des plus grandes. Ces coûts astronomiques, dus pour la plus grande partie à des innovations techniques toujours plus imposantes, ont récemment attiré l'attention sur les limites de l'industrie des semi-conducteurs.

Les innovations nécessaires

La résolution ne s'améliorera pas brusquement, mais les barrières seront si hautes que leur franchissement engendrera des changements plus profonds que ceux provoqués par les cycles précédents.

La plupart des obstacles ont pour origine : soit les structures en couches minces qui composent le circuit intégré ; soit les sources lumineuses néces-

saires à la fabrication de conducteurs extrêmement fins ; soit la largeur des conducteurs eux-mêmes. La constante diélectrique des couches minces isolantes, par exemple, est au cœur de deux difficultés. Quand une couche de matériau isolant est placée entre deux conducteurs, les signaux électriques de deux conducteurs n'interfèrent pas si la constante diélectrique de l'isolant est élevée. Avec l'intégration croissante, les couches sont de plus en plus serrées, et les interférences entre les conducteurs empirent. Pour y remédier, on cherche à réduire la constante diélectrique des isolants.

Cette recherche implique l'utilisation de matériaux de faible constante diélectrique et, aussi, de mettre au point de nouvelles structures de minces à faible constante diélectrique. Certains ingénieurs examinent ainsi comment on pourrait cribler la couche isolante de petits vides pour profiter de la faible constante diélectrique de l'air.

En revanche, en d'autres zones de circuits intégrés, les matériaux doivent avoir une constante diélectrique élevée. La plupart des circuits intégrés contiennent des condensateurs, c'est-à-dire des composants capables de conserver des charges électriques. Dans les mémoires vives nommées DRAM (*Dynamic Random Access Memory*, soit « mémoire dynamique à accès aléatoire »), chaque bit est stocké dans un condensateur :

un condensateur chargé représente le nombre binaire 1, tandis qu'un condensateur non chargé représente le nombre binaire 0. Les puces requièrent de nombreux condensateurs ayant des capacités importantes. La capacité étant proportionnelle à la constante diélectrique, les DRAM et autres puces semblables doivent contenir des matériaux à constante diélectrique élevée.

Parallèlement, les ingénieurs cherchent des sources lumineuses plus performantes pour les opérations de lithographie.

La résolution s'obtient par l'emploi de longueurs d'onde plus courtes. Les sources lumineuses au mercure, les plus utilisées aujourd'hui, émettent très peu d'énergie aux longueurs d'onde inférieures à 0,365 micromètre (la raie i). Les lasers (comme les lasers à excimères) sont efficaces jusqu'à environ 0,193 micromètre, mais ils engen-

drent peu d'énergie au-dessous de cette longueur d'onde ; on les a récemment utilisés pour fabriquer des puces à haute performance. Pour obtenir des résolutions encore supérieures, on doit employer des sources de rayons X, mais 20 années de recherche en lithographie à rayons X n'ont pas encore donné les résultats escomptés : aucune puce commercialisée aujourd'hui n'a été fabriquée par ce moyen.

Des usines à dix milliards

La résolution des difficultés techniques revient cher : le coût des équipements des usines (ou fonderies) devient prohibitif. Le prix du matériel lithographique

sont très importants, car la résolution minimale en dépend. Bien que celle-ci ait diminué d'environ 14 pour cent par an depuis le début de cette industrie, le prix du matériel lithographique a augmenté de 28 pour cent chaque année.

Initialement, chaque nouvelle génération de matériel lithographique coûtait dix fois plus que la précédente.

Aujourd'hui, le coût du matériel lithographique, point précédemment, le coût double seulement à chaque innovation notable. Le prix des autres matériels de fabrication de semi-conducteurs a augmenté de manière analogue.

Ainsi le coût global de la construction de fonderies microélectroniques a augmenté de deux fois tous les trois ans, moitié moins de degré d'intégration.

Société Intel dépense aujourd'hui cinq milliards et demi de francs pour sa nouvelle usine à Hillsboro, dans l'Oregon, et six milliards et demi de francs pour celle de Santa Clara, en Californie. Les Sociétés Samsung et Siemens possèdent chacune des fonderies qui, une fois terminées, auront coûté sept milliards et demi de francs ; la Société Motorola envisage même une fonderie qui coûterait 12 milliards. On peut construire des fonderies de silicium plus petites, mais elles sont moins rentables.

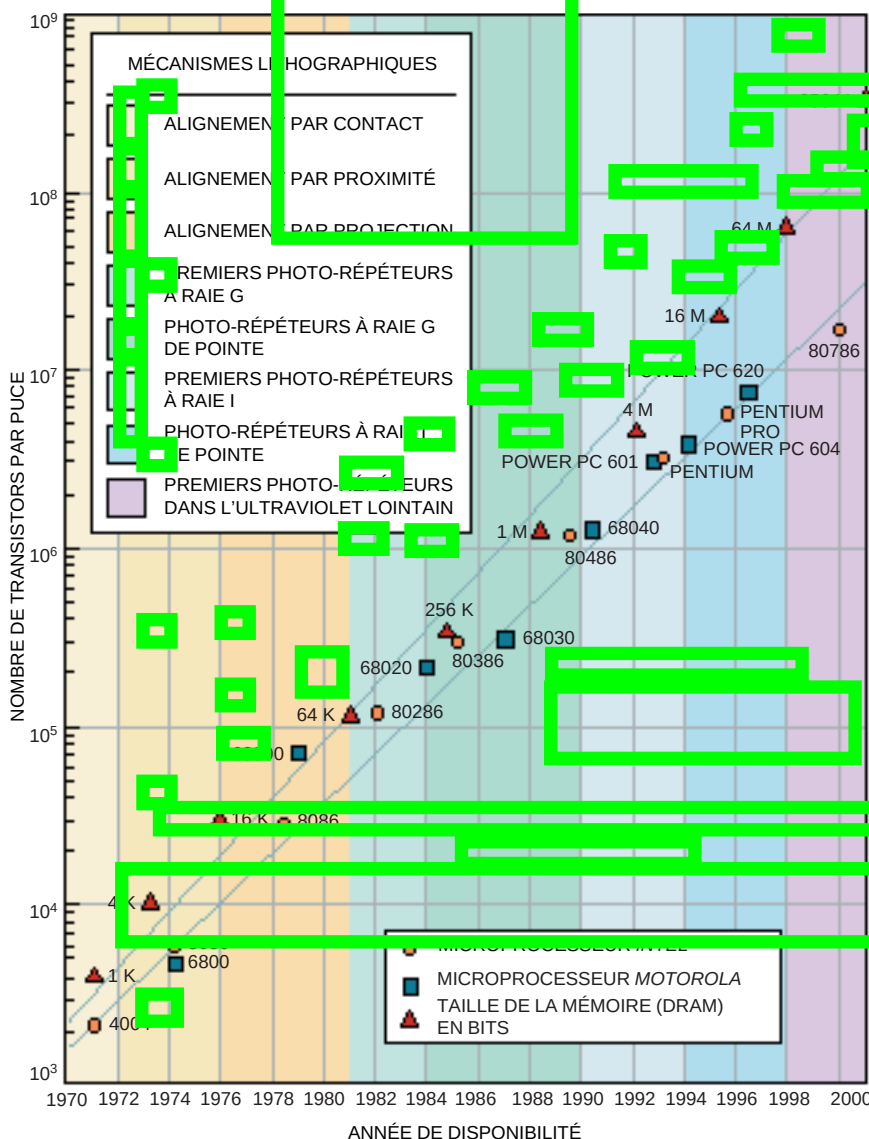
Le prix exorbitant des fonderies a suscité de nombreuses innovations de la proximité de barrières techniques redoutables. Toutefois, nous pensons que ces barrières ne seront pas infranchissables : l'industrie micro-électronique ne cessera pas de progresser, mais, les prix des semi-conducteurs augmenteront et l'allure des changements dans l'industrie ralentira.

Un tel ralentissement n'est pas non plus précédent : le coût par bit de mémoire a augmenté de 279 pour cent entre 1985 et 1988, sans conséquence néfaste, au contraire : 1988 a été l'une des meilleures années pour l'industrie micro-électronique. Si le coût par bit augmente de manière permanente, le régime industriel se modifiera, ainsi que les modèles économiques.

Toujours plus haut, toujours plus loin

La plupart des industries de plus de dix ans d'existence ont connu des changements de régime. Malgré ses particularités, l'industrie micro-électronique reste soumise aux principes de l'économie et à la loi de l'offre et de la demande. L'histoire des industries techniques anciennes, tels l'aéronautique, le transport ferroviaire et l'automobile, pourrait indiquer les évolutions de la micro-électronique.

Comme cette dernière, l'aéronautique s'est rapidement développée : en une cinquantaine d'années, elle est passée du monde de la Caravelle à celui de la Concorde. Comme l'industrie micro-électronique, elle a initialement accru l'armée avant de passer aux marchés civils (le transport de courrier et de passagers). Elle a assuré sa croissance en abaissant les coûts du kilomètre-passager parcouru, tout en réduisant la durée des voyages, de sorte qu'elle ressemble à la micro-électro-



4. LA DENSITÉ DE TRANSISTORS SUR LES CIRCUITS INTÉGRÉS CROÎT À UNE VITESSE EXPONENTIELLE. Sur cette courbe logarithmique, on voit que le rythme de la miniaturisation a été maintenu grâce à une succession de procédés lithographiques de plus en plus performants.

nique, qui accroît la densité des transistors et, donc, augmente les performances, tout en abaissant les coûts.

Pendant plusieurs décennies, l'industrie aéronautique a progressé en

centrant ses études sur l'accroissement des vitesses de vol et de la capacité de transport des avions. Ainsi sont nés le *Boeing 747* et le *Concorde*. Bien que le *Boeing 747* ait été techniquement

réussi, l'appareil est difficile à remplir, sauf sur les trajets les plus longs. D'autre part le *Concorde* a été une faillite économique en raison de sa consommation de carburant et de

Les cycles de profit

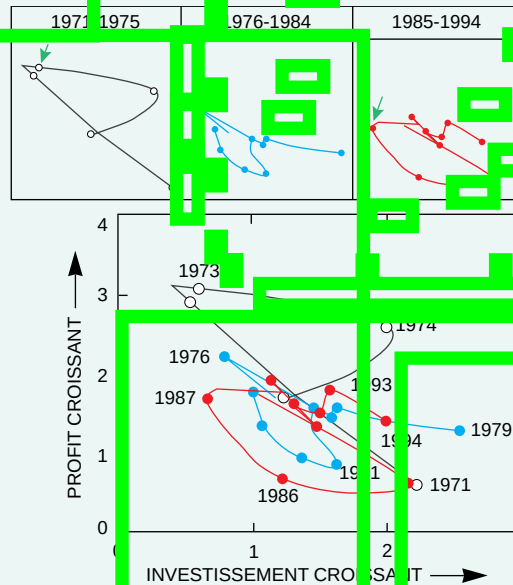
Au cours des 60 dernières années, la plupart des entreprises ont utilisé un modèle économique mis au point juste avant la Première Guerre mondiale pour estimer la rentabilité financière de leurs investissements en matériel, en recherche, en commerce, etc. Ce modèle, dû à Donaldson Brown Du Pont, a été introduit par la Société *General Motors*, lorsqu'elle a cherché à dominer la Société *Ford Motor*.

Aujourd'hui adopté universellement, ce modèle de rendement des capitaux investis est appliqué avec succès dans les industries pour lesquelles le taux de croissance et d'avancées techniques est faible. En revanche, ce modèle n'a à notre connaissance, jamais bien fonctionné dans le cas d'un secteur tel que l'industrie micro-électronique, où beaucoup des principaux taux de variation – de la performance des produits et du prix de revient du matériel de fabrication, pour n'en citer que deux – sont non linéaires. Cette non-linéarité distingue l'industrie micro-électronique de toutes les autres grandes industries et fait qu'aucun modèle économique classique ne s'applique.

L'industrie micro-électronique doit investir périodiquement des sommes importantes pour la recherche et l'achat de matériel, chaque nouvel investissement étant plusieurs fois supérieur au précédent. De plus, comme pour toute entreprise saine, ces investissements doivent se rentabiliser au bout d'un certain temps. Or, les fabricants de semi-conducteurs n'ont aujourd'hui aucun moyen pour déterminer avec précision quelle proportion de leurs bénéfices provient des investissements techniques. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, nous cherchons des méthodes prenant en compte ces éléments non linéaires, afin de modifier le modèle de rendement des capitaux investis.

Dans le modèle classique, on effectue de nouveaux investissements lorsque des écarts se manifestent entre la capacité actuelle d'un fabricant et sa capacité anticipée (cette dernière est la capacité dont une entreprise pense avoir besoin pour faire face à la demande dans un avenir proche). De tels écarts sont habituellement dus à la dépréciation du matériel et aux départs d'employés expérimentés. Dans une industrie telle que la micro-électronique, au contraire, on doit anticiper continuellement les accroissements de capacité, mais aussi prévoir et planifier les progrès importants des techniques de fabrication.

Pour prendre en compte cet effet d'entraînement technique, nous avons commencé par considérer le quotient de la somme d'argent produite au cours d'une année par les investissements pour



CE DIAGRAMME DE PHASE montre l'évolution de la relation entre les bénéfices et les investissements techniques de la Société *Intel* au cours de son histoire. Les points représentatifs forment des boucles dont chacune correspond à un cycle d'environ six ans (chaque boucle est représentée par une couleur particulière). Au cours de chaque cycle, la Société *Intel* passe d'une période sans profit, en raison d'investissements importants, à une période de profit engendrée par des investissements moins lourds. Les flèches vertes indiquent l'année du cycle durant laquelle la Société *Intel* a gagné le plus d'argent et dépensé pour son équipement.

les techniques nouvelles effectuées l'année précédente. Par technique nouvelle, nous entendons aussi bien du nouveau matériel de fabrication que la recherche et les études d'industrialisation. Les bénéfices produits au cours de l'année sont le profit brut produit par l'exploitation, y compris l'argent réinvesti pour la recherche.

Ce quotient mesure le profit différentiel rapporté aux investissements différentiel de l'année précédente. Il indique l'état de santé économique de l'entreprise, en ce qui concerne les bénéfices engendrés par les investissements dans des techniques toujours plus coûteuses. Le modèle de rendement des capitaux investis, au contraire, mesure le profit différentiel annuel produit, non seulement par les investissements de l'année précédente, mais par tous les investissements, quels qu'ils soient.

Jusqu'ici, nous avons groupé le nouveau matériel et les études dans la catégorie des techniques nouvelles, mais

l'effet d'entraînement technique devient plus frappant lorsqu'on distingue ces deux catégories et que l'on met en évidence leurs relations. On peut notamment calculer la proportion de ces deux investissements et tracer la courbe montrant la variation de cette proportion en fonction du quotient de la somme produite au cours d'une année donnée par les investissements en techniques nouvelles au cours de l'année précédente. La figure ci-dessus reproduit une telle courbe pour la Société *Intel*.

Plusieurs aspects intéressants de l'histoire financière d'*Intel* apparaissent sur ce « diagramme de phase ». En reliant les points représentatifs, on obtient des boucles dont chacune correspond à un cycle d'environ six ans, au cours duquel la Société *Intel* passe d'un état peu profitable, en raison de gros investissements, à un état d'excellents bénéfices, en raison d'investissements plus légers. Le diagramme montre qu'*Intel* aborde maintenant une nouvelle période de gros investissements. D'autres sociétés microélectroniques et des sociétés qui vendent des produits à la pointe de la technique ont des cycles analogues. La chronologie des périodes de bénéfices et des périodes d'investissements varie selon les sociétés.

Le minimum de chaque boucle est inférieur à celui de la boucle précédente. Cette observation, peut-être la plus remarquable qu'on puisse tirer de cette figure, signifie que les bénéfices d'*Intel*, rapportés aux dépenses en capital qui les ont produits, diminuent de cycle en cycle. Ce diagramme de phase, qui montre le cycle complet allant des investissements techniques à leurs résultats, est un outil puissant pour observer et gérer les cycles d'investissements propres à cette industrie dynamique.

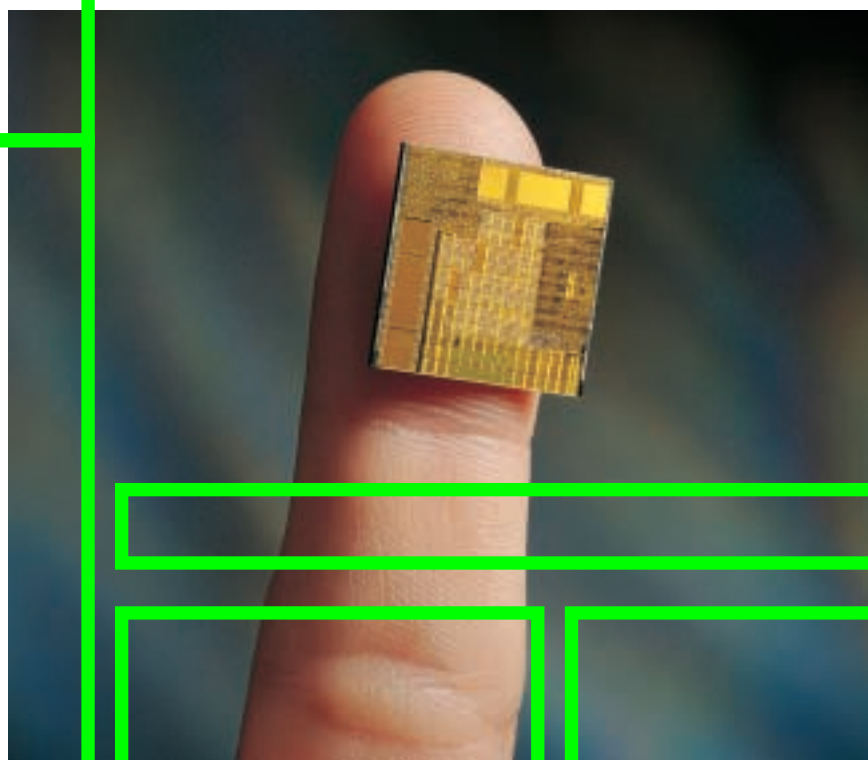
son bruit. Tous deux correspondaient à des limites ; leur échec relatif démontra que la technique ne pouvait pas offrir, de façon réaliste, plus de capacité de transport. Néanmoins, l'aéronautique n'a pas... décroché. Elle est entrée dans une deuxième phase, les constructeurs mettant au point des avions plus petits, mais variés, adaptés à des marchés plus spécifiques. Les ingénieurs ont surtout cherché des avions qui consomment moins et dont le confort est accru.

Dans l'industrie ferroviaire, l'évolution fut analogue. Du XIX^e siècle jusqu'au milieu des années 1970, les ingénieurs ont continuellement augmenté la puissance des locomotives, afin de réduire les coûts du transport de marchandises. Le coût des locomotives était important, mais il augmentait moins vite que la puissance de traction. Finalement le coût de mise au point des locomotives a tant augmenté que les constructeurs et les exploitants se sont groupés. La plus grande compagnie ferroviaire américaine de l'époque, *General Motors*, s'est associée à la division ferroviaire de la *General Motors*, afin de construire la locomotive *EMD DD-40*, un monstre énorme qui ne put être utilisé qu'à transporter des marchandises à travers les États-Unis. Cette faillite a conduit l'industrie ferroviaire à la réutilisation d'engins plus petits et plus flexibles.

Aujourd'hui, la micro-électronique est dans une situation analogue à celle des constructeurs ferroviaires américains juste avant la locomotive *EMD DD-40*. La construction des fonderies de puces de la génération futures est si coûteuse que les industriels ont commencé à s'associer en différents groupes, chacun attaquant, par sa propre méthode, l'immense problème posé par la fabrication rentable de ces puces denses.

Des grandes usines, mais peu de choix

L'histoire de l'industrie automobile est également riche en enseignements. Dans les années 1920, Henry Ford a construit une série d'usines dont chacune avait un meilleur rendement que les précédentes. L'aboutissement fut l'immense usine de Rouge, d'où les premiers exemplaires du *Modèle A* sortirent en 1928. Cette installation par-



5. LE MICROPROCESSEUR *Power PC 620* de la Société *Motorola* contient sept millions de transistors. Abrité par un boîtier en céramique, il sera utilisé principalement par les stations de travail et les serveurs de fichiers.

taut du minerai de fer, fondait la plupart des pièces nécessaires aux automobiles et assemblait ces dernières. Cependant, les besoins du marché ont déjà évolué, et les efforts de Ford pour diminuer le prix de revient en construisant des usines plus grandes et plus rentables se faisaient aux dépens de la variété des produits : ses adversaires se moquaient de lui, disant que les clients ne pouvaient choisir une voiture de n'importe quelle couleur, pourvu qu'elle soit noire.

L'industrie automobile évolua rapidement parce qu'elle voulut proposer plus de confort, un plus grand nombre d'options et de modèles. Quand la société *General Motors* comprit que le rendement n'augmentait plus avec la taille des usines et que les grandes usines étaient surtout utiles pour fabriquer des produits à un grand nombre d'exem-

plaires, elle se concentra sur des ventes aux marchés bien définis, desservis par des usines spécialisées. Le plus grand choix de modèles qui en résulta eut les faveurs du public américain et, bientôt, la part de marché de *General Motors* s'accrut aux dépens de celle de *Ford*.

Le même phénomène se retrouve aujourd'hui en micro-électronique.

Alors qu'au début des années 1980 la Société *Intel* proposait trois versions de son microprocesseur *8086*, aujourd'hui, avec le son *8088*, elle propose aujourd'hui plus de 30 variantes du microprocesseur *486*. Les puces mémoire se diversifient également : le nombre de configurations DRAM de quatre mégabits proposées par la Société *Toshiba* est 15 fois supérieur à celui des DRAM de 64 kilobits en 1984.

Les industries, du chemin de fer à la micro-électronique, ont en commun une phase initiale, dominée par des efforts pour améliorer les rendements et diminuer les prix de revient. Dans le cas des trois industries de transport, qui sont beaucoup plus évoluées, la deuxième phase a été caractérisée par le perfectionnement des produits ; la micro-électronique semble atteindre ce stade. L'effort

de la diminution des coûts de fabrication vers l'amélioration des gammes de produits. Notons que toutes ces industries ont continué à prospérer, malgré l'augmentation des coûts de fabrication.

L'industrie micro-électronique arrivera bientôt à un palier. Le rythme de la miniaturisation ralentira, tandis que

les coûts de fabrication grimperont en flèche. Comme l'indique l'histoire des industries aéronautique, automobile et automobile, l'industrie micro-électronique pourrait s'épanouir à la rencontre de barrières économiques et techniques sans précédent et, dans une large mesure, infranchissables : dans une industrie arrivée à maturité, la croissance proviendra à coup sûr des produits perfectionnés dans des gammes plus diversifiées.

Le stockage de l'information continuera de bénéficier de la miniaturisation des composants et des avantages inattendus, en permettant notamment l'assimilation des progrès par des développements en matière d'architecture des ordinateurs ou de programmation. Même dans l'industrie micro-électronique, la maturité peut être un atout merveilleux.

Jerry HUTCHESON a créé en 1976 la Société *VLSI Research*, que son fils, Dan HUTCHESON, a rejointe en 1979. Ce dernier fait partie du Conseil des applications de l'Université de Berkeley.

Laurent BONZONI, *Le rythme de l'innovation : l'anomalie de l'industrie des circuits intégrés*, Communication et Stratégies DATE, 1991.

Jean-Philippe DAUVIN, *Les semi-conducteurs*, Collection Cyclope, Éditions Economica, Paris, 1992.

Jerry D. HUTCHESON et G. Dan HUTCHESON, *Is Semiconductor Manufacturing Equipment Still Affordable?*, in *Proceedings of the 1993 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, septembre 1993.

SIA 1994 National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, 1994.

Gordon E. MOORE, *Lithography and the Future of Moore's Law*, in *SPIE Proceedings on Electron-Beam, X-Ray, EUV, and Ion Beam Lithographies for Manufacturing*, vol. 2337, février 1995.

Gary STIX, *Toward Point One*, in *Scientific American*, vol. 272, n° 2, pp. 90-95, février 1995.

Donald A. FICKER et Steven BROWN, *Affordability Concerns in Advanced Semiconductor Manufacturing : The Nature of Industrial Linkage*, in *Proceedings of the 1995 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, septembre 1995.

Les circuits nerveux de la locomotion

STEN FILLNER

Des réseaux de neurones spécialisés commandent les mouvements que font les vertébrés pour nager, courir ou voler. Chez la lamproie, ces réseaux sont aujourd'hui connus.

Lorsque nous marchons ou que nous courons, nous envoyons un nombre considérable d'informations. Il décide quelle articulation doit être mise en mouvement, à quel moment elle doit se plier et de quel angle, puis il envoie des signaux dans les nerfs afin d'activer les muscles. Même les créatures les plus simples se déplacent plus habilement que les robots, sur la terre, dans l'air ou dans l'eau.

La physiologie animale reste mal connue, mais on commence à comprendre comment les vertébrés coordonnent, presque sans effort, les mouvements complexes de centaines de muscles. La gestion des déplacements du corps est simplifiée par une remarquable organisation : la responsabilité de la coordination de ces actions est répartie entre plusieurs réseaux de neurones. Parmi ces réseaux spécialisés, certains fonctionnent parfaitement dès la naissance, tel celui qui maintient constamment en activité la respiration ; d'autres, tels ceux qui commandent la marche, la reptation ou la course, se développent plus lentement.

Les réseaux de neurones qui commandent les mouvements rythmiques sont les générateurs centraux de patrons moteurs rythmiques. Ils exécutent à volonté un mouvement régulier, sans imposer d'effort conscient. Les réseaux de neurones fondamentaux que nous utilisons pour respirer, pour mastiquer ou pour avaler sont situés dans notre tronc cérébral, voisin de la partie supérieure de notre moelle épinière. Étrangement, les circuits responsables de la marche et de la course (ainsi que de certains réflexes de protection) ne sont pas

situés dans notre cerveau, mais dans la moelle épinière.

Depuis la fin des années 1980, nos étudiants et moi-même étudions le câblage des neurones qui commandent la locomotion de divers animaux, afin de comprendre les mécanismes complexes du système nerveux humain. Nous avons élaboré un modèle des réseaux de neurones responsables des mouvements d'un vertébré simple : la lamproie.

La moelle épinière émet des signaux

La connaissance de l'organisation du système nerveux central de l'homme doit beaucoup aux études menées sur des animaux. Le rôle de la moelle épinière dans la locomotion a été découvert au début de ce siècle, quand les neurophysiologistes anglais Charles Sherrington et Graham Brown ont observé que des chats privés de leur

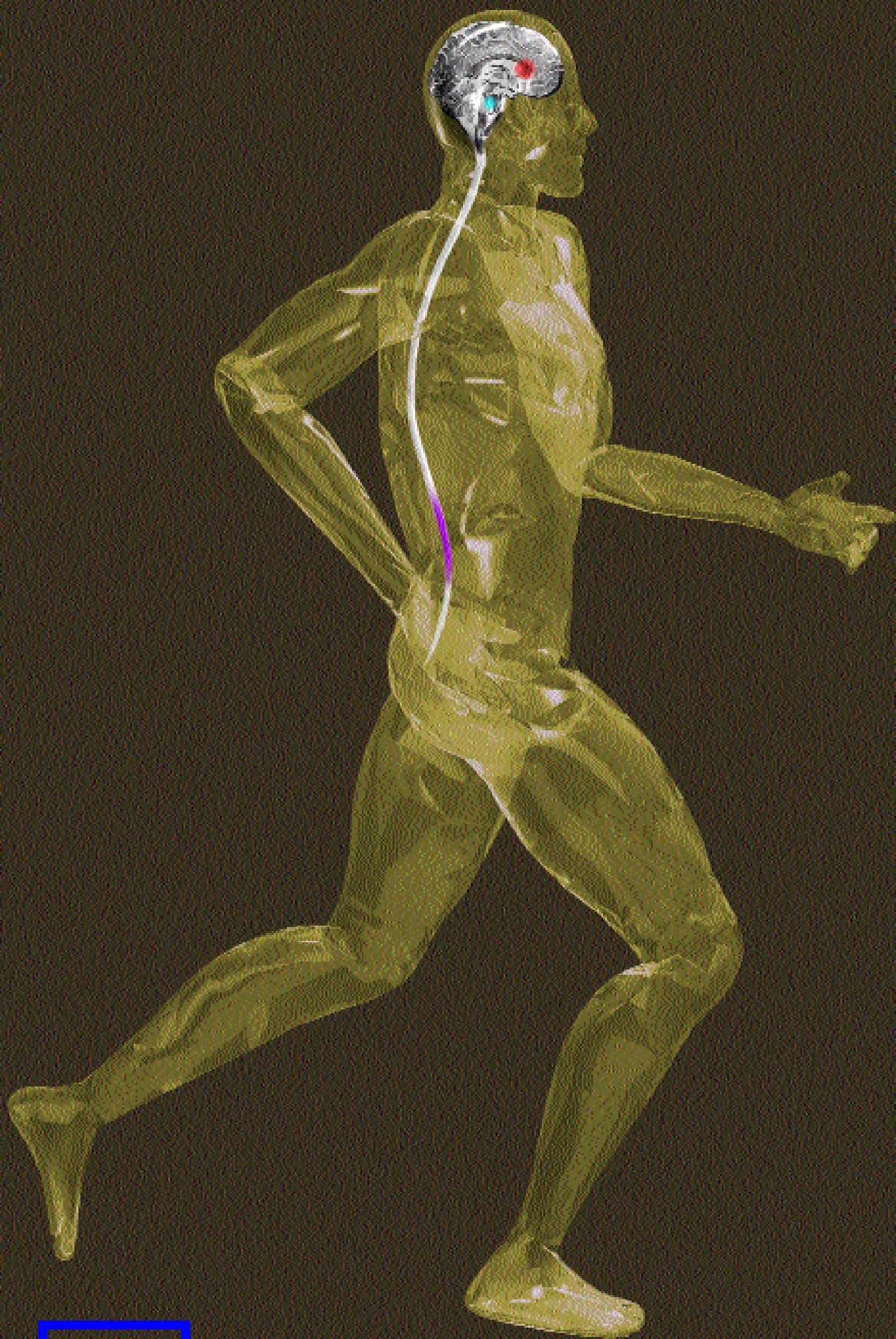
moelle épinière n'étaient plus reliés au cerveau et pouvaient encore produire des mouvements alternés des membres. Bien plus tard, avec mes collègues, nous avons prouvé que ces mouvements correspondaient à ceux qui sont utilisés pour la locomotion : les signaux nerveux fondamentaux pour la locomotion sont émis par la moelle épinière.

Comment le cerveau commande-t-il les circuits et comment sélectionne-t-il celui qui doit être actif à un instant donné ? Dans les années 1960, à l'Académie des sciences de Moscou, Grigori Orlovski et Mark Shik ont observé que l'intensité de la stimulation de régions spécifiques du tronc cérébral d'un chat détermine sa vitesse de déplacement : lorsque cette stimulation augmente, le chat passe d'une marche lente au trot, puis au galop. Un signal simple, provenant d'une petite zone du tronc cérébral, active donc les mouvements complexes de nombreux muscles du tronc et des membres en agissant sur les générateurs de patrons locomoteurs, situés dans la moelle épinière de l'animal.

Cette expérience qui éclairait les interactions du cerveau et de la moelle épinière, expliquait aussi pourquoi des animaux mouraient encore après l'ablation de la moelle épinière.

C'est la même chose chez le poisson : quelques mammifères, tel le rat, marchent, courent et, dans une certaine mesure, gardent leur équilibre après qu'on leur a retiré le cortex frontal ; bien qu'ils se déplacent alors comme des automates, sans éviter les obstacles placés sur leur chemin, ils actionnent les muscles de leurs membres et coordonnent leurs pas.

1. LA LOCOMOTION HUMAINE, comme celle de tous les vertébrés, est coordonnée par le système nerveux central. Dans la partie antérieure du cerveau, des réseaux de neurones spécialisés (en rouge) sélectionnent un des programmes moteurs possibles en activant des parties spécifiques du tronc cérébral (en bleu). Ce dernier déclenche alors les mouvements et commande leur vitesse en excitant des réseaux de neurones situés à l'intérieur de la moelle épinière (en violet). Ces réseaux locaux contiennent toutes les commandes nécessaires pour déclencher ou arrêter aux moments opportuns les contractions musculaires de la locomotion. Des réseaux de neurones du tronc cérébral commandent aussi la respiration, la mastication, la déglutition, des mouvements des yeux, ainsi que d'autres mouvements fréquents.



L'élucidation des circuits nerveux de la locomotion a pris des années. Des groupes de cellules du cerveau antérieur, nommés ganglions de la base, sont reliés (directement ou par l'intermédiaire de cellules-relais) à des neurones

cibles du tronc cérébral ; ces derniers commandent l'exécution de différents programmes moteurs. Au repos, les ganglions de la base inhibent les centres moteurs du cerveau, de sorte qu'aucun mouvement n'est produit. En revanche,

lorsque cette inhibition est supprimée, des mouvements coordonnés apparaissent. Les ganglions de la base contrôlent ainsi les programmes moteurs du système nerveux. Cet état d'inhibition contrôlée est capital : le déclenchement intempestif d'un programme moteur pourrait être désastreux.

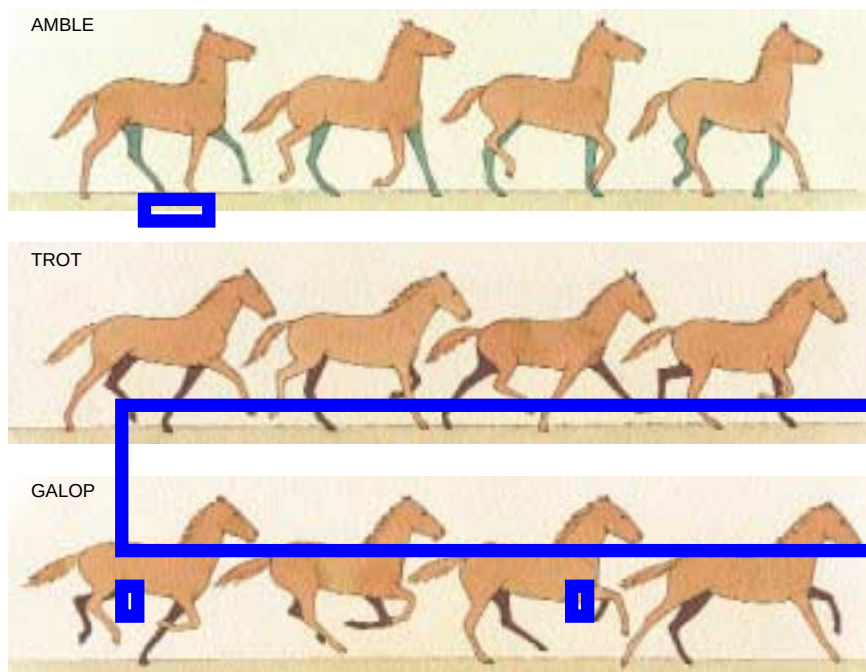
Chez l'homme, certaines maladies des ganglions de la base provoquent des mouvements incontrôlables du visage ou des membres. Cet excès de mouvement est typique de la maladie de Huntington ou les cas de congestion cérébrale. Il est aussi provoqué par quelques traitements médicaux. D'autres maladies des ganglions de la base, telle la maladie de Parkinson, renforcent au contraire l'inhibition : les sujets atteints ont des difficultés à déclencher des mouvements.

La Ferrari et la 2CV

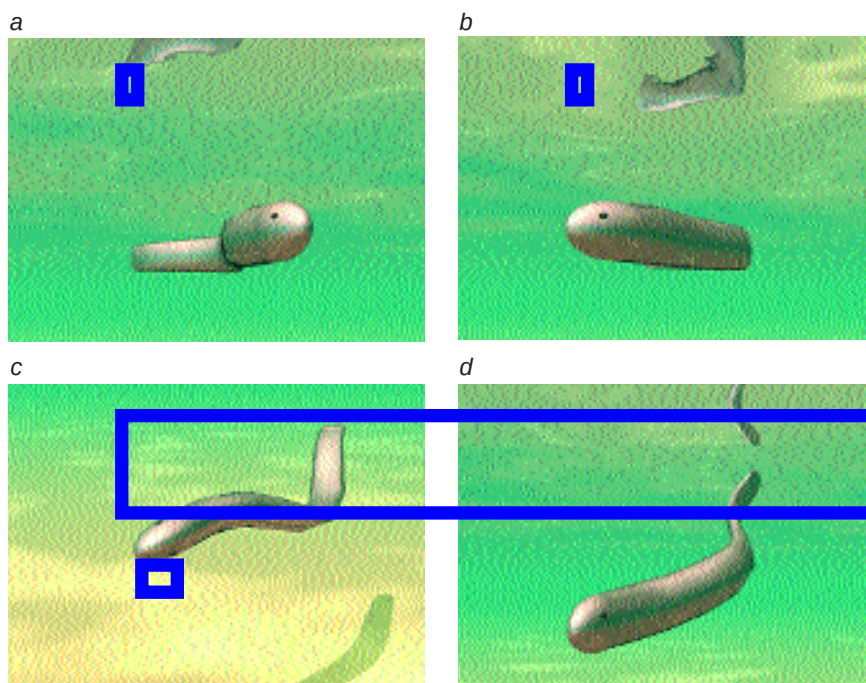
La médecine ne progresse que lentement dans la compréhension de ces maladies. Les thérapies sont donc limitées. Le système nerveux humain contient près de 1 000 milliards de neurones : comment espérer y retrouver les circuits ? Face à cette difficulté, mes collègues et moi-même avons étudié des vertébrés plus simples que l'homme, avec la même organisation de base, mais avec moins d'éléments.

Un extraterrestre qui voudrait comprendre comment fonctionnent les automobiles aurait intérêt à démonter d'abord une 2CV Citroën des années 1950 (s'il peut s'en procurer une...) : un tel véhicule contient tous les organes essentiels d'une voiture (moteur à combustion interne, transmission, freins, etc.), mais est conçu à partir d'une conception simple et disposés de façon que leur révision soit facile. Si l'extraterrestre commençait ses recherches en démontant une Ferrari à moteur turbo, il aurait sans doute plus de difficulté à en comprendre le fonctionnement. Nous avons donc choisi d'étudier le système nerveux.

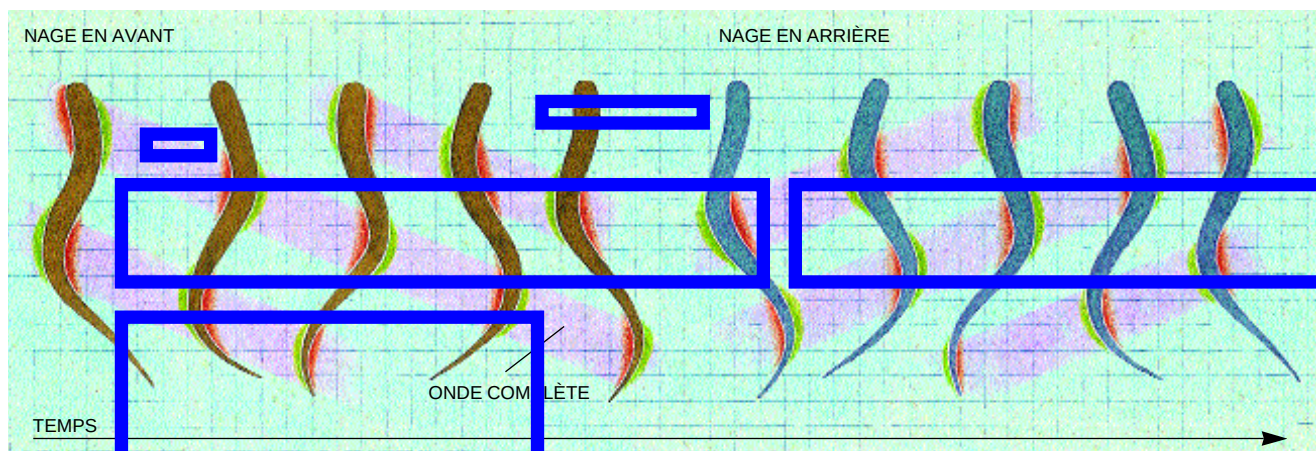
Après quelques études, nous avons choisi d'analyser la lamproie, un poisson de forme allongée. La lamproie est un vertébré primitif dont le système nerveux est composé d'un petit nombre de cellules (un millier seulement dans chaque segment de la moelle épinière). En outre, le sys-



2. DES RÉSEAUX DE NEURONES qui commandent chaque membre interagissent de diverses manières pour produire les différentes allures d'un cheval telles que l'amble, le trot et le galop. À l'amble (*en haut*), le cheval déplace simultanément les membres antérieur et postérieur d'un même côté. Au trot (*au milieu*), les membres opposés diagonalement (avant droit et arrière gauche, ou avant gauche et arrière droit) sont sollicités simultanément. Au galop (*en bas*), les antérieurs, puis les postérieurs, interviennent ensemble.



3. LA SIMULATION PAR ORDINATEUR de la nage d'une lamproie a montré que les modèles neuronaux révélés par les études de neurophysiologie décrivent bien la locomotion de l'animal réel. Ces images synthétiques montrent une lamproie qui nage en ligne droite (a), qui tourne (b), qui se couche sur le côté (c), ou qui plonge (d).



4. LA NAGE ONDULATOIRE de la lamproie, un poisson allongé et fusiforme, est une forme simple de locomotion. En réaction à des signaux émis par le cerveau, des ondes successives de contraction et d'extension musculaire (en rouge et en vert respectivement) se propagent le long

du corps du poisson, de la tête vers la queue, le propulsant ainsi vers l'avant (à gauche). Le cerveau peut aussi commander la propagation d'ondes similaires de la queue vers la tête ; la lamproie nage alors à reculons (à droite).

Le système nerveux central de ce poisson peut être conservé *in vitro* et étudié plusieurs jours après son extraction de l'animal. Dans ces conditions, les réseaux moteurs restent actifs.

Dès le début de nos travaux sur la lamproie, à la fin des années 1970, Peter Wallen et moi-même avons essayé de comprendre les caractéristiques fondamentales de la nage de cet animal. Comme les autres poissons, la lamproie se propulse vers l'avant par une contraction des muscles qui la fait onduler de la tête vers la queue. Pour produire cette onde propulsive, l'animal contracte alternativement les muscles qui incurvent chaque section de sa colonne vertébrale d'un côté, puis de l'autre ; il coordonne aussi les contractions des segments consécutifs, afin que l'onde se propage le long du corps. Les commandes nerveuses responsables de ces deux types de coordination sont réparties le long du corps.

On isole la moelle épinière d'une lamproie et qu'on la coupe en plusieurs morceaux, chacun conserve une activité alternée caractéristique, et les segments voisins d'une même section sont toujours coordonnés.

Le décalage qui sépare l'activation des segments adjacents reste constant pour une onde donnée, mais



5. LA LAMPROIE, *Petromyzon marinus*, qui atteint un mètre de long, est un animal idéal pour l'étude de la locomotion des vertébrés. Comme son système nerveux comprend un petit nombre de cellules, le tronc cérébral (triangle marron) et la moelle épinière (en beige) peuvent être prélevés et conservés en laboratoire (voir la photographie).

il dépend de la vitesse du poisson. Le temps nécessaire pour que l'onde parcoure toute la longueur du corps varie, de trois secondes environ pour une nage lente, à 0,1 seconde pour une nage rapide. Lorsque le poisson nage à reculons, on observe les mêmes contractions caractéristiques.

Nous avons identifié les neurones qui commandent la locomotion et nous avons établi leur schéma de câblage. Pour savoir quelles cellules étaient reliées, nous avons placé une micro-électrode (dont l'extrémité a un diamètre d'environ un micromètre) à l'intérieur d'une cellule du tronc céré-

bral et nous avons simultanément enregistré les réactions de cellules de moelle épinière avec une autre micro-électrode. Cette recherche de paires de cellules nerveuses correspondantes a été extrêmement fastidieuse, mais elle a révélé l'organisation des centres de la locomotion.

De la lamproie à l'homme, des perspectives thérapeutiques ?

Les principes d'organisation des systèmes de commande de l'activité locomotrice sont voisins, chez tous les vertébrés, de ceux décrits par Sten Grillner chez la lamproie. Chez les mammifères quadrupèdes, les réseaux générateurs spinaux de marche, localisés dans les segments cervicaux, thoraciques et lombaires, commandent les contractions des muscles de chacun des membres. L'activité des quatre membres est coordonnée par des neurones qui connectent les quatre générateurs de marche. Le cerveau sélectionne différents programmes locomoteurs (marche, trot, galop) en activant différents circuits du tronc cérébral. Ces circuits activent les générateurs de marche par des fibres nerveuses descendantes qui libèrent des neuromédiateurs : noradrénaline, sérotonine, dopamine.

Chez le rat, une section transverse de la moelle épinière thoracique entraîne des désordres sensoriels et moteurs semblables à ceux de la paraplégie humaine. La station érigée, le mouvement dirigé et les mouvements locomoteurs sont perdus dans les membres postérieurs. Dans la moelle située derrière la lésion, les fibres nerveuses qui proviennent du tronc cérébral dégénèrent. La noradrénaline et la sérotonine ne sont plus détectables sur des coupes histologiques de moelle épinière.

Toutefois, les neurones spinaux de marche fonctionnent de façon autonome s'ils sont excités par des substances pharmacologiques qui reproduisent l'action des neuromédiateurs. Les mouvements locomoteurs obtenus dans ces conditions sont voisins des mouvements de l'animal intact. Ce déclenchement artificiel de la locomotion est possible plusieurs mois après la section de la moelle épinière : les générateurs spinaux de marche restent donc longtemps fonctionnels, mais la dégénérescence des fibres nerveuses réduit leur excitabilité.

À Montpellier, Alain Privat, et ses collègues de l'INSERM, ont greffé des neurones dans la moelle épinière de rats paraplégiques. Ils ont prélevé des neurones nerveux embryonnaires sécrétrices de sérotonine et de noradrénaline chez le fœtus de rat, les ont mises en suspension dans un milieu de survie et ont injecté quelques millimètres cubes de cette suspension dans la moelle épinière. En un mois environ, les neurones embryonnaires s'intègrent dans le tissu nerveux du receveur : ils émettent des axones sur plusieurs segments de moelle et établissent des contacts synaptiques avec les neurones.

Nous étudions la récupération des capacités motrices de ces rats paraplégiques transplantés : les générateurs

spinaux de marche lombaires sont réactivés. La posture de ces animaux est plus propice à la marche que celle des animaux non transplantés, et une légère stimulation tactile déclenche, dans les membres postérieurs, une série de mouvements locomoteurs coordonnés. L'état clinique général des animaux transplantés est bien meilleur que celui des animaux de contrôle, et la fonte musculaire et les changements phénotypiques, importants chez les rats paraplégiques, sont réduits.

La transplantation de neurones guérira-t-elle les paraplégiques humains ? Bernard Russel, de l'Hôpital Raymond Poincaré, à Garches, rapporte le cas d'un patient dont les membres postérieurs furent animés de mouvements rythmiques après un traitement activant les récepteurs de noradrénaline. Cette observation et quelques autres font penser que la moelle épinière lombaire de l'homme contient un générateur spinal de marche, comme chez les autres vertébrés. Plusieurs groupes testent, chez des sujets paraplégiques, l'efficacité de ces injections.

Après des injections, dans le liquide céphalo-rachidien baignant la moelle épinière, de substances qui imitent l'action des neuromédiateurs. Si ces essais sont concluants, on pourra envisager une substitution du traitement pharmacologique par une transplantation, dans la moelle épinière lombaire, de cellules émettrices de noradrénaline ou de sérotonine. Ce procédé présenterait l'avantage de délivrer le neuromédiateur de manière plus régulière et directement sur les cellules cibles.

Aujourd'hui, le clinicien qui veut redonner une autonomie motrice à un paraplégique est confronté à deux difficultés majeures. Il doit assurer une station debout et il doit provoquer le mouvement. Le problème de la station debout est résolu par des appareillages externes qui, placés sur les membres, diminuent leurs degrés de liberté et par l'usage de déambulateurs. Pour le mouvement, la stimulation électrique des muscles ou des nerfs, selon un programme aussi proche que possible de la commande motrice naturelle. L'efficacité de ces méthodes est accrue si des cellules greffées stimulent directement le générateur de marche en émettant des neuromédiateurs. La transplantation pourrait aussi augmenter la résistance des muscles à la fatigue en diminuant leur atrophie. Nous devons mener encore beaucoup d'expérimentations avant de faire marcher des paralytiques.

Didier ORSAL
CNRS, Laboratoire de physiologie
et biologie de la motricité

Nous avons notamment observé que les cellules nerveuses du tronc cérébral communiquent par de longs prolongements, les axones, avec les neurones de la moelle épinière qui participent à la commande de la locomotion. En réaction à des signaux provenant du cerveau, des réseaux locaux de cellules, dans chaque segment de la moelle, produisent des bouffées d'activité nerveuse. Ces réseaux agissent comme des interrupteurs pilotés : dans un segment donné du corps de la lamproie, ils excitent les neurones situés sur l'un des côtés, tandis qu'ils inhibent les neurones du côté opposé. D'autres cellules nerveuses spécialisées, les neurones moteurs, relient les nerfs de la moelle épinière aux fibres musculaires qui font bouger la lamproie.

Des réseaux polyvalents

Ces réseaux de neurones de la moelle épinière ne sont pas que des relais du cerveau.

L'ordre de nager, la coordination des mouvements musculaires est confiée aux réseaux locaux, qui traitent aussi les informations sensorielles qui leur parviennent et ajustent leur comportement en conséquence. Ils réagissent notamment aux neurones récepteurs de tension, qui perçoivent la courbure de la colonne vertébrale de la lamproie.

Lorsqu'un côté du corps est contracté et que l'autre est étiré, les récepteurs de tension qui sont excités du côté étiré prennent

excitent les neurones moteurs du côté étiré, afin de contracter les muscles de ce côté, et ils inhibent les neurones du côté opposé, afin de faire cesser la contraction. Ces signaux et d'autres mécanismes cellulaires complexes entretiennent les mouvements oscillatoires fondamentaux du système neuromusculaire de la lamproie.

En poursuivant l'examen des neurones de la moelle épinière de la lamproie, nous avons établi que certains des réseaux de neurones locaux se prolongent, par des axones, dans la moelle épinière. Dans chaque segment, des cellules spécifiques d'inhibition envoient des signaux, par ces axones, vers la queue de l'animal, sur au moins un cinquième de la longueur de la colonne vertébrale. D'autres cellules, dites d'excitation, ont des axones plus courts, mais dirigés dans les deux directions : par elles, l'activité en un point

de la moelle épinière se répercute dans les régions adjacentes.

Comment les signaux échangés par les segments déclenchent-ils le mouvement oscillatoire ? Nous avons supposé que les signaux nerveux entraînent l'oscillation du segment le plus proche de la tête de la lamproie à un rythme trop rapide pour que cette oscillation se propage par inertie le long de la colonne vertébrale.

En fait, le deuxième segment suivrait les mouvements rapides du premier, mais avec un léger décalage ; le troisième segment suivrait le deuxième avec un mouvement légèrement retardé, et ainsi de suite tout le long de la colonne vertébrale. Les retards croissants seraient responsables de l'onde uniforme observée.

Malgré le schéma nerveux et une foule d'autres informations sur les divers types de cellules du système nerveux de la lamproie, nous avons difficilement trouvé une prévision qui permettrait de tester notre hypothèse. Aussi, afin de vérifier si notre description des neurones et de leurs interactions expliquaient vraiment comment la lamproie nage, nous avons simulé

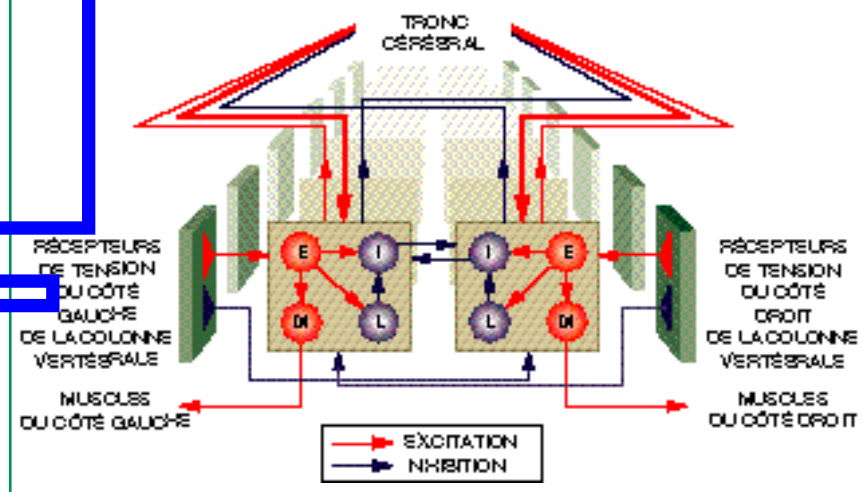
avons d'abord écrit des programmes qui reproduisent le comportement des différents neurones utilisés pour la locomotion. Puis nous avons fait interagir ces cellules en testant plusieurs mécanismes. Nous avons finalement trouvé un modèle informatique qui reproduit des patrons de commandes nerveuses similaires à ceux que nous

Traitement parallèle

Chaque segment de la moelle épinière de la lamproie contient un réseau de neurones. Des groupes de neurones (*carrés marron de face*) sur les côtés gauche et droit de la colonne, sont excités par des signaux émis par le tronc cérébral de l'animal. À l'intérieur de ces groupes, des neurones spécialisés (*disques de couleur*) réagissent en émettant vers les cellules voisines des signaux excitateurs (*en rouge*) ou inhibiteurs (*en violet*). Des neurones excitateurs (*E*), situés d'un côté du segment de moelle épinière, activent des neurones moteurs (*M*) qui contractent les muscles de ce côté. Ces neurones excitateurs réagissent aussi sur des neurones inhibiteurs (*I*) qui réduisent l'excitation du groupe de neurones situés du côté opposé et relâchent les muscles.

L'excitation, qui contracte un côté de l'animal, s'achève de différentes manières. Des neurones récepteurs de tension (*triangles violets*), situés de l'autre côté de la moelle épinière, émettent des signaux qui inhibent la contraction. Simultanément, d'autres récepteurs de tension (*triangles rouges*) excitent les neurones situés du côté de l'extension et commandent la contraction. En outre, de gros neurones inhibiteurs (*L*) situés du côté de la contraction peuvent, sur commande du tronc cérébral, inhiber les cellules *I* : le côté opposé devient actif et renvoie des signaux inhibiteurs.

Bien que ces circuits locaux de la moelle épinière puissent agir de façon autonome, ils renvoient généralement au cerveau des informations sur leur activité. Ces signaux sont combinés avec d'autres types de données sensorielles, telles que des indications visuelles ou des informations provenant du centre de l'équilibre situé dans l'oreille interne, pour modifier les mouvements de l'animal.



observons dans les situations de locomotion réelle : nous pensons que les circuits que nous avons décrits représentent les éléments essentiels de l'appareil locomoteur de la lamproie.

Nos simulations ont retrouvé les commandes nerveuses des contractions alternées, d'un côté et de l'autre, de la colonne vertébrale, et elles ont précisé nos premières idées sur le délai d'activation des segments successifs de la moelle. Ce délai provient des neurones qui s'étendent le long de la colonne vertébrale et qui inhibent les segments dans la direction de la queue. Les segments proches de la tête, les plus excitables, sont activés avant les autres. L'activation des segments de la moelle l'un après l'autre, tout le long du corps de l'animal, est ainsi retardée de la tête vers la queue. Ce comportement est réversible : lorsque l'excitabilité est plus forte vers la queue, la lamproie nage à reculons. Malgré son câblage préexistant, le réseau spinal possède donc un degré de flexibilité considérable. Des travaux plus récents, de modélisation complète de la lamproie, prennent en compte les propriétés contractiles des fibres musculaires et la viscosité de l'eau : ils montrent que les réseaux décrits suffisent pour que la lamproie nage.

La lamproie est le plus simple des animaux à partir de la lignée principale des vertébrés, il y a environ 450 millions d'années, alors que les vertébrés n'avaient pas encore de membres. Les mécanismes de locomotion se retrouvent-ils chez les vertébrés plus évolués ?

À l'Université de Bristol, Alan Roberts a étudié les mécanismes cellulaires de la locomotion chez un autre

vertébré, le poisson zèbre. Les systèmes nerveux analogues à ceux de la lamproie. L'organisation neuronale d'autres vertébrés, des poissons aux primates, ressemble à celle que nous avons identifiée : des régions particulières du tronc cérébral commandent les mouvements, et la moelle épinière traite les signaux correspondants à l'aide de réseaux de neurones spécialisés.

Les mécanismes cellulaires utilisés pour la locomotion de ces autres animaux restent toutefois mal connus. Des générateurs de patrons locomoteurs ont été identifiés, et certains de leurs composants. Mais nous ne connaissons encore rien de connaître leur organisation interne. De nouvelles techniques d'isolement de la moelle épinière chez d'autres classes de vertébrés (mammifères, oiseaux et reptiles) sont toutefois apparues ces dernières années : bientôt, sans doute, nous comprendrons comment ces animaux marchent, courent ou volent.

Comme les premiers vertébrés se déplacent par une nage ondulatoire, les réseaux de neurones qui ont évolué pour la commande des nageoires, des pattes ou des ailes ne devraient pas différer beaucoup de ceux que nous avons décrits pour la lamproie. L'évolution a donc peu modifié et amélioré ce qui existe déjà. Nous serions surpris que les systèmes de commande

rent beaucoup de ceux de la lamproie. Pour soigner des lésions de la moelle épinière, on pourrait rechercher et activer chez les malades des générateurs de patrons locomoteurs rendus silencieux. Quel progrès est peut-être plus proche qu'on ne le pense : une Ferrari à moteur turbo n'est jamais qu'une voiture un peu perfectionnée.

Sten GRILLNER dirige l'Institut Nobel de neurophysiologie, à Karolinska.

S. GRILLNER, *Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates*, in *Science*, vol. 228, pp. 143-149, 12 avril 1985.

Jean-Pierre GASC, *Les déplacements des vertébrés*, in *Pour la Science*, juillet 1989.

Ian STEWART, *Les règles de la locomotion*, in *Pour la Science*, juin 1994.

La marche humaine et sa pathologie, sous la direction de Jacques Péliissier et Vincent Brun, éditions Masson, 1994.

Sabine RENOUS, *Locomotion*, Éditions Dunod, 1994.

Daniel RICHARD et Didier ORSAL, *Neurophysiologie*, Tome 2 : *Motricité et grandes fonctions du système nerveux central*, éditions Nathan, 1994.

Ö. EKEBERG, A. LANSNER et S. GRILLNER, *The Neural Control of Fish Swimming Studied through Numerical Simulations*, in *Adaptive Behavior*, vol. 3, n° 4, pp. 363-394, printemps 1995.

S. GRILLNER, I. BELIAGINA, Ö. EKEBERG, A. EL MANIRA, R.H. HILL, A. LANSNER, G.N. ORLOVSKI et P. WALLÉN, *Neural Networks That Co-ordinate Locomotion and Body Orientation in Lamprey*, in *Trends in Neuroscience*, vol. 18, n° 6, pp. 270-279, juin 1995.

L'assainissement du Rhin

KARL-GEERT MALLE

Les pays européens qui se partagent le Rhin s'efforcent, ensemble, de nettoyer cette ressource économique et écologique vitale.

Dans les années 1960 et au début des années 1970, en plein redéploiement économique, l'Europe a vu la pollution organique et inorganique du Rhin atteindre des niveaux assez élevés pour décimer des dizaines d'espèces de poissons ou d'autres animaux qui vivaient dans le fleuve depuis des milliers d'années. La majeure partie du fleuve devint impropre à la baignade, et la production d'eau potable fut menacée.

Il fallut dix ans pour que les mesures prises par les pays riverains parviennent à nettoyer les segments de plus en plus longs du fleuve, de sorte que, s'il reste encore beaucoup à faire, ce travail apparaît aujourd'hui comme une remarquable coopération internationale de contrôle de la pollution. L'assainissement du Rhin est un modèle que l'on cherche à appliquer à d'autres pollutions échappant aux cadres nationaux.

Aujourd'hui les travaux d'assainissement ont redonné vie à l'une des plus belles rivières du monde. D'innombrables poètes et écrivains ont chanté ce fleuve fabuleux, qui baigne cinq pays avant de se déverser dans la mer du Nord, aux Pays-Bas. Né dans les Alpes suisses, le Rhin coule vers le Nord et vers l'Ouest sur 1 320 kilomètres, à travers des montagnes escarpées, le lac de Constance, les vallées alsaciennes, les villes de Strasbourg, de Bonn, de Dusseldorf et de Rotterdam. La Volga et le Danube sont plus longs et plus puissants que le Rhin, mais leur débit est moins régulier et leur importance économique est inférieure.

Le bassin versant des eaux du Rhin couvre 190 000 kilomètres carrés, où vivent 50 millions de personnes. Plus

de huit millions d'entre elles tirent leur eau potable du fleuve, tandis que le lac de Constance en alimente 2 millions de personnes. En tout, 20 pour cent de l'eau du Rhin est détournée et utilisée, soit pour la consommation humaine, soit pour des usages industriels. En outre, des usines hydroélectriques construites après la Première Guerre mondiale sur le territoire français, fournissent 8,7 millions de mégawattheures par an.

Le fleuve est navigable sur 800 kilomètres, de la mer du Nord jusqu'aux chutes d'eau de Schaffhouse, en aval du lac de Constance. Chaque jour, plus de 500 péniches y transportent des carburants, des dérivés du pétrole, du sel, des phosphates, du charbon, du gravier, des automobiles, etc. ; chaque année, 150 millions de tonnes de biens sont ainsi transportées sur le Rhin.

L'une des principales raisons de l'importance du Rhin est la régularité de son débit. En hiver et au printemps, le fleuve est alimenté par les précipitations en plaine et dans les parties les plus hautes du bassin versant ; en été, la fonte des neiges alpines prend le relais. Les suisses font office de réservoirs. Entre 1925 et 1992, le débit moyen du fleuve a été de 2 350 mètres cubes par seconde, contre 2,1 seulement entre le débit annuel maximal (3 170 mètres cubes par seconde en 1966) et le débit annuel minimal (1 510 mètres cubes par seconde en 1972).

Avant la fin de la Seconde Guerre mondiale, le Rhin était quasi dépourvu d'usines d'épuration. Seules les principales villes déversaient directement



1. L'INDUSTRIE ET L'AGRICULTURE ont beaucoup pollué le Rhin, mais des réglementations industrielles plus contraignantes, des efforts individuels des riverains et des subventions accordées aux fermiers qui limitent l'utilisation de certains produits chimiques ont récemment réduit l'impact des activités économiques sur le fleuve.

leurs eaux sales et malodorantes dans le fleuve. En 1963, quand l'économie de l'Europe centrale se rétablit, qu'il fallut réagir. En 1963, la France, l'Allemagne, le Luxembourg, les Pays-Bas et la Suisse créèrent une «Commission internationale contre la pollution du Rhin», afin de coordonner les efforts et de limiter la contamination du fleuve.

Cette commission surveille aujourd'hui la qualité de l'eau en plusieurs

points, situés principalement aux frontières. Le point de contrôle le plus important est situé entre l'Allemagne et les Pays-Bas.

En aval du bassin industriel de la Ruhr : ainsi nommée d'après un petit affluent du Rhin, cette zone d'activités houillères, sidérurgiques et chimiques est l'une des sources majeures de pollution. En outre, après son entrée aux Pays-Bas, le fleuve traverse une région assez rurale, sans sources de pollution importantes, jusqu'au moment où il

rejoint les grands ports hollandais de Rotterdam et d'Amsterdam. Là, le régime des eaux change considérablement :

la France et l'Allemagne en sept ou huit jours, les eaux du Rhin séjournent 70 à 80 jours aux Pays-Bas, en raison du système complexe de digues, de canaux et d'équipements fluviaux (tels les deux grands lacs artificiels que sont l'IJsselmer et le Haringvliet). Très peu de temps après son entrée aux Pays-Bas, le Rhin forme un delta com-



La vallée du Rhin

2. LE RHIN parcourt 1 320 kilomètres, de sa source, dans les Alpes suisses, jusqu'au port de Rotterdam, en mer du Nord. En chemin, il traverse le lac de Constance, puis la France et l'Allemagne. Les positions respectives de certaines sources majeures de pollution ainsi que quelques repères géographiques sont indiqués sur cette carte.

portant trois estuaires distincts : le Waal, le Lek et l'IJssel.

La Commission internationale pour la protection du Rhin publie chaque année un rapport comprenant des données analytiques, revues et confirmées par chacun des pays membres de la commission, mais elle sert surtout à proposer et à appliquer des mesures pour améliorer la qualité des eaux du fleuve. Deux projets importants, signés en 1976, sont la Convention pour la protection du Rhin contre la pollution chimique et la Convention pour la protection du Rhin contre la pollution par les chlorures. Une autre convention, qui devait traiter la pollution thermique, a été préparée, mais n'a jamais été ratifiée par l'ensemble des États membres. Bien que le Rhin se réchauffe progressivement, l'effet (1,8 °C depuis 1925) n'a pas été jugé suffisant pour mériter une action internationale.

Les polluants inorganiques

Les rivières renferment bien plus de sels inorganiques que de substances organiques. Certains d'entre eux

viennent du sol : ils sont dissous par les pluies, avant d'être entraînés jusqu'au fleuve. Toutefois les eaux des égouts, les rejets industriels et les eaux de ruissellement qui proviennent des terres cultivées ont considérablement augmenté leurs concentrations. En 1992, la concentration en sels (chlorures, carbonates, sodium, calcium, etc.) attei-

gnait 531 milligrammes par litre à la frontière germano-hollandaise ; elle n'a pas changé notablement au cours des deux dernières décennies. Comme l'éli-

mination est coûteuse quand ils sont dilués, on ne dessale l'eau qu'en cas de besoin particulier, par exemple avant son utilisation pour l'irrigation.

Les activités humaines libèrent surtout des ions chlorure. Les analyses effectuées en 1992 indiquent que 311 kilogrammes d'ions chlorure entrent chaque seconde dans le Rhin, à com-

parer aux 15 175 kilogrammes d'origine naturelle. Les plus importantes sources de chlorures sont les mines alsaciennes de potasse qui, à elles seules, libèrent 130 kilogrammes d'ions chlorure par seconde.

Le chlorure de sodium (le sel de table) est un sous-produit indésiré



RUSSIE

INDUSTRIE

de cette exploitation minière ; il est entassé sur terre en de gigantesques terrils, ou dissous et transporté jusqu'à la mer par le Rhin. Durant des décennies le déversement du sel dans le fleuve exaspéré les horticulteurs hollandais, qui utilisent le Rhin pour irriguer leurs orchidées, leurs glaïeuls et d'autres fleurs qui supportent mal les ions chlorure. La Convention de 1976 sur les chlorures stipulait que la France devait stocker une partie des sels sur son territoire, le surcoût de ce stockage étant partagé avec l'Allemagne et avec les Pays-Bas. Toutefois les Alsaciens s'op-

posèrent à cette disposition, et le Parlement hollandais refusa de payer. Mais on n'a été obtenu qu'en 1991 : il impose un contrôle des rejets miniers, de sorte que la concentration en ion chlorure ne dépasse pas 200 milligrammes par litre d'eau. En pratique, les mines doivent interrompre leurs rejets pendant quelques jours, à deux ou trois reprises par an. Les cultivateurs hollandais ne sont pas enchantés de cette solution, mais le problème a peu de chance d'être résolu avant l'épuisement des mines de potasse, d'ici 10 ou 20 ans.

Aussi gênants soient-ils, les ions chlorure ne sont pas parmi les polluants qui gênent le plus les Pays-Bas. L'azote et le phosphore, qui proviennent surtout des eaux des égouts, favorisent la prolifération des algues et stimulent artificiellement la chaîne alimentaire. Ce phénomène d'eutrophication est très fréquent aux Pays-Bas, où les eaux sont lentes et où les algues forment parfois des masses épaisses qui entravent la navigation et bouchent les pompes. En outre, quand les algues meurent en automne, leur décomposition absorbe l'oxygène de l'eau, asphyxiant les poissons et les autres organismes aquatiques.

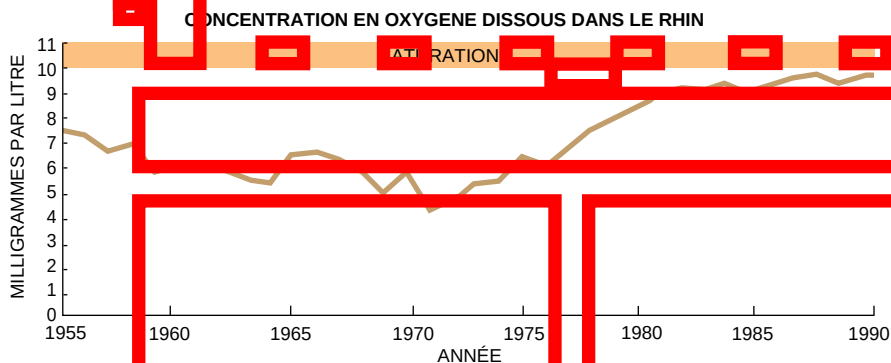
Le traitement des eaux usées, qui réduit notablement les quantités d'azote et de phosphore rejetés, s'est généralisé à partir de la constitution de la Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance, en 1959. Depuis le début des années 1970, le traitement des eaux usées et l'utilisation de détergents sans phosphore ont considérablement réduit la quantité de phosphore dans le fleuve. En 1992, la concentration moyenne en phosphore mesurée à la frontière germano-hollandaise atteignait 0,21 milligramme par litre ; elle était inférieure aux concentrations des années précédentes, mais restait dix fois supérieure à la concentration mesurée dans le lac de Constance.

Pour des raisons assez complexes, la concentration en azote, elle, n'a pas beaucoup diminué. Dans le fleuve, l'azote est principalement présent sous forme d'ions ammonium (NH_4^+) et de nitrates (NO_3^-). Au cours des 20 dernières années, le traitement des eaux usées a ramené la concentration en ions ammonium à environ 0,27 milligramme d'azote par litre, mais la concentration en nitrates, en 1992, elle atteignait 3,8 milligrammes d'azote par litre. La plupart des nitrates semblent provenir des engrais utilisés dans les cultures voisines du fleuve. Diverses mesures devraient lutter contre l'accroissement de la concentration en nitrates. L'Union européenne, par exemple, octroie des primes aux agriculteurs

LAC DE CONSTANCE

CHUTES DE SCHAFFHOUSE

ALPES



3. LA CONCENTRATION EN OXYGENE fut minimale, dans le Rhin, au cours de l'été 1970 : dans certaines parties du fleuve, elle devint trop faible pour assurer la survie de beaucoup de créatures.

qui mettent des terres en jachère. L'Allemagne, d'autre part, subventionne les fermiers qui évitent d'utiliser des engrais dans les zones proches du fleuve et qui réduisent globalement leur usage.

Les métaux lourds sont d'autres polluants inorganiques qui ont des effets importants sur les organismes vivants. À l'état de traces, ces métaux sont essentiels à la vie, mais à des concentrations supérieures, ils causent des troubles nerveux, et perturbent la croissance et le métabolisme des animaux et des végétaux. Le mer-

cure, le cadmium, le cuivre et une partie du chrome, rejetés principalement par les usines métallurgiques et chimiques, sont facilement identifiables et, par suite, contrôlés. En revanche, le plomb, le zinc et le reste du chrome arrivent dans le fleuve par les eaux résiduaires ; on limite plus difficilement leur arrivée dans le Rhin, parce qu'ils proviennent de la corrosion de canalisations et d'équipements domestiques ou industriels. Les métaux lourds ont été réduits par l'élimination du plomb de la plupart des carburants, et les infimes traces d'or présentes dans le fleuve ne sont pas dangereuses (au début du XIX^e siècle, un grand nombre d'orpailleurs lavaient le gravier à la batée sur les rives du cours supérieur du Rhin, entre la frontière suisse et la ville allemande de Worms).

Au total, la quantité de ces métaux dans le Rhin a diminué de 60 à 80 pour cent depuis les années 1970 : les stations d'épuration ont contribué à cet assainissement en piégeant de grandes proportions de métaux dans leurs boues résiduaires, et des programmes mis en place dans les décharges industrielles récupèrent sélectivement les métaux en vue de leur réutilisation dans les rejets industriels.

Aujourd'hui les métaux présents dans les eaux du Rhin ne menacent plus les riverains ni la vie aquatique, mais les sédiments accumulés dans certaines parties du lit du fleuve et de ses affluents contiennent des

concentrations métalliques assez élevées. La pollution par les métaux reste notamment problématique dans le port de Rotterdam, où des dragages ont ramené en surface des sédiments chargés de métaux, qui se sont redéposés en aval. Des négociations entre les autorités portuaires et certaines industries chimiques et métallurgiques

situées en amont ont conduit à des accords pour réduire encore les rejets de métaux.

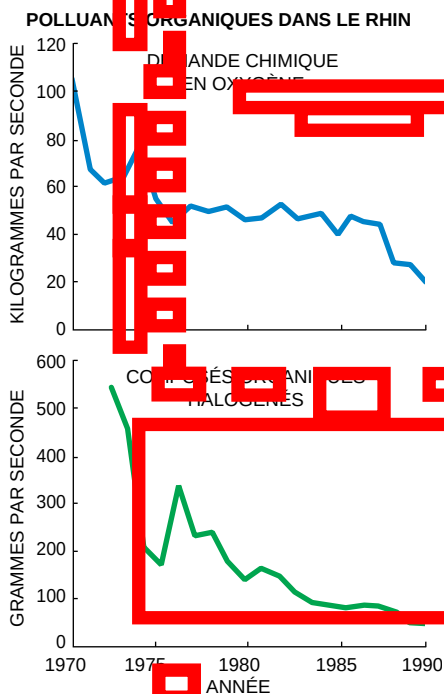
Les menaces organiques

Si les limitations des rejets de composés inorganiques sont utiles, l'effort doit surtout porter sur la pollution par les composés organiques. Bien que ces substances représentent généralement moins de un pour cent de la pollution d'une rivière, elles captent l'oxygène dissout dans l'eau et rendent celle-ci impropre à la vie.

Entre 1969 et 1976, les pollutions organiques ont été fréquentes dans le Rhin, réduisant souvent la concentration en oxygène dissout à moins de deux milligrammes par litre, durant les mois d'été, dans certaines parties du fleuve. À de telles concentrations, de nombreux organismes aquatiques meurent. L'Allemagne ayant dépensé 250 milliards de francs dans des usines de traitement qui éliminent 90 pour cent des polluants organiques, la concentration en oxygène dissout est revenue à des valeurs plus saines de neuf à dix milligrammes par litre (soit 90 pour cent de la concentration d'équilibre dans l'eau pure).

Le contrôle des polluants organiques est beaucoup plus difficile que celui des composés inorganiques. Alors que le nombre de ces derniers est de quelques dizaines, dans les cours d'eau pollués celui des composés organiques naturels et artificiels est de plusieurs milliers. Comme on ne peut isoler et analyser chacun d'eux, les chimistes considèrent des groupes de composés, qu'ils dosent par des méthodes variées. On peut notamment rechercher les effets ou les caractéristiques de ces polluants dans l'eau. On peut aussi déterminer les concentrations de familles de composés. Associées, ces deux techniques donnent des estimations précieuses sur l'état organique d'un échantillon d'eau et peuvent être complétées, selon les besoins, par des dosages plus précis.

Une mesure classique de l'effet biologique des composés organiques est la demande biologique en oxygène, mesurée généralement sur une période de cinq jours (notée DBO₅) : après avoir ajouté des bactéries et des éléments nutritifs à un échantillon d'eau, on dose l'oxygène dissout. Dans la mesure de



4. L'OXYGENE absorbé par l'oxydation des polluants organiques (représenté par la demande chimique en oxygène) a diminué spectaculairement depuis 1970 (en haut). De même, les mesures prises par les États riverains ont permis une nette réduction de la concentration (en bas) en composés organiques halogénés (surtout chlorés).

la «demande chimique en oxygène» (DCO), on ajoute de l'acide sulfurique concentré et du chrome à l'eau analysée, afin d'établir la consommation maximale possible d'oxygène par l'échantillon. En 1992, à la frontière germano-hollandaise, la DBO₅ était de trois milligrammes par litre, et la DCO de dix milligrammes par litre.

Les substances organiques sont habituellement groupées en quatre grandes catégories : les halogènes organiques adsorbables (qui comprennent principalement des composés chlorés), les détergents, les hydrocarbures et les acides humiques. Même quand ils sont présents dans de grandes molécules, le chlore et les autres halogènes (le brome, l'iode ou le fluor) sont particulièrement gênants, parce qu'ils sont toxiques et persistants. Les composés chlorés proviennent de plusieurs sources, notamment de l'industrie papetière, qui blanchit au chlore la cellulose brute. Toutefois la plupart des papiers sont converties à de nouveaux procédés de blanchiment, où l'utilisation de chlore est réduite. Le chlore pénètre aussi dans la rivière sous forme d'insecticides tels que le DDT (le dichlorodiphényltrichloroéthane), l'hexachlorocyclohexane, l'hexachlorobenzène, etc. Ces produits ont été présents dans le fleuve. En 1973, 25 pour cent de la pollution organique était due aux acides humiques. Plus récemment, cette proportion a augmenté, parce qu'elle est difficile à déterminer avec exactitude, faute de méthodes d'analyse précises. Les acides humiques sont toutefois jugés inoffensifs, car ils sont produits naturellement à un stade précoce de l'oxydation des matières organiques.

La recherche de détergents plus biodégradables contribue également à réduire la pollution par les composés organiques. Depuis 1964, les pays européens ont des réglementations de plus en plus strictes, imposant des biodégradabilités des détergents de plus en plus importantes, ce qui a permis de ramener les concentrations en tensioactifs anioniques (les molécules qui assurent la formation des «mousses») à Düsseldorf, de 650 grammes par seconde en 1964 à 60 grammes par seconde en 1987 ; en 1992, la concentration en tensioactifs anioniques, à la frontière germano-hollandaise, était supérieure à 0,05 milligramme par litre.

Les hydrocarbures sont plus biodégradables que les composés halo-

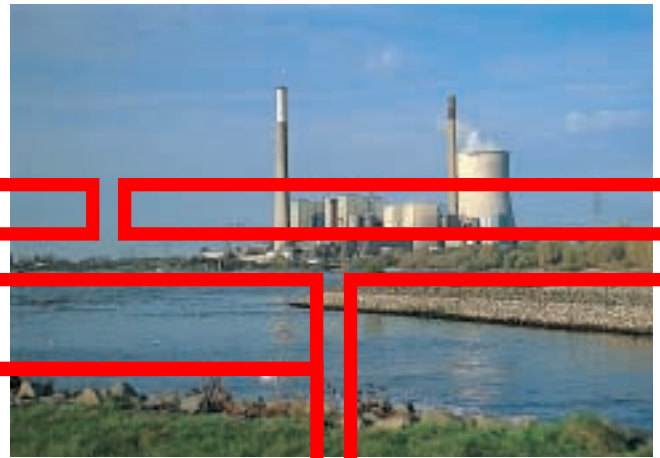
génés. Les produits pétroliers comme l'essence et le kérosène représentent environ 20 pour cent de tout le trafic marchand à travers la frontière hollandaise. En outre, les milliers de bateaux qui parcourent le Rhin chaque année utilisent, pour remplir leur fond, des centaines de milliers de mètres cubes d'un mélange d'huile et d'eau qui, pour la plus grande part, est fourni et récupéré par des bateaux approvisionneurs. Les mesures prises pour limiter les rejets d'hydrocarbures permettent de maintenir la concentration de ces composés à 0,01 milligramme par litre, à la frontière germano-hollandaise.

La quatrième famille de substances organiques – les acides humiques – sont les produits à court terme de la biodégradation. Qu'elle soit mise en œuvre dans les stations d'épuration ou qu'elle ait naturellement lieu dans le fleuve, la biodégradation est un processus inachevé ; seule une partie des substances organiques consommées par les bactéries est totalement métabolisée et rejetée sous forme de gaz carbonique ; le reste est seulement partiellement oxydé et transformé en acides humiques. Ces derniers sont produits par les stations d'épuration, mais ils ont toujours été présents dans le fleuve. En 1973, 25 pour cent de la pollution organique était due aux acides humiques. Plus récemment, cette proportion a augmenté, parce qu'elle est difficile à déterminer avec exactitude, faute de méthodes d'analyse précises. Les acides humiques sont toutefois jugés inoffensifs, car ils sont produits naturellement à un stade précoce de l'oxydation des matières organiques.

Un accident fondateur

Quel que soit le soin apporté au contrôle des rejets, le Rhin, comme toute voie d'eau utilisée pour le transport de marchandises, peut être accidentellement pollué. Jadis le fleuve était si pollué qu'on ne pouvait même remarquer à peine, mais aujourd'hui des systèmes de surveillance les détectent facilement ; cette détection permet des réactions rapides, qui limitent les dégâts.

Quelques incidents désolants ont eu pour conséquence utile de déclencher la création de ce système de contrôle. L'un des pires eut lieu le



5. UNE ÉCUME MALSAINE et des poissons morts apparaissaient encore souvent sur le Rhin, en 1980 (à gauche). Aujourd'hui la même région du fleuve, ici au pied de l'usine de production d'électricité de Voerde, dans le bassin industriel de la Ruhr, est bien plus propre.

2 novembre 1986, lorsqu'un entrepôt de pesticides de la Société Sandoz prit feu à Schweizerhalle, près de Bâle. L'eau pulvérisée sur le feu entraîna les produits chimiques dans la rivière, où l'un d'eux, le Disulfoton, empoisonna même les anguilles, qui sont des animaux résistants.

Ce désastre suscita des efforts sans précédent pour suivre le rétablissement du Rhin d'un point de vue biologique. Durant le projet, des biologistes utilisèrent des cloches de plongée pour étudier systématiquement les poissons, les macro-invertébrés et les autres occupants du fleuve : on découvrit ainsi que la faune du fleuve s'était complètement rétablie dès le mois d'octobre 1988, soit moins de deux ans après l'incendie.

Les études ont montré la présence de 155 espèces de macro-invertébrés, qui se regroupaient près des rives, entre Bâle et Düsseldorf. Les espèces les plus courantes étaient les éponges d'eau douce, les sangsues, les moules d'eau douce, les amphipodes benthiques (de petits crustacés), les éphémères, les phrygane et leurs larves, et des larves de chironomes (ou vers de vase). Certaines espèces comme l'éphémère *Ephron viridis* et l'escargot *Theodosius fluviatilis*, qui semblaient avoir disparu du Rhin, ont été trouvées en grand nombre.

Les espèces qui étaient autrefois communes, comme la moule *Spaerium soanum* ou la mouche *Euleuctea geniculata*, étaient représentées par quelques individus et commencent seulement aujourd'hui à réapparaître en plus grand nombre. En revanche, l'amphipode *Corophium curvispinum*, qui vient de la mer Caspienne et de la mer Noire, s'est récemment établi dans

le Rhin et y prolifère au point qu'il chasse certaines espèces d'éponges et de mollusques.

Certains poissons, également, réintègrent le fleuve : une étude récente a répertorié 40 des 47 espèces endémiques connues pour peupler le Rhin. Environ 75 pour cent des poissons identifiés individuellement étaient des espèces communes, tels le gardon, la brème et la brême. Les zoologistes ont également noté la présence de carpes, de perches, d'anguilles, de brochets, de chevannes et de vandoises (ou dards) et ils ont recensé 15 espèces qui avaient été introduites dans la rivière, notamment la perche-brochet, la truite arc-en-ciel et la môle. En 1992, pour la première fois depuis des décennies, des saumons ont été capturés. Leur maturité sexuelle ont été pris dans le Rhin. Ils avaient été lâchés, encore immatures (au stade de tacons), dans les affluents du fleuve un ou deux ans auparavant, et avaient survécu à leur migration dans la mer du Nord. Même l'esurgeon, qu'on pensait disparu du Rhin depuis 40 ans, y a été vu occasionnellement.

L'étude du fleuve n'est pas le seul héritage de l'incendie de Bâle. Les États riverains ont lancé un Programme commun d'assainissement à quatre objectifs : la préservation de l'eau existant, la réduction des rejets, la réintroduction des poissons supérieurs (tels les saumons ou les truites de mer), la protection de la mer du Nord. Pour commencer, les États ont recensé les décharges de 30 substances dangereuses. De 1986 à 1995, les rejets de 15 d'entre elles furent réduits de plus de 50 pour cent. En outre, des mesures ont été prises pour

que les rejets en rivière soient évités ou limités en cas d'accident industriel. Dans les prochaines années, la construction d'échelles à poissons devrait aider les saumons à remonter le fleuve jusqu'à leur site de frai, et l'amélioration de ces frayères permettra de rétablir les montaisons.

En 1991, lors d'une conférence sur les travaux effectués dans le bassin versant des eaux du Rhin, le ministre hollandais de l'environnement proposa d'utiliser l'expérience acquise avec le Rhin pour assainir la Meuse et l'Escaut. À la fin de la guerre froide, des commissions internationales ont été créées pour purifier l'Elbe, qui coule de la République tchèque et la Pologne à travers l'Allemagne, jusqu'à la mer du Nord, et l'Oder, qui forme une partie de la frontière germano-polonaise. Même la Volga a bénéficié des leçons tirées du Rhin. Pour le Danube, l'assainissement commença dès que possible, également. Ainsi, au cœur de l'Europe, le Rhin est devenu un symbole de coopération internationale. Le succès des efforts communs d'assainissement est de bon augure.

Karl-Otto MALLE est membre de la Commission allemande de protection du Rhin.

William M. STIGLIANI, Peter R. JAFFÉ et Stefan ANTONI, *Heavy Metal Pollution in the Rhine Basin, in Environmental Science and Technology*, vol. 27, n° 5, pp. 786-793, mai 1993.

Rehabilitation of the River Rhine, sous la direction de J.A. van de Kraats, numéro spécial de *Water Science and Technology*, vol. 29, n° 3, 1994.

L'évolution de la croûte continentale

ROSS SPENCER, COOPIER, MICHAEL AN

Les continents actuels se sont formés en plusieurs fois. Leur étude éclaire le passé géologique de la Terre, montrant que notre planète est une exception dans le Système solaire.

Nous considérons généralement les continents comme des structures permanentes de notre planète. Pourtant, ce ne sont que des structures mineures et dispersées à la surface d'une planète recouverte par les océans. De l'espace, on perçoit mieux le véritable visage du Globe : c'est une planète bleue.

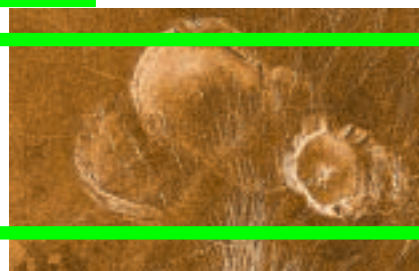
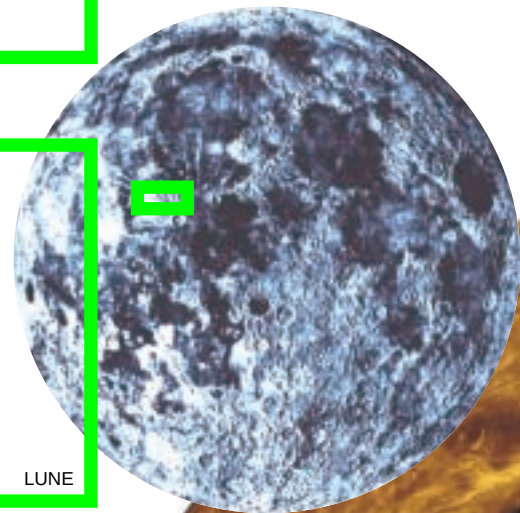
Pourquoi, malgré la longue histoire de la Terre, la petite surface émergée des continents a-t-elle été préservée? Cette persistance des terres émergées est-elle fortuite? Comment la croûte continentale est-elle apparue? Est-elle présente d'autres part du Système solaire? Et bien a-t-elle évolué? Débattues depuis des décennies par les géophysiciens, ces questions ont aujourd'hui une réponse. Notamment, les spécialistes pensent que la Terre est un cas unique et que les conditions nécessaires à la formation des continents n'existent probablement pas ailleurs dans le Système solaire.

Vénus est parfois considérée comme la planète jumelle de la Terre, parce que sa taille, sa masse et sa distance au Soleil diffèrent peu de celles de la Terre. Aussi a-t-on supposé que la croûte de Vénus ressemble à celle du Globe. Des siècles d'observation au télescope nous ont peu appris, car Vénus est recouverte d'une épaisse couche de nuages opaques à la

lumière visible, mais depuis 1990 le radar de la sonde spatiale *Magellan*, en orbite autour de la planète, a percé la couche nuageuse, nous révélant enfin les détails de sa surface. À partir de ces images, les planétologues essaient de déterminer la nature des roches qui composent sa surface.

Fausse jumelles?

La sœur de notre planète semble recouverte d'une couche de basaltes fins, semblable à ceux qui tapissent les fonds des océans terrestres. En revanche, la sonde *Magellan* n'a pas révélé de grandes étendues analogues aux continents terrestres. Même les régions en altitude, nommées Aphrodite Terra et Ishtar Terra, semblent être des restes de lave basaltiques déformées. La surface de Vénus comprend également des dômes plus petits dont la forme



1. LA CROÛTE TERRESTRE est principalement composée de roches basaltiques, qui tapissent les fonds océaniques. Des roches granitiques constituent l'essentiel des continents émergés. Vénus est approximativement de la même taille que la Terre, mais les images obtenues par le radar de la sonde *Magellan* montrent que sa surface est presque entièrement basaltique. Seule une minuscule partie de sa surface possède des dômes qui, comme les continents terrestres, pourraient être composés de matériaux granitiques. La surface de la Lune, d'autre part, possède des montagnes blanches, formées lors du refroidissement de notre satellite ; des éruptions volcaniques postérieures ont créé les mers de basaltes plus sombres.

indiqueraient une composition rocheuse différente par endroits, mais il n'est pas exclu qu'il y ait aussi des basaltes.

L'analyse des données de la sonde *Magellan* montre l'absence de tectonique des plaques sur Vénus : on n'y voit aucune trace d'une création continue de matière, d'un déplacement, puis d'une subduction de la surface de la planète.

plus de grandes structures semblables aux dorsales médio-océaniques ou aux profondes fosses sous-marines des océans terrestres. Au total, la quantité de lave expulsée par l'intérieur de la planète correspond approximativement à celle qui est libérée par le volcan hawaïen Kilauea : c'est négligeable, pour une planète de cette taille. Aussi

le recyclage régulier de la croûte de Vénus dans le manteau de la planète et la formation d'une nouvelle croûte sont-ils improbables.

Les observations de Vénus et des autres corps solides du Système solaire montrent que les surfaces planétaires sont de trois types. Les croûtes primaires remontent aux origines du Système

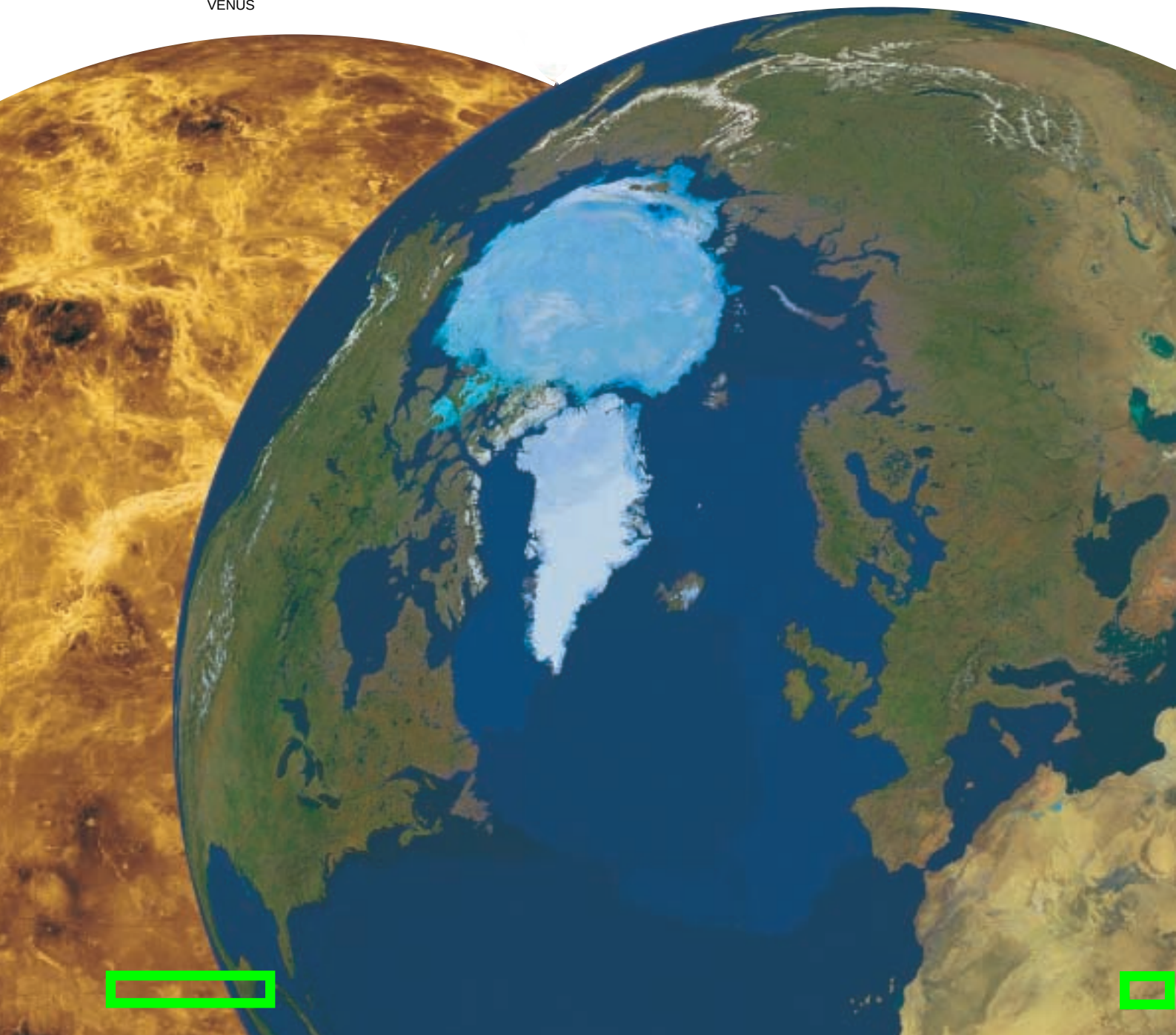
et sont constituées de grandes quantités de matière primordiale s'écrasait sur les planètes, lors de leur phase d'accrétion. L'énergie de collision libérée était suffisante pour provoquer la fusion de la protoplanète ; puis, lors du refroidissement, les roches cristallisaient, séparant les premiers cristaux du reste du magma. La séparation des minéraux de feldspath, par

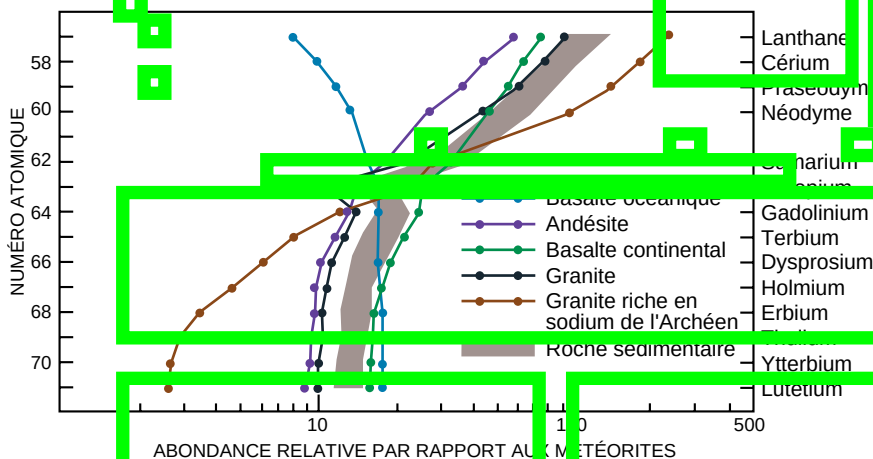
flottaison, est probablement à l'origine des montagnes basses de la surface de la Lune. De même, les mélanges de roches, de glace, de méthane et d'ammoniac sous forme solide, qui composent les croûtes de nombreux satellites des planètes géantes, sont le résultat de processus de fusion catastrophique lors des phases d'accrétion.

Si la croûte primaire est apparue lors d'épisodes brusques de fusion générale, la croûte secondaire résulte de l'échauffement plus régulier dû à la décomposition des éléments radioactifs, piégés à l'intérieur des planètes : seule fond une petite partie du man-

VÉNUS

TERRE





2. LES ÉLÉMENTS DE LA FAMILLE DES TERRES RARES permettent de caractériser les roches qui composent la croûte terrestre. Bien que la plupart des roches ignées (celles qui se solidifient à partir de magma) aient des abondances relatives en terres rares très variables (lignes colorées), les caractéristiques de la plupart des roches sédimentaires se rejoignent dans une étroite bande (en brun) : les roches sédimentaires indiquent la composition moyenne de la croûte continentale supérieure.

teau rocheux de la planète, ce qui provoque généralement des éruptions de laves basaltiques. Les surfaces de Mars, de Vénus, les fonds des océans terrestres et les mers lunaires sont tapissés de ces croûtes secondaires. Sur les autres planètes les plus éloignées du Soleil, les déformations internes dues aux forces de marées (l'attraction exerce sur la partie solide des corps célestes les mêmes déformations que la Lune sur les océans terrestres) sont d'autres sources d'énergie qui contribuent à la fonte des manteaux planétaires et à la création de croûte secondaire.

En plus de ces deux types courants, une troisième sorte de croûte se forme lorsque l'activité tectonique recycle la surface de la planète. Sur Terre, les fonds du manteau. Analogue à une distillation continue, le volcanisme produit alors un magma qui est composé essentiellement de roches granitiques très différentes du basalte. Ce mécanisme de formation par recyclage n'est possible que sur une planète possédant une activité tectonique ; la Terre en est l'unique exemple connu.

Malgré le petit nombre de corps célestes où l'on étudie la croûte, des lois se dégagent. La formation de la croûte primaire est la plus ancienne.

La Lune (qui représente 12 pour cent de son volume) a duré que quelques millions d'années. Les croûtes secondaires évoluent beaucoup plus lentement : les mers de basalte de la Lune se sont formées en plus d'un milliard d'années, alors que leur épaisseur n'est que de quelques centaines de mètres et que leur volume est 1 000 fois infé-

rieur à celui de la planète. Une autre croûte secondaire, le plancher basaltique des océans (qui représente 1 pour cent de sa masse), s'est formée durant les 200 derniers millions d'années. Aussi, la croûte tertiaire, qui résulte de la formation la création de croûte tertiaire est encore plus lente : il aura fallu plusieurs milliards d'années pour créer les continents terrestres qui représentent un demi pour cent de la masse de notre planète.

Les continents flottent

De nombreux éléments, rares à la surface de la Terre, sont concentrés dans les roches granitiques. Cette présence importante sans commune mesure avec la faible proportion massique qu'elle représente. Toutefois, les géologues n'ont pas encore réussi à déterminer la composition globale de la croûte terrestre, information cruciale pour l'étude de l'évolution de la composition de tous les affleurements rocheux de la croûte continentale ne permet pas de connaître la composition en profondeur. Un programme de forages profonds qui permettrait d'atteindre les limites actuelles des techniques de forage et coûterait très cher.

Heureusement, l'érosion et la sédimentation pallient ces difficultés. De simples boues solidifiées révèlent une composition moyenne représentative de la croûte continentale affleurante. Ces échantillons ont perdu les composés les

plus solubles dans l'eau, tels le sodium et le calcium, mais les 14 éléments de la famille des terres rares, sont de ceux dont les abondances relatives sont conservées durant les processus géochimiques. Ces éléments sont des traceurs géochimiques uniques pour connaître la composition de la croûte : comme leurs atomes ne se placent pas bien dans le réseau cristallin des minéraux habituels, ils se concentrent dans les roches granitiques qui cristallisent tardivement. Ces granites forment la plus grande partie de la croûte continentale.

Les abondances relatives des terres rares sont si semblables, dans de nombreux sédiments, que les géochimistes pensent que les précipitations, l'érosion et la sédimentation brassent les produits éoliques de suffisamment de types pour donner une composition moyenne de la croûte continentale (dire solidifiées à partir du magma) pour donner un échantillonnage représentatif de l'ensemble de la croûte continentale. Les éléments de la famille des terres rares révèlent ainsi la composition moyenne de la croûte continentale et enregistrent, par leurs variations d'abondance, les circonstances de la formation de la croûte.

Grâce à ces traceurs géochimiques, on a déterminé que la partie supérieure de la croûte continentale avait essentiellement la composition d'une granodiorite, une roche ignée commune composée de quartz clair, de feldspath et parfois de minéraux sombres. Au-dessus d'une profondeur de 10 à 15 kilomètres dans la croûte continentale, il est probable que la roche la plus abondante possède une composition plus basaltique. Les géochimistes ont testé leurs hypothèses aux mesures de chaleur produite au sein de la croûte par la désintégration des éléments radioactifs, les trois plus abondants étant le potassium, l'uranium et le thorium. On pense que cette région, aussi énigmatique qu'inaccessible, serait constituée de basaltes piégés sous les continents de densité plus faible.

Cette faible densité des roches granitiques explique pourquoi la plus grande partie de la croûte continentale

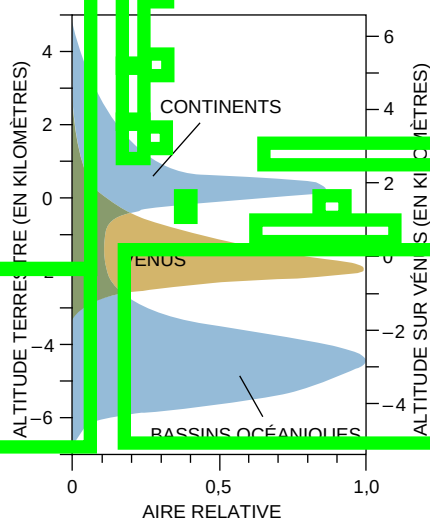
gée. Le niveau moyen de la croûte continentale se situe à 125 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, et 15 pour cent de la surface continentale s'élève à plus de 2 000 mètres d'altitude. En revanche, le plancher océanique est, en moyenne, à 4 000 mètres sous le niveau de la mer, parce que la croûte océanique, composée de basaltes

et recouverte d'une mince couche de sédiments est beaucoup plus dense.

À la base de la croûte se trouve la discontinuité de Mohorovicic, nommée plus familièrement «Moho». Cette surface profonde marque un changement net de composition. Sous le Moho, les roches sont plus denses et riches en olivine : c'est le manteau terrestre, présent aussi bien sous les océans que sous les continents. La réflexion des ondes sismiques sur le Moho a permis de connaître sa profondeur sur tout le Globe. Ces études ont également montré qu'une partie du manteau pouvait être «ancré» sous les continents. Ces racines sous-continentales atteignent parfois 400 kilomètres d'épaisseur et se déplacent avec les continents, lors des mouvements tectoniques. Ces études, les diamants sont des indices... de prix : certains contiennent des inclusions de petits minéraux qui proviennent apparemment du manteau lié aux continents et d'autres, provenant de roches profondes, sont vieux de plus de trois milliards d'années, montrant l'antiquité des racines continentales.

Il y a moins de 40 ans, rien ne laissait penser que la nature des roches des bassins océaniques pouvait être fondamentalement différente de celle des roches continentales ; les géologues pensaient que les océans étaient simple-

ment les continents effondrés et engouffrés, et ils supposaient que la croûte était une sorte d'écume résultant de la cristallisation de la surface de la planète initialement «fusionnée». La Terre primitive fut en fusion, une croûte granitique primaire, au sens de ce qui était imaginé il y a quelques décennies, n'a vraisemblablement jamais existé.



3. LE RELIEF DE LA TERRE (en bleu) est différent de celui de Vénus (en doré). Sur la Terre, les surfaces sont concentrées autour de deux niveaux principaux. En revanche, la plus grande partie de la surface de Vénus est rassemblée autour d'un seul niveau (l'altitude des points de Vénus est donnée par rapport au rayon moyen de la planète).

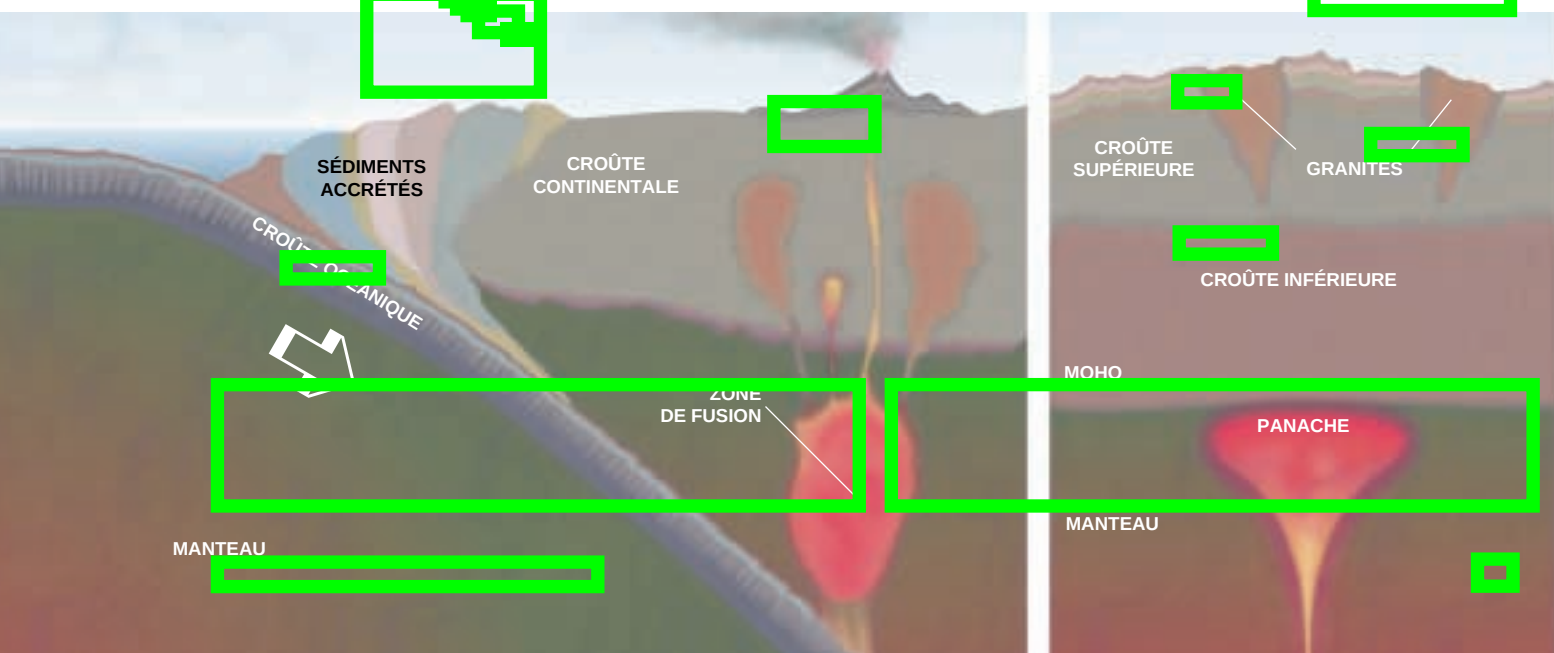
L'évolution de la diversité géologique

Comment deux types de croûtes aussi différents que la croûte océanique et la croûte continentale sont-ils apparus sur la Terre ? Pour répondre à cette question, il faut remonter à l'origine du Système solaire. Dans la phase de la nébuleuse solaire primitive qui correspond à l'orbite terrestre, l'activité solaire intense avait balayé les gaz, et les blocs rocheux subsistaient. Ceux-ci, d'abord rassemblés en «planètes maïeuses», se sont agrégés par accrétion pour former notre planète après 50 à 100 millions d'années.

Puis un planétoïde massif, d'une taille comparable à celle de Mars, s'est écrasé sur la Terre primitive. L'impact fut si violent que le manteau rocheux de la proto-Terre fut projeté en orbite, formant la ceinture d'Asteroides. Le métal du planétoïde s'enfonçait dans les profondeurs de la Terre (voir

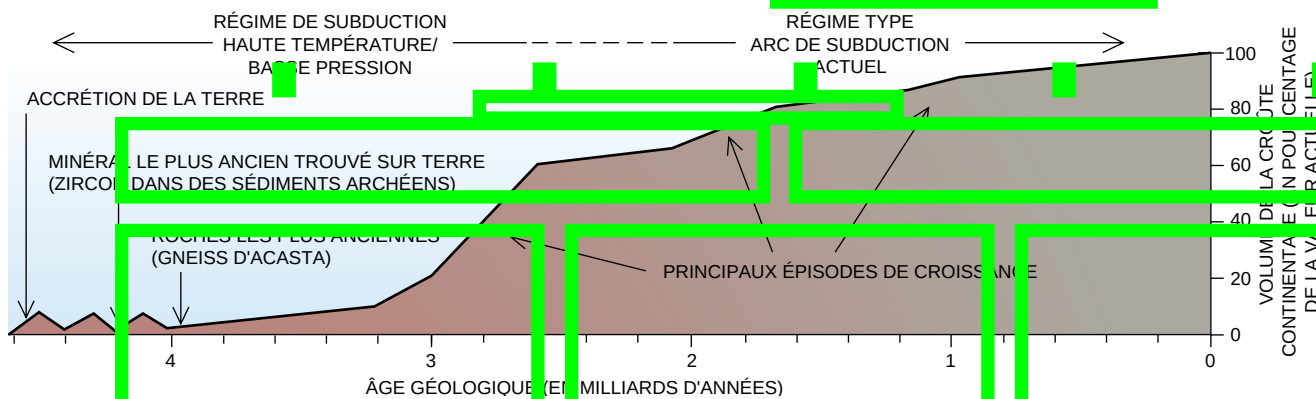
la Lune, par Jeffrey Taylor, *Pour la Science*, septembre 1994). Cette collision provoqua une fusion complète de la planète. Enfin, comme la jeune Terre se solidifiait en refroidissant, une croûte basaltique primitive apparut.

À ce stade, la surface de la Terre ressemblait probablement à celle de Vénus. Il ne reste toutefois aucune trace de cette



4. LA TECTONIQUE DES PLAQUES entraîne la croûte océanique dans les profondeurs du manteau (à gauche), enfouissant les sédiments gorgés d'eau. À une profondeur d'environ 80 kilomètres, l'échauffement expulse l'eau des sédiments, provoquant la fusion des roches sous-jacentes. Le magma produit monte et forme de la croûte conti-

nentale près de la surface. À mesure que la croûte se forme (à droite), la chaleur dégagée par la décomposition des éléments radioactifs (ou par la montée de panaches de magma basaltique) provoque la fusion partielle à faible profondeur. De tels événements sont à l'origine de la croûte continentale supérieure riche en granite.



5. LA CROÛTE TERRESTRE s'est formée en plusieurs fois, au cours des derniers milliards d'années. Une proportion notable de la croûte est apparue il y a 3 à 2,5 milliards d'années, au moment de la transition entre les ères archéennes et protérozoïques. Des zones de fusion étendues ont alors engendré la majeure partie de la couche supérieure de la croûte continentale.

croûte primitive : soit elle a sombré dans le manteau d'une manière similaire à ce qui se passe de nos jours, soit elle s'est regroupée en roches plus denses, qui ont coulé dans les profondeurs de la Terre. En tout cas, on n'a pas retrouvé trace d'une croûte granitique qui aurait été formée à cette époque, alors qu'elle devrait avoir laissé du zircon (un minéral qui se forme dans le granite et résiste bien à l'érosion). Le très petit nombre de grains de zircon datant de cette époque primordiale (les plus vieux, retrouvés dans les roches sédimentaires d'Australie, ont environ 4,2 milliards d'années) confirme l'absence d'une croûte continentale granitique primordiale.

D'autres informations sur la croûte primitive sont obtenues à partir des plus vieilles roches qui ont traversé intactes les temps géologiques. Ces roches se sont formées profondément dans la croûte il y a un peu moins de quatre milliards d'années, et affleurent maintenant au Nord-Ouest du Canada, dans les gneiss d'Acasta. D'autres roches à peine plus jeunes ont été décrites en divers endroits du Globe, mais les mieux étudiées se trouvent dans les formations anciennes de l'Ouest du Groenland. L'abondance des roches sédimentaires y atteste la présence d'un océan, et aussi, à cette époque reculée, de véritables océans. Ces roches du Canada et du Groenland ne datent que de 400 à 500 millions d'années après la phase d'accrétion de la Terre : les traces du début géologique de la Terre ont été effacées par les collisions avec des planétoïdes.

À partir de quelques indices qui subsistent dans les roches sédimentaires, les géologues comprennent que la croûte continentale s'est formée continûment, au cours de la longue histoire de la Terre. Néanmoins cette genèse ne s'est pas toujours opérée selon les mêmes modalités. Ainsi, la composition des roches s'est modifiée entre l'Archéen et le Protérozoïque il y a 2,5 milliards d'années. Avant la transition, la croûte supérieure était composée d'un mélange de basaltes et de granites riches en sodium nommé tonalite. Après la transition, elle est dominée par des granites riches en potassium.

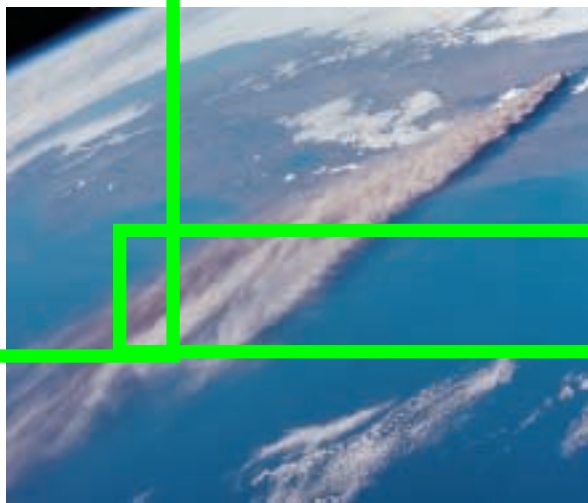
Ce changement de la composition de la croûte, voici 2,5 milliards d'années, résulte du brassage des matériaux terrestres par la tectonique des plaques. Initialement, la croûte océanique était recyclée rapidement, car les fortes concentrations en éléments radioactifs

assuraient un chauffage qui animait le moteur tectonique. Plus de 100 plaques semblent avoir existé à l'époque archéenne, contre une dizaine seulement aujourd'hui. Contrairement à la croûte océanique actuelle, qui parcourt un long chemin et a donc le temps de se refroidir, la croûte océanique de cette époque plus primitive restait en surface durant un temps plus court ; elle était alors plus chaude lorsqu'elle réintégrait le manteau et fondait à une profondeur moindre. Cette différence de température explique la formation de roches ignées riches en sodium. Aujourd'hui, ces roches ne se forment que dans les quelques rares endroits où de la croûte océanique jeune et chaude entre en subduction.

La tendance des magmas à former des granites riches en sodium explique pourquoi la croûte a formé un mélange de basalte et de tonalite à l'ère archéenne.

Une partie importante de la croûte continentale – au moins 50 pour cent, peut-être même, 70 pour cent – émergea alors, avec un maximum de vitesse de croissance situé entre 3 et 2,5 milliards d'années. La hauteur relative des bassins océaniques et des plates-formes continentales est restée relativement stable. Au début de l'ère protérozoïque, voici 2,5 milliards d'années, la configuration présente, et la tectonique des plaques moderne commença.

Aujourd'hui, de la croûte océanique se forme par l'éruption de lave basaltique par les dorsales médio-océaniques. Plus de 18 kilomètres cubes de roches sont produits chaque année par



6. LES VOLCANS, comme celui qui est en éruption sur la péninsule du Kamtchatka, sont en des zones du Globe où la croûte continentale se forme au-dessus de la croûte océanique en subduction. De telles zones actives se transformeront en croûte continentale stable.

ce mécanisme. Ces nouvelles couches de croûte, formées par la fusion des couches externes du manteau terrestre et forment avec elles la lithosphère rigide. Cette dernière réintègre le manteau dans les zones de subduction, qui laissent des cicatrices sur les fonds océaniques sous la forme de fosses profondes. En ces lieux, la plaque qui s'enfonce entraîne avec elle du basalte, ainsi que des sédiments marins gorgés d'eau.

À une profondeur d'environ 80 kilomètres, la chaleur expulse l'eau et les autres composés volatiles des sédiments vers le manteau sus-jacent. Ces substances abaissent le point de fusion des matériaux environnants, de sorte que les magmas produits remontent à la surface, où ils provoquent des éruptions volcaniques. Les éruptions du volcan Pinatubo et du mont Saint Helens sont deux exemples récents de ces catastrophes géologiques. Les grandes chaînes de volcans – comme les Andes –, alimentées par ces fluides bouillants, ajoutent en moyenne deux kilomètres cubes de laves et de cendres aux continents chaque année.

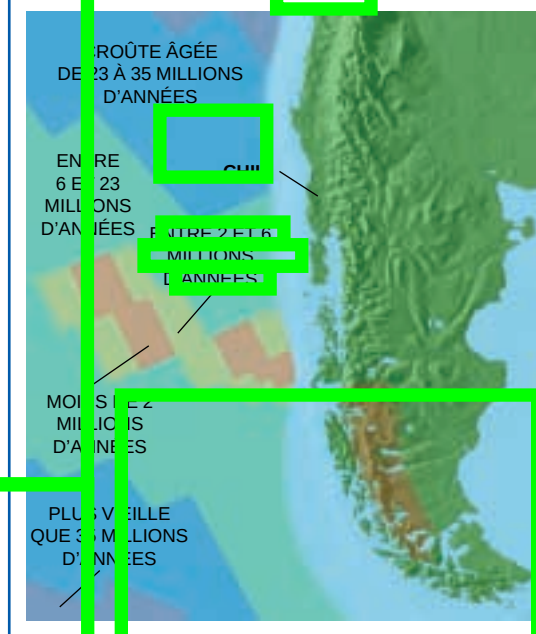
Cependant, le volcanisme résultant de la subduction n'est pas l'unique source de roches granitiques. L'accumulation de la chaleur dans les profondeurs de la croûte terrestre peut même provoquer la fusion et la migration du magma vers la surface. La décompression des éléments radioactifs est une source de chaleur, mais elle est plus faible que la convection qui remonte des magmas basaltiques jusque sous la couverture granitique : les roches fondues sont comme une plaque électrique sous une poêle à frire.

Les poussées de croissance

Si la formation de la croûte continentale a notablement changé à la fin de l'ère archéenne (il y a 2,5 milliards d'années, elle a également varié au cours des temps géologiques : des quantités importantes de croûte se sont formées il y a 2,5 à 2,2 milliards d'années, puis il y a 1,7 à 1,3 milliard d'années, et il y a 500 à 300 millions d'années. Ces périodes de croissance sont discontinues : pourquoi la croûte continentale se forme-t-elle de façon discontinue, alors que la génération de chaleur interne par les éléments radioactifs et son évacuation par le recyclage de la croûte océanique sont continues ?

Une compréhension plus fine de la tectonique des plaques aide à résoudre cette énigme. Pendant le Permien (il y

Un instantané du passé



Les granites riches en sodium sont caractéristiques de l'ère archéenne, une époque au cours de laquelle le moteur de la tectonique des plaques était plus efficace qu'aujourd'hui. Ces granites riches en sodium, les tonalites, trondjemites-granodiorites, ne se forment que lorsque de la croûte océanique jeune pénètre dans le manteau, provoquant des réactions de fusion partielle à faible profondeur. Ces conditions existent aujourd'hui dans la partie méridionale des côtes du Chili : de la croûte océanique jeune plonge sous la plaque américaine. Les régions où naissent des granites riches en sodium sont en brun.

à environ 250 millions d'années), les grandes masses continentales de la Terre ont convergé pour créer un énorme continent nommé la Pangée (voir *La Terre avant la Pangée*, par Ian Dalziel, *Pour la science*, 1985). Au cours de ces temps géologiques, la formation de tels continents géants semble s'être reproduite à intervalles irréguliers d'environ 600 millions d'années. Les cycles tectoniques majeurs qui écartent, puis rapprochent les continents ont été étudiés jusqu'à l'Éotérozoïque ancien, et il est probable qu'ils ont continué à se répéter. Il a été formé au cours de l'Archéen.

De tels cycles tectoniques modulent le rythme de la création de croûte continentale. Lorsqu'un continent se brise, la croûte océanique est ancienne et peut donc former plus facilement de la nouvelle croûte continentale après sa subduction. Lorsque les continents isolés se rapprochent, les arcs volca-

niques (les chaînes de volcans qui naissent près des zones de subduction) percent les continents. De la nouvelle croûte se forme par l'accrétion de ces roches aux marges des continents.

Plus de quatre milliards d'années, les continents errants se sont assemblés et séparés de multiples façons. Nous avons, enfouis sous nos pieds, les derniers témoignages de l'histoire de notre Terre. Il aura fallu du temps pour reconstituer cette histoire à partir de l'étude des roches, mais nous y sommes parvenus.

La croûte terrestre et de son évolution est maintenant suffisante pour affirmer que la Terre est bien une planète exceptionnelle. Par une bonne fortune de la nature – la capacité de maintenir une tectonique des plaques –, une seule planète a été capable de créer des volumes de croûte continentale stable où nous pouvons vivre.

Ross TAYLOR travaille à l'Institut australien de recherche en sciences physiques. Scott MCLENNAN est professeur à l'Université Stony Brook, de New York.

Claude ALLÈGRE, *12 clés pour la géologie*, collection Regards sur la Science, Éditions Belin.

S. Ross TAYLOR et Scott M. MCLENNAN, *The Continental Crust : Its Composition and Evolution*, Blackwell Scientific Publications, 1985.

Preston CLOUD, *Oasis in Space : Earth History from the Beginning*, W.W. Norton, 1968.

S. Ross TAYLOR et Scott M. MCLENNAN, *The Geochemical Evolution of the Continental Crust*, in *Reviews of Geophysics*, vol. 33, n° 2, pp. 241-265, mai 1995.

Roberta L. RUDNICK et David M. FOUNTAIN, *Nature and Composition of the Continental Crust : A Lower Crustal Perspective*, in *Reviews of Geophysics*, vol. 33, n° 3, pp. 267-309, août 1995.

Un agent multiple : la sérotonine

MARIE-HÉLÈNE THIÉBOT • MICHEL HAMON

La sérotonine participe à diverses fonctions physiologiques. Quand son fonctionnement est perturbé, elle est responsable de dépression, d'anxiété, de migraine ou encore de vomissements. Des médicaments agissant sur des cibles spécifiques pallient ces anomalies.

La sérotonine intervient dans de multiples fonctions : l'alternance de la veille et du sommeil, l'appétit et la prise alimentaire, le rythme cardiaque, la perception de la douleur, la température corporelle, le comportement sexuel, ou encore les capacités d'apprentissage, l'attention et la mémoire. En effet, toutes ces fonctions sont partiellement commandées par les neurones qui libèrent la sérotonine.

La transmission assurée par ce messager chimique est perturbée dans certaines maladies, comme la migraine, dans des maladies psychiatriques, notamment plusieurs pathologies dépressives et anxieuses, certains troubles de la personnalité, ou encore des maladies neurodégénératives, telle la maladie d'Alzheimer et celle de Parkinson. En agissant sur les cibles de la sérotonine, certains médicaments soulagent certaines de ces pathologies.

Comment une seule et unique molécule peut-elle avoir cette multitude d'effets ? Parce qu'elle agit dans plusieurs sous-réseaux de neurones et qu'elle dispose de récepteurs spécifiques sur plusieurs cibles : selon les récepteurs activés ou inhibés, les effets sont totalement différents.

La sérotonine a d'abord été identifiée en dehors du système nerveux : en 1933, Vittorio Erspamer et ses collègues italiens ont isolé, dans certaines cellules de l'intestin (les cellules entérochromaffines), une molécule nouvelle, qu'ils ont nommée entéramine. En 1948, aux États-Unis, M. Rapport a isolé dans

les plaquettes sanguines (les cellules qui participent aux mécanismes de coagulation) une substance qui provoque la contraction des vaisseaux, la sérotonine. Les biologistes ont alors découvert que l'entéramine d'Erspamer est la même molécule que la sérotonine de Rapport, la 5-hydroxytryptamine. Présente chez l'homme, la sérotonine l'est aussi dans le venin de crapaud, d'abeille ou de scorpion, tout comme chez des végétaux et dans des bactéries.

En 1951, aux États-Unis, Irwin Page a émis l'hypothèse que la sérotonine, présente dans le système nerveux central, participe à la transmission des messages entre neurones. Les neurones sérotoninergiques synthétisent, stockent et libèrent la sérotonine. Aujourd'hui, on dénombre neuf groupes de neurones sérotoninergiques. Certaines aires du cerveau, les noyaux du raphé (le noyau dorsal, le médian, le latéral, le pallidus et obscurus, contiennent des neurones dont les axones (les longs prolongements) se terminent dans la moelle épinière.

Les fibres issues des noyaux du raphé dorsal et médian représentent quasiment la seule source de sérotonine des parties antérieures du sys-

tème nerveux central (le cerveau que l'on dit aussi « associatif »), les ganglions de la base (des structures qui participent au contrôle du mouvement) et les structures limbiques (le cerveau dit « affectif »), c'est-à-dire le cortex préfrontal, le septum, l'hippocampe, l'hypothalamus, le thalamus et les noyaux amygdaliens (voir la figure 2).

La libération de la sérotonine

Les neurones transmettent l'information vers les destinations parfois très éloignées. Toute pensée est le résultat de convergence de millions de neurones du cerveau. L'information est transmise par l'axone du neurone, le câble qui relie le neurone d'où part le message jusqu'à sa destination. Les neurones qui ont leur corps cellulaire dans le cerveau et qui sont reliés à l'extrémité inférieure de la moelle épinière ont des axones longs de plus de un mètre.

Comment se transmet le message ? L'intérieur d'un neurone au repos est électriquement négatif par rapport à l'extérieur ; en phase d'excitation, la différence de potentiel électrique entre les deux faces de la membrane s'annule, voire s'inverse : alors, un afflux massif d'ions sodium en un point de l'axone change les propriétés électriques locales du point voisin et y déclenche également un afflux d'ions sodium : la dépolarisation se propage le long de l'axone.

LA SÉROTONINE est un neurotransmetteur qui participe à de nombreuses fonctions physiologiques. Lorsque certains circuits de neurones libérant la sérotonine fonctionnent anormalement, des troubles apparaissent : par exemple, les migraines, des troubles du comportement alimentaire, une agressivité exacerbée ou encore des dépressions. Des médicaments qui potentialisent ou, au contraire, inhibent des circuits spécifiques de neurones sérotoninergiques calment ces pathologies.

Lorsque le message parvient aux terminaisons de l'axone, il doit ensuite être transmis au neurone adjacent ou à la cellule cible : cette transmission est assurée par des neurotransmetteurs qui agissent sur des récepteurs. Les neuromédiateurs sont synthétisés dans les neurones, puis stockés dans des vésicules synaptiques d'où ils sont libérés. En fait, la sérotonine est libérée non seulement à partir des terminaisons axonales, mais également à partir des corps cellulaires des neurones sérotoninergiques.

La libération de la sérotonine par le corps cellulaire est indépendante de l'activité électrique du neurone. Au contraire, la libération par les terminaisons axonales dépend de la

fréquence des potentiels d'action émis par le neurone. Elle est déclenchée par les ions calcium qui affluent lors de l'arrivée d'un message. Une fois libérée, la sérotonine peut avoir été libérée dans la fente synaptique (l'espace qui sépare le neurone présynaptique «émetteur» et le neurone postsynaptique «récepteur») le neuromédiateur agit sur le neurone postsynaptique, ou bien il est dégradé par des enzymes, ou bien est recapté par le neurone présynaptique.

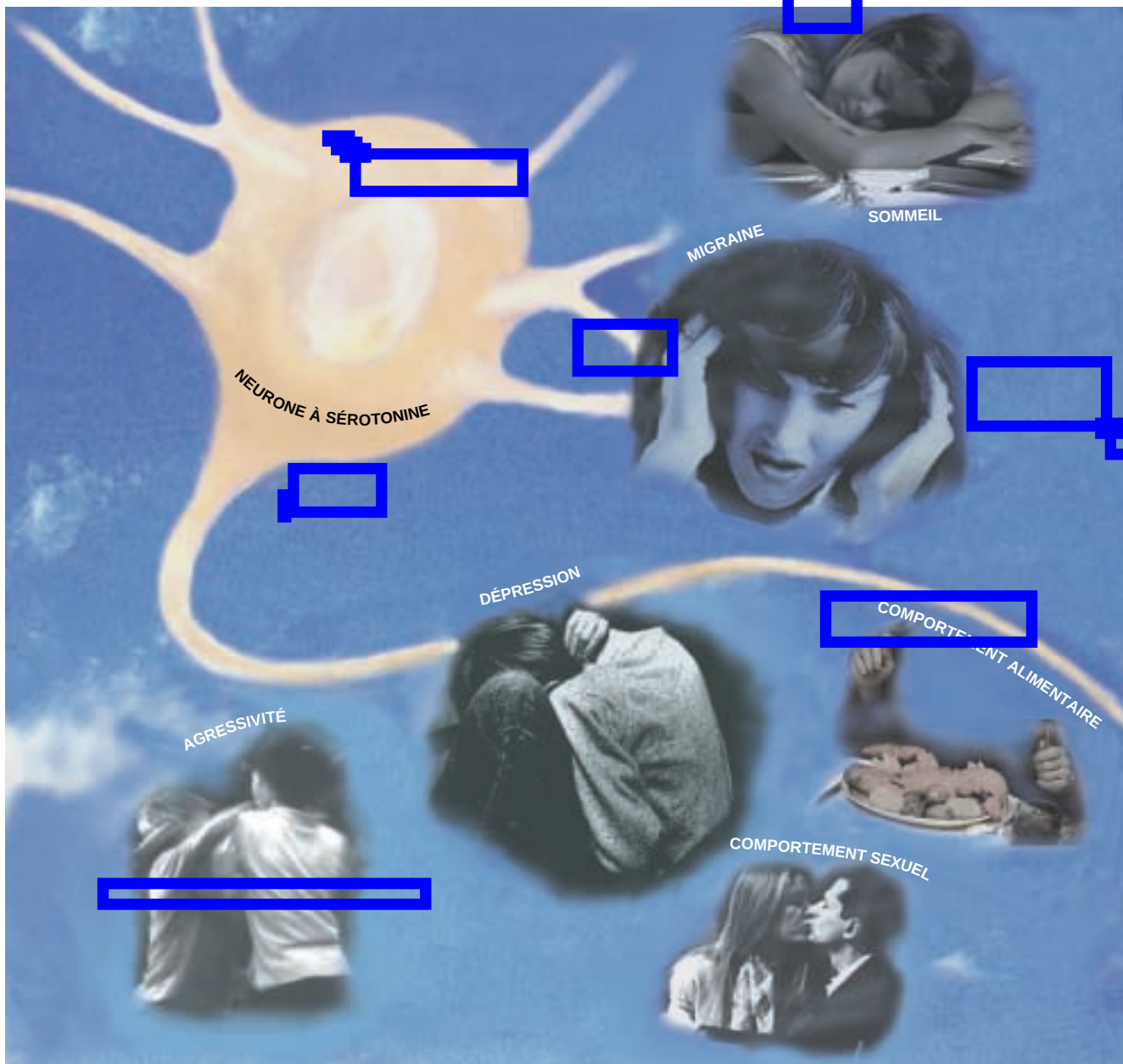
Dès 1957, John Gaddum et Z. Picairelli montraient qu'il existe au moins deux types de récepteurs pour la sérotonine, mais, depuis, l'application des techniques de la biologie moléculaire a permis d'identifier une quinzaine de

récepteurs répartis en sept classes distinctes. Ce sont tous des protéines insérées dans la membrane des cellules et sensibles à l'action de la sérotonine.

Les récepteurs de la sérotonine

Les récepteurs de la classe 5-HT_{1A} sont caractérisés par une affinité élevée pour la sérotonine : quelques nanomoles de sérotonine (quelques milliardièmes de mole) se fixant sur ces récepteurs suffisent à déclencher la réaction cellulaire commandée par ces récepteurs.

Lorsque la sérotonine se lie à un récepteur 5-HT_{1A}, cette molécule



change de configuration, et la modification active une protéine G, la protéine qui transmet les informations de l'extérieur vers l'intérieur des cellules. L'activation de la protéine G entraîne l'ouverture d'un canal potassium, inséré dans la membrane (voir la figure 3) : les ions potassium quittent en masse la cellule, ce qui augmente la charge négative du milieu intracellulaire ; la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane neuronale croît, ce qui correspond à une hyperpolarisation de la membrane.

Cette hyperpolarisation empêche la décharge d'un nouveau potentiel d'action et bloque la propagation des messages : la sérotonine agit alors comme un neuromédiateur inhibiteur. Elle se comporte de la même façon sur les récepteurs 5-HT_{1D}, 5-HT_{1E} et 5-HT_{1F}. De plus, lorsqu'ils sont activés, ces récepteurs inhibent aussi la synthèse de la sérotonine par les enzymes normalement diverses enzymes.

L'affinité de la sérotonine pour ses autres récepteurs est moindre : le neuromédiateur se fixe d'abord sur ses récepteurs 5-HT₁, puis, lorsque ceux-ci sont saturés (pour des concentrations en sérotonine supérieures à un millionième de mole), le neuromédiateur se lie aux autres récepteurs,

notamment 5-HT₄. Dans ce cas, la production de l'AMP cyclique augmente et les canaux potassium se ferment : les ions potassium s'accumulent dans le neurone, la différence de potentiel transmembranaire diminue, de sorte que le neurone peut décharger plus facilement.

La cellule est dépolarisée, les messages sont émis plus souvent, le seuil d'excitation est abaissé. La sérotonine agit sous la dépendance des récepteurs 5-HT₄ est excitateur. C'est également le mode de fonctionnement des récepteurs 5-HT₂, mais, dans ce cas, l'AMP cyclique n'intervient pas. Ces récepteurs contrôlent la production d'autres seconds messagers dérivés de constituants de la membrane (des lipides membranaires).

Parmi les autres types de récepteurs, citons les 5-HT₃ : contrairement aux récepteurs précédemment décrits, les molécules transmembranaires couplées à des protéines G, le récepteur 5-HT₃ est un canal ionique (voir la figure 3). Lorsque la sérotonine se lie à ce récepteur, les ions sodium s'engouffrent dans la cellule, la différence de potentiel transmembranaire diminue, ce qui dépolarise le système, lequel est excitateur. Seul le récepteur 5-HT₃ est

un «récepteur-canal ionique», tous les autres sont des récepteurs couplés à une protéine G.

Lorsque la sérotonine se lie aux récepteurs 5-HT₁, 5-HT₂ ou 5-HT₄, les réactions sont déclenchées en quelques fractions de seconde, tandis que la réaction sur le récepteur-canal ionique 5-HT₃ est quasi immédiate (il s'agit de quelques millisecondes). Dans le cas de cette réaction rapide, la sérotonine joue le rôle d'un neuromédiateur : elle transmet un signal susceptible de déclencher la propagation d'un nouveau train de potentiels d'action.

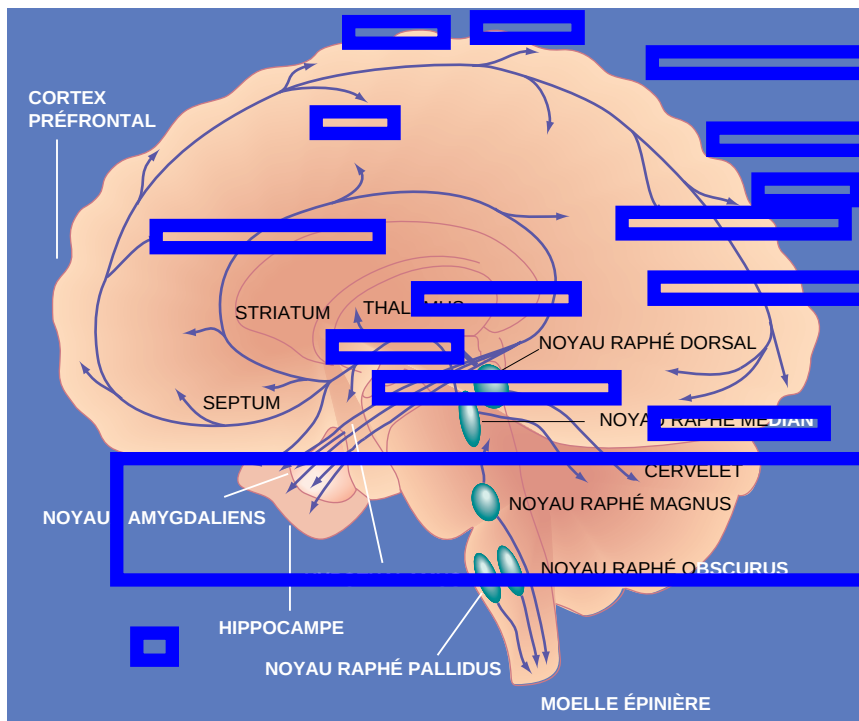
Au contraire, les autres réactions sont déclenchées plus lentement et que la chaîne de protéines activées est complexe, le signal n'engendre pas de potentiels d'action, mais il modifie la polarisation membranaire ; la sérotonine est alors un neuromodulateur. Globalement la sérotonine est davantage un neuromodulateur qu'un neuromédiateur.

Les tissus périphériques contiennent aussi des neurones sérotoninergiques. Leurs cellules cibles sont alors des fibres nerveuses, des cellules endocrines, qui portent toutes des récepteurs de la sérotonine. Enfin, les neurones sérotoninergiques eux-mêmes possèdent des récepteurs de la sous-classe 5-HT₁ sur les corps cellulaires, sur les dendrites et sur les terminaisons axonales ; on les nomme autorécepteurs, et nous en examinerons ultérieurement le rôle.

Les données de la pharmacologie

Comment a-t-on mis en évidence les propriétés des récepteurs de la sérotonine ? Tous ces récepteurs ont été clonés, et les molécules qui s'y lient sont maintenant connues. À mesure que l'on a identifié et cloné les récepteurs, on a synthétisé des composés (des ligands) qui s'y lient spécifiquement et avec une affinité élevée, ce qui a permis aux pharmacologues de préciser les fonctions physiologiques de ces récepteurs.

Ces ligands sont soit des agonistes (ils reproduisent l'effet de la sérotonine), soit des antagonistes (ils s'opposent à son action). Ils permettent soit d'imiter l'action de la sérotonine, soit de l'inhiber en bloquant ses récepteurs.



2. LES CIRCUITS des neurones sérotoninergiques ont tous leur origine dans un noyau du raphé (en vert) : le raphé pallidus, le raphé obscurus, le raphé magnus, le raphé dorsal et le raphé médian sont les plus importants. Les axones des neurones issus des raphés obscurus, magnus et pallidus se projettent dans la moelle épinière, tandis que ceux des raphés dorsal et médian innervent les parties antérieures du cerveau.

Ces ligands sont d'abord des «outils» d'analyse chez l'animal, puis chez l'homme, ils deviennent parfois des «outils» thérapeutiques, acquérant le statut de médicaments.

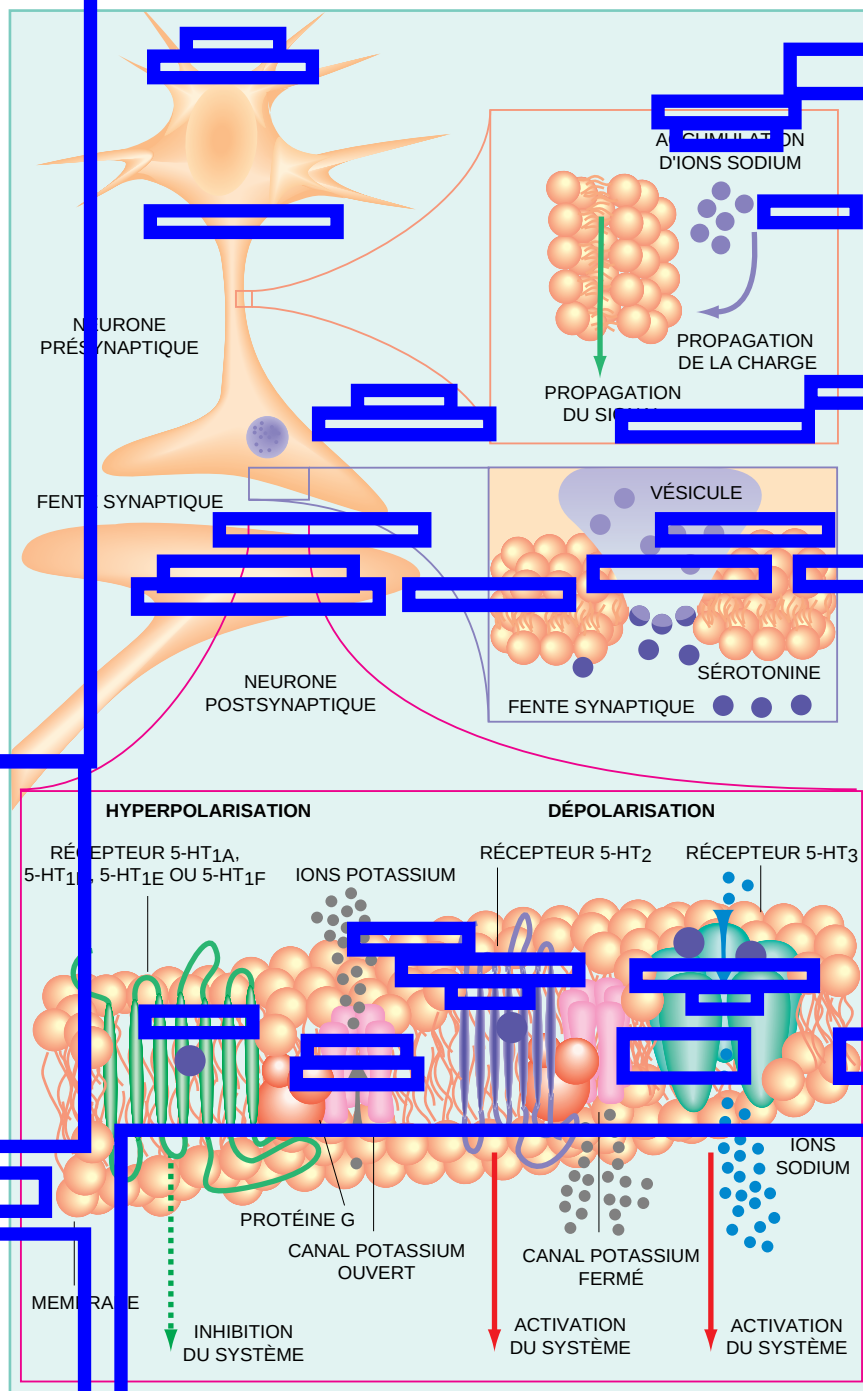
À l'évidence, on ne peut évaluer les fonctions sérotoninergiques centrales chez l'homme sain ou malade par des méthodes directes d'analyse. De façon indirecte, on peut soit mesurer la concentration du principal métabolite de la sérotonine, l'acide 5-hydroxyindole acétique, dans le liquide céphalo-rachidien prélevé par ponction lombaire, soit évaluer des index périphériques, c'est-à-dire des paramètres physiologiques (des concentrations sanguines en hormones, par exemple) qui sont sous la dépendance du système sérotoninergique central. On évalue ainsi approximativement les variations du fonctionnement du système sérotoninergique d'une personne à l'autre.

Les études *post mortem* permettent d'explorer les concentrations des neurotransmetteurs et de leurs métabolites, de la densité ou de la sensibilité des récepteurs associées à certaines pathologies. Toutefois, l'imprécision du diagnostic, les traitements médicamenteux suivis avant le décès, le délai séparant la mort et le prélèvement limitent l'intérêt de telles mesures.

La tomographie par émission de positons permet de visualiser le fonctionnement dynamique du cerveau, à condition d'utiliser des ligands qui se fixent sur les récepteurs des circuits neuronaux étudiés : lorsque l'on disposera de ligands spécifiques du système sérotoninergique, on pourra en préciser les fonctions chez l'homme. Aujourd'hui, force est de constater que l'essentiel des résultats acquis sur les fonctions de la sérotonine résultent des études pharmacologiques.

Sérotonine et dépression

Vers 1960, la réserpine, utilisée un temps pour lutter contre la schizophrénie, entraînait une baisse trop marquée de la pression artérielle. En revanche, elle devint un des antihypertenseurs les plus prescrits. Malheureusement, à mesure que la tension artérielle se normalisait, les patients devenaient moroses, dépressifs, voire suicidaires : les symptômes accompagnant l'administration de réserpine étaient ceux



3. LA TRANSMISSION DES MESSAGES DANS LES NEURONES commence dans le neurone présynaptique : une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane se transmet de proche en proche jusqu'à ce que le neuromédiateur, ici la sérotonine, stockée dans des vésicules, soit libérée dans la fente synaptique qui sépare le neurone présynaptique et le neurone postsynaptique. Les différents récepteurs de la sérotonine (*en bas*) ont des actions variées. Les récepteurs 5-HT_{1A}, 5-HT_{1B}, 5-HT_{1E} et 5-HT_{1F} (*en vert*, à gauche) ont une action inhibitrice : lorsque la sérotonine se lie à son récepteur, il change de forme et active une protéine G membranaire, qui commande l'ouverture d'un canal potassium. Des ions potassium quittent en masse le neurone postsynaptique, ce qui diminue la charge négative intracellulaire ; la différence de potentiel augmente de part et d'autre de la membrane du neurone, et cette hyperpolarisation empêche la décharge neuronale de se produire : le système est mis au repos. Au contraire, lorsque la sérotonine se lie aux récepteurs 5-HT₂ (*en violet, au centre*), le canal potassium se ferme, les ions potassium s'accumulent et la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane diminue : le seuil d'excitation du neurone est abaissé et les décharges facilitées ; le système est activé. C'est également le cas lorsque la sérotonine se lie aux récepteurs 5-HT₃ (*en vert, à droite*) : sous l'action du neuromédiateur, ce canal qui est un canal sodium s'ouvre, des ions sodium affluent dans le neurone, la différence de potentiel transmembranaire diminue et le système est activé.

de la dépression grave. La réserpine abaisse les concentrations cérébrales en sérotonine notamment, et cette expérience dramatique a montré qu'un déficit en sérotonine (ainsi qu'en dopamine et en noradrénaline) peut déclencher un état mental dépressif.

Une autre preuve des effets néfastes d'un déficit en sérotonine est apportée par les conséquences d'un régime carencé en tryptophane. On a démontré que l'organisme utilise pour synthétiser la sérotonine. Quand un patient est traité par un antidépresseur, son état s'améliore, mais si l'on supprime l'apport alimentaire de tryptophane, la concentration en sérotonine dans le système nerveux central diminue et l'état dépressif réapparaît.

Ainsi, la sérotonine est un neuro-médiateur clé aux troubles d'humeur, notamment à la dépression. Tandis qu'une baisse de la sérotonine risque d'entraîner un état dépressif, les inhibiteurs de la recapture qui augmentent la concentration en sérotonine dans la fente synaptique combattent les états

dépressifs. C'est par exemple le cas de la fluoxétine (Prozac®).

En bloquant les mécanismes de la recapture neuronale, les antidépresseurs augmentent la concentration extracellulaire en sérotonine. Nous avons rappelé que le neuro-médiateur est libéré tant par le corps cellulaire que par la terminaison, et la recapture a également lieu sur toute la membrane. Quand on bloque la recapture de la sérotonine, la molécule agit sur tous ses récepteurs, notamment sur l'autorécepteur somato-dendritique 5-HT_{1A} porté par le corps cellulaire (voir figure 4). Le seul effet de concentration en sérotonine qui stimule ce récepteur est rapidement annulé par la désensibilisation.

5-HT_{1A} est inhibiteur de la transmission sérotoninergique. Sa stimulation bloque l'émission des potentiels d'action, de sorte que le neurone présynaptique ne libère plus de sérotonine dans la fente synaptique.

Ainsi, paradoxalement, au début de traitement, un inhibiteur de la recapture de la sérotonine bloque la

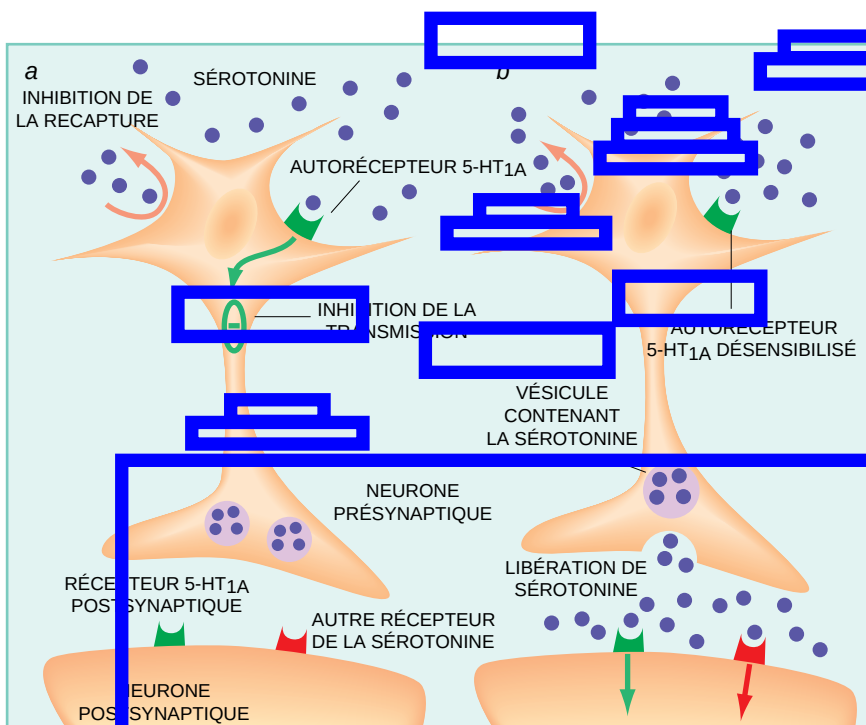
libération de sérotonine. Cependant, la concentration en sérotonine que l'on cherche à augmenter reste stable. L'état dépressif des patients traités ne s'améliore pas. En outre, cette action sur l'autorécepteur supprime les inhibitions comportementales. Dans le cas des patients déprimés ainsi traités, le risque de suicide peut augmenter.

Heureusement, au bout de quelques jours, leur état s'améliore : nous avons montré que l'autorécepteur, trop stimulé, finit par être désensibilisé, ce qui permet des concentrations de plus en plus élevées en sérotonine pour l'activer. Son action s'estompe, les potentiels d'action ne cessent à être réémis, la sérotonine est à nouveau libérée par le neurone présynaptique. Ce délai d'action semble compatible avec le laps de temps qu'il met un tel antidépresseur à agir (une quinzaine de jours).

Ces constatations ont abouti à la mise au point d'une combinaison de médicaments qui semble très efficace. C'est ainsi que Francesc Artigas et ses collègues de Barcelone ont associé un inhibiteur de la recapture de la sérotonine et un antagoniste de l'autorécepteur. Comme cet antagoniste bloque l'autorécepteur, la sérotonine ne s'y fixe pas, et le neurone présynaptique ne fonctionne pas. Effectivement cette combinaison améliore l'humeur des patients déprimés bien plus efficacement et plus rapidement que des traitements antidépresseurs qui inhibent seulement la recapture de la sérotonine.

De surcroît, elle semble même agir chez les patients dépressifs qu'aucun autre antidépresseur n'a soulagés. En coordonnant deux molécules qui agissent dans le même sens, on peut diminuer les doses, augmenter la sélectivité de l'action (si les quantités sont faibles, seuls les récepteurs à forte affinité pour la molécule sont occupés; en revanche, quand les doses augmentent, même les récepteurs dont l'affinité est moindre finissent par être activés). Dans tous les cas, des molécules qui augmentent la transmission des messages interneuronaux assurée par la sérotonine ont un effet antidépresseur.

Toutefois, l'équilibre est délicat à atteindre : quand la concentration en sérotonine est trop élevée, les récepteurs 5-HT_{1A} inhibiteurs sont saturés, et la sérotonine se lie aux récepteurs 5-HT₂ qui exercent une



4. ON TRAIT LA DÉPRESSION par des substances qui augmentent la concentration de la sérotonine dans le cerveau. Pour ce faire, on utilise des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine : d'une part, une partie de la sérotonine est détruite par des enzymes, une autre est recaptée par le neurone et réutilisée. Un inhibiteur de la recapture augmente la concentration extracellulaire en sérotonine, laquelle agit d'abord sur l'autorécepteur 5-HT_{1A} porté par le corps cellulaire du neurone présynaptique. Toutefois, ce récepteur est inhibiteur du système sérotoninergique, de sorte que la libération de la sérotonine est bloquée (a). Ainsi, dans un premier temps, un inhibiteur de la recapture de la sérotonine empêche la libération du neuro-médiateur dont la concentration n'augmente pas. Toutefois, au bout de quelques jours, l'autorécepteur est désensibilisé, le neurone présynaptique est activé et la sérotonine est libérée dans la fente synaptique (b). La transmission sérotoninergique est alors fortement augmentée.

action opposée à celle des récepteurs 5-HT_{1A}. On risque alors de déclencher un effet inverse de celui que l'on recherche.

Sérotonine et agressivité

On a constaté que les tentatives de suicide violentes sont plus nombreuses chez les patients dont les concentrations en métabolite de la sérotonine dans le liquide céphalo-rachidien sont faibles. De plus, la densité des récepteurs 5-HT₂ et 5-HT_{1A} est inférieure dans le cortex cérébral de personnes qui se sont suicidées : l'activité des neurones sérotoninergiques serait inférieure à la normale avant le décès (la baisse de l'activité des récepteurs de la sérotonine ne serait pas compensée par l'augmentation de leur nombre).

Chez les patients non déprimés qui ont des comportements agressifs, des troubles de la personnalité, tels une instabilité affective, un comportement hostile ou une faible tolérance à la frustration, on constate que les concentrations en métabolite de la sérotonine sont faibles dans le liquide céphalo-rachidien. On a également montré des dysfonctionnements sérotoninergiques dans les troubles du comportement alimentaire (boulimie), dans les troubles obsessionnels compulsifs (les patients ne peuvent s'empêcher de répéter inlassablement une action, se laver les mains, par exemple), chez les alcooliques, les pyromanes, les kleptomanes et les joueurs pathologiques. Malgré la diversité de leur expression, ces pathologies présentent un symptôme commun : tous les patients ont des difficultés à maîtriser leur impulsivité. De plus, elles sont sensibles aux traitements antidépresseurs, notamment aux inhibiteurs de la recapture de la sérotonine.

C'est par exemple le cas pour les troubles obsessionnels compulsifs qui cèdent à la clomipramine et à d'autres inhibiteurs de la recapture de la sérotonine. De surcroît, la buspirone, un agoniste des récepteurs 5-HT_{1A}, qui renforce

l'activité inhibitrice du système dépendant de ces récepteurs, semble avoir une action anxiolytique. Chez les patients schizophréniques, qui agissent à la fois sur les récepteurs 5-HT_{1A} et 5-HT_{1D}, par exemple l'etopazine, sont nommés « sérotoninergiques sédatifs » (ils sont en cours de développement pour le traitement de certains troubles de la personnalité, telles l'impulsivité, l'agressivité ou la violence).

Chez les alcooliques, les résultats sont moins nets : les inhibiteurs de la recapture de la sérotonine diminuent les accès de prise d'alcool ; on obtient

des résultats similaires avec des antagonistes 5-HT₂-5-HT₃.

Chez les personnes souffrant de troubles du comportement alimentaire, les accès de boulimie et les vomissements volontaires diminuent avec l'administration d'inhibiteurs de la recapture de la sérotonine. Utilisée dans le traitement de l'obésité, la d-fenflamine libère de la sérotonine. Elle exerce une activité anorexigène.

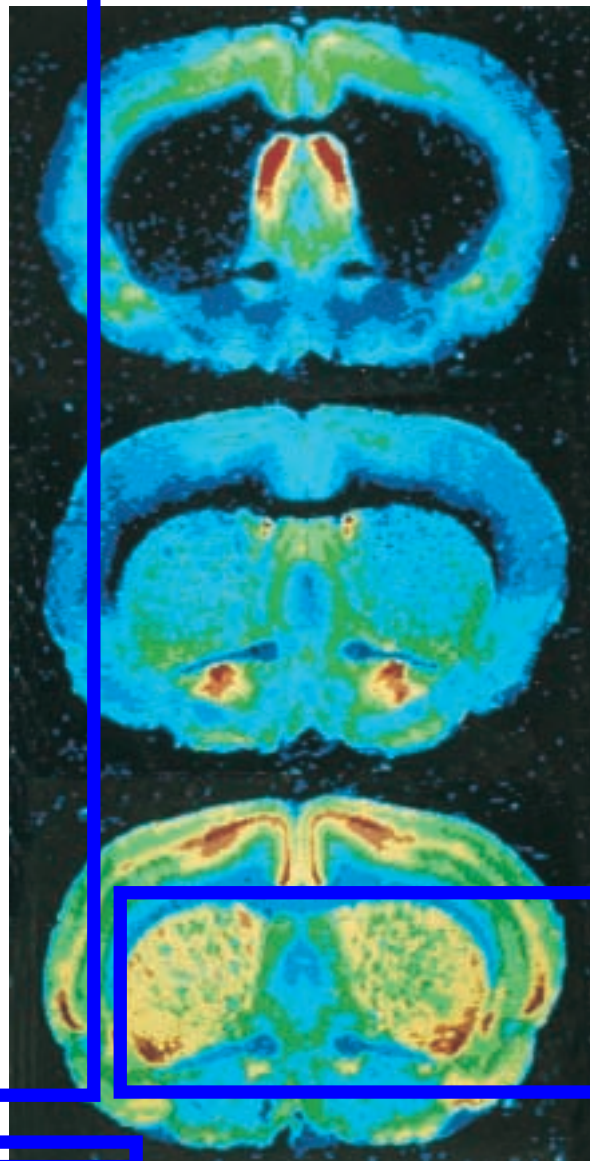
La stimulation des récepteurs 5-HT_{1D} et 5-HT_{2C}. Dans ces pathologies qui prennent souvent des formes diverses, une partie des effets thérapeutiques résulterait de l'amélioration du contrôle de l'impulsivité, laquelle semble dépendre de l'activité des systèmes sérotoninergiques centraux.

René Hen et ses collègues de l'Université de Strasbourg ont montré que les comportements agressifs sont exacerbés chez des souris transgéniques qui n'expriment pas le récepteur 5-HT_{1B} : ce récepteur équivaut au récepteur 5-HT_{1D} chez l'homme, il ne s'exprime pas chez les souris dont le gène codant ce récepteur a été modifié. Or, normalement, quand la sérotonine se lie au récepteur 5-HT_{1B}, elle met en jeu d'autres récepteurs 5-HT₁ (5-HT_{1A} et 5-HT_{1D}). Elle met en jeu les circuits sérotoninergiques qui aboutissent à une inhibition du passage à l'acte. Les souris dépourvues de récepteurs 5-HT_{1B} subissent une désinhibition comportementale et deviennent agressives.

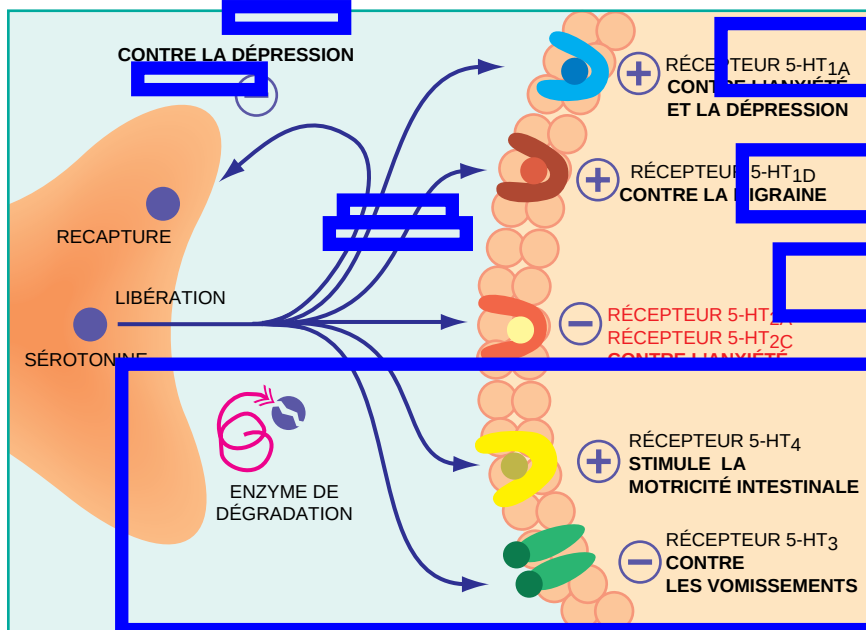
Sérotonine et anxiété

Les recherches menées sur les benzodiazépines, tels le diazépam (Valium®) et le lorazépam (Témesta®), qui inhibent l'activité du système sérotoninergique, ont conduit les neuropharmacologues à

émettre l'hypothèse que l'activité anxiolytique de ces substances résulterait d'une diminution de l'activité des neurones sérotoninergiques. L'efficacité de la buspirone (un agoniste des autorécepteurs 5-HT_{1A}) dans l'anxiété généralisée (une anxiété aboutissant



5. LA RÉPARTITION DES RÉCEPTEURS 5-HT_{1A} (en haut), 5-HT_{1B} (au milieu) et 5-HT_{2A} (en bas) a été obtenue sur un cerveau de rat par autoradiographie. Pour ce faire, on a utilisé des molécules marquées qui se fixent spécifiquement sur ces récepteurs. Les zones rouges correspondent aux densités maximales observées. Sur ces coupes, les récepteurs 5-HT_{1A} sont surtout localisés dans le septum et dans le cortex frontal (deux structures limbiques), les 5-HT_{1B} dans la substance noire et les 5-HT_{2A} dans le cortex.



6. PLUSIEURS MÉDICAMENTS agissent sur le système sérotoninergique (en bleu) : des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine soulagent la dépression ; de même, des inhibiteurs de l'enzyme monoamine oxydase A, qui normalement régule la sérotonine dans la fente synaptique, augmentent la concentration de ce neurotransmetteur et ont un effet antidépresseur. La stimulation des récepteurs 5-HT_{1A} par un agoniste (signe +) peut être efficace contre l'anxiété et/ou contre la dépression (selon la localisation cérébrale de ces récepteurs). La stimulation des récepteurs 5-HT_{1D} (intracrâniens, mais extracérébraux) soulage les crises migraineuses. Le blocage des récepteurs 5-HT₃ par un antagoniste (signe -) supprime les nausées et vomissements déclenchés par les substances anticancéreuses. Enfin, le blocage des récepteurs 5-HT_{2A} et/ou 5-HT_{2C} par des antagonistes (en rouge, en cours de développement) semble réduire certaines anxiétés pathologiques.

à un blocage comportemental), de même que celle des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine, qui agissent d'abord sur les autorécepteurs 5-HT_{1A}, dans les troubles paniques (sensation paroxystique de mort imminent) renforcent cette hypothèse.

De nombreuses études animales indiquent que divers types de récepteurs pourraient participer aux troubles anxieux et à leur traitement. D'après les résultats obtenus avec les agonistes partiels 5-HT_{1A}, la stimulation des autorécepteurs, donc la diminution de la transmission sérotoninergique, expliquerait son effet thérapeutique. Les agonistes partiels ont généralement une affinité plus marquée pour l'autorécepteur 5-HT_{1A} que pour la transmission sérotoninergique) que pour le récepteur 5-HT_{1A} postsynaptique. Toutefois, les agonistes 5-HT_{1A} à trois semaines à déclencher un effet thérapeutique dans l'anxiété généralisée, ce qui est proche du délai d'action des antidépresseurs, et qui correspond au temps nécessaire à la désensibilisation des autorécepteurs 5-HT_{1A}.

Dès lors, on s'interroge : l'effet thérapeutique associé à une diminution de la transmission sérotoninergique est-il dû à un effet présynaptique ou à un effet postsynaptique ? La question reste ouverte, mais on constate que les médicaments qui diminuent la concentration en sérotonine ou l'activité du système sérotoninergique calment l'anxiété et augmentent la résistance au stress.

À la différence des benzodiazépines, la sérotonine ne semble pas avoir d'effets secondaires importants. Elles ne semblent responsables ni d'accoutumance, ni de dépendance, ce qui est un avantage dans les traitements à long terme, même si leur utilisation récente ne permet pas encore de l'affirmer.

Le surmatriptan ne traverse pas la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau ; il inhibe les fibres sensorielles situées dans la paroi des vaisseaux extracérébraux de la tête. Il a aussi une action vasoconstrictrice directe sur le plasma, responsable de la douleur. Ses deux actions se complètent. Le sumatriptan soulage la crise migraineuse, mais ne la prévient pas. Au contraire, la dihydroergotamine, le

Sérotonine et migraine

heptadine (Périactine®), le propranolol et le pizotène sont utilisés en traitement de fond de la migraine. Ces substances sont toutes des antagonistes des récepteurs excitateurs 5-HT_{2C}, de sorte que les antagonistes spécifiques des récepteurs 5-HT_{2C} devraient aussi prévenir efficacement les crises migraineuses.

leur est libérée ; la sérotonine stimule les fibres nerveuses de la paroi des vaisseaux, lesquelles transmettent des messages douloureux. Aujourd'hui, on dispose notamment de deux médicaments pour soulager les crises de migraine : un ancien, la dihydroergotamine, et un récent, le sumatriptan.

La dihydroergotamine est un dérivé de l'ergot de seigle, une moisissure. Longtemps considéré comme un poison, il était responsable d'ergotisme, une maladie qui se manifestait par une gangrène des bras et des jambes, qu'il fallait amputer, et de convulsions parfois fatales. Toutefois, au Moyen Âge, la dihydroergotamine était aussi utilisée par les sages-femmes pour augmenter les contractions de l'utérus et accélérer l'accouchement.

Purifiée en 1978, la substance active de l'ergot de seigle fut nommée ergotamine. Son dérivé, la dihydroergotamine, est un puissant vasoconstricteur qui agit notamment sur les vaisseaux extracérébraux de la tête.

Après avoir constaté que la concentration du métabolite de la sérotonine augmentait dans les urines des patients souffrant de crises de migraine, on a montré que l'injection de sérotonine calmait les crises.

Les effets secondaires sont trop importants pour que l'on utilise cette substance à des fins thérapeutiques. Un nouveau composé, le sumatriptan, est un agoniste spécifique des récepteurs 5-HT_{1D} : cet agoniste déclenche une hyperpolarisation de la membrane, l'excitation de la terminaison diminue, ce qui inhibe la transmission du message douloureux.

Le surmatriptan ne traverse pas la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau ; il inhibe les fibres sensorielles situées dans la paroi des vaisseaux extracérébraux de la tête. Il a aussi une action vasoconstrictrice directe sur le plasma, responsable de la douleur. Ses deux actions se complètent. Le sumatriptan soulage la crise migraineuse, mais ne la prévient pas. Au contraire, la dihydroergotamine, le

heptadine (Périactine®), le propranolol et le pizotène sont utilisés en traitement de fond de la migraine.

Ces substances sont toutes des antagonistes des récepteurs excitateurs 5-HT_{2C}, de sorte que les antagonistes spécifiques des récepteurs 5-HT_{2C} devraient aussi prévenir efficacement les crises migraineuses.

Sérotonine, nausées et vomissements

De nombreuses études cliniques ont mis en évidence l'efficacité des antagonistes 5-HT₃ dans la prévention des nausées et des vomissements déclenchés par les traitements cytotoxiques, telles les chimiothérapies ou la radiothérapie (ils semblent sans effet sur le mal de mer). Le ondansetron (Zophren®), antagoniste dopaminergique, est un antiémétique (contre les vomissements) classique, et il a également des propriétés antagonistes 5-HT₃. Toutefois, il provoque des effets secondaires qui empêchent souvent d'administrer les doses élevées nécessaires à l'arrêt des vomissements.

On a donc cherché des antagonistes 5-HT₃ spécifiques, parce que les substances anticancéreuses déclenchent la libération massive de sérotonine par les cellules chromaffines de l'intestin. La sérotonine se fixe sur les récepteurs 5-HT₃ des fibres vagales du tractus gastro-intestinal qui subissent une stimulation notable (le système vagal commande toutes les fonctions végétatives, c'est-à-dire automatiques, tels le rythme cardiaque, la température corporelle, le rythme respiratoire, ou encore le réflexe du vomissement). En bloquant l'excitation des fibres vagales par la sérotonine, les antagonistes 5-HT₃ agissent tout au début de l'action réflexe.

Un récepteur, une action physiologique

Il serait simpliste de faire correspondre un type de récepteur et un trouble particulier. Mais, l'existence d'au moins une fonction sérotoninergique, un médicament peut rétablir un équilibre fonctionnel dans le système nerveux central. La normalisation du système sérotoninergique rétablit souvent les fonctions des systèmes dopaminergique et noradrénergique (d'autres systèmes essentiels de neuromédiateurs).

Si l'évolution des connaissances est étroitement liée à la découverte de ligands très spécifiques, on ne doit pas

RÉCEPTEUR	PRINCIPALES LOCALISATIONS	MODE D'ACTION DU RÉCEPTEUR	MÉDICAMENT ET INDICATIONS
5-HT _{1A}	Niveau du raphé, structures limbiques	Inhibiteur	Agoniste partiel : Anxiété, dépression et anxiété
5-HT _{1D}	Structures extrahypothalamiques	Inhibiteur	Agoniste : migraine
5-HT _{1E}	Tronc cérébral, striatum, hippocampe	Agoniste	?
5-HT _{1F}	Cortex frontal, Mésencéphale	Inhibiteur	?
5-HT _{1A}	Cortex frontal	Activateur	?
5-HT _{1B}	Dépression	Activateur	?
5-HT _{1C}	Bulbe rachidien	Activateur	?
5-HT ₂	Bulbe rachidien - Amygdale	Activateur	Antagoniste : vomissements
5-HT _{2A}	Substance noire - Hippocampe	Activateur	Agoniste : troubles de la motricité gastro-intestinale
5-HT _{2B}	Myocarde	Activateur	?
5-HT _{2C}	Structures limbiques	(Activateur)	?
5-HT _{2D}	Hypothalamus, structures limbiques	(Activateur)	?

7. LES DIFFÉRENTS RÉCEPTEURS DE LA SÉROTONINE ont été rassemblés, et l'on a indiqué leurs localisations principales, leur mode d'action (inhibiteur ou activateur des neurones qui les portent) et l'indication thérapeutique des médicaments déjà commercialisés (un antagoniste inhibe le récepteur sur lequel il se fixe, tandis qu'un agoniste l'active).

éliminer l'hypothèse selon laquelle les composés les plus efficaces seraient, au contraire, des substances moins spécifiques qui agiraient sur plusieurs récepteurs, voire sur plusieurs systèmes de neuromédiateurs.

l'étude de quelques récepteurs de la sérotonine, notamment les types 5-HT_{1A}, 5-HT_{1D}, 5-HT₂ et 5-HT₃, a permis aux neuropharmacologues de découvrir les mécanismes d'actions de divers psychotropes, notamment des antidépresseurs et des anxiolytiques, et de concevoir de nouveaux médicaments, tels le sumatriptan qui fait cesser la crise migraineuse, l'ondansetron (Zophren®) et le granisetron (Kytryl®) qui évitent les vomissements déclenchés par les traitements anticancéreux.

La découverte de la plupart des récepteurs de la sérotonine est récente, et toutes leurs propriétés n'ont pas encore été élucidées. Ainsi les récepteurs 5-HT₆ et 5-HT₇ sont-ils très peu étudiés. On a pu constater que certains antipsychotiques ne possèdent pas encore les modes d'action de ces récepteurs. De plus, les récepteurs 5-HT₄ semblent jouer un rôle notable dans le contrôle des neurones cholinergiques centraux, qui participent aux fonctions cognitives, notamment à la mémoire.

Par-delà le Prozac® et le sumatriptan, d'autres médicaments efficaces,

issus d'une connaissance approfondie du système sérotoninergique, le système du neuromodulateur aux multiples fonctions, ont été mis au jour. Enfin, l'intérêt porté aux systèmes sérotoninergiques centraux est renforcé par le fait que certaines drogues, telles que l'Ecstasy, provoquent une dégénérescence réversible des fibres sérotoninergiques, tandis que d'autres, tels le LSD, la cocaïne et l'alcool, modifient durablement le fonctionnement du système sérotoninergique.

Michel HADJON, dirige l'unité INSERM 288, Neurobiologie cellulaire et fonctionnelle, à la Faculté de médecine Pitié-Salpêtrière. Marie-Hélène THIÉBOT y est responsable des études comportementales.

M. HADJON, *La Sérotonine*, in *Neuropeptides et Neuromédiateurs*, coordinateur J. Epelbaum, Laboratoires Sandoz, 1992.

M. HADJON (coordinateur), *Central and Peripheral 5-HT₃ Receptors*, Academic Press, 314 pages, Londres, 1992.

E. ZITA, G. FILLION, *5-Hydroxytryptamine Receptors*, in *Pharmacological Reviews*, 44, pp. 401-458, 1992.

A.M. GARDIER, C. JACQUOT et F. ARTIGAS, *Base neurobiologique du rôle des récepteurs 5-HT_{1A} dans le mode d'action des antidépresseurs sérotoninergiques*, in *Médecine/Sciences*, n° 11, pp. 1407-1417, 1995.



Les éléphants de trait

MICHAËL SCHMITZ

En Asie, ils subsistent, parce qu'ils participent à l'exploitation forestière, tout en préservant l'environnement.

Dans les forêts d'Asie, les éléphants travaillent ensemble à l'exploitation des forêts, comme ils le font depuis plus de 100 ans. Un « oozie » n'a qu'un mot à dire, un geste à faire, une pression à exercer pour diriger son éléphant et lui faire por-

ailleurs, transportés par des machines. Si elle est maintenue, cette tradition garantira à la fois la survie des éléphants d'Asie et celle des forêts. En revanche, si elle disparaît, cette espèce majestueuse de mammifères serait vouée à l'extinction et une partie des plus anciennes forêts naturelles d'Asie deviendrait une exploitation forestière intensive.

Le Myanmar est le dernier pays à utiliser des éléphants pour l'exploitation forestière. Il y a 20 ans à peine, la Thaïlande possédait 4 000 éléphants, mais, ses forêts ayant été rasées au lieu d'être exploitées de façon viable, la plupart de ces animaux sont, aujourd'hui, sous-employés et mal nourris. Au contraire,



le respect de la tradition qui règne au Myanmar a permis de préserver les plus vastes étendues forestières du monde. Depuis 100 ans, les arbres à abattre sont sélectionnés, et le transport des rondins est assuré par des équipes d'hommes et d'éléphants ; cette méthode de gestion a préservé de vastes zones forestières robustes et très productives.

En exploitation forestière, les éléphants ont plusieurs avantages écologiques : ils peuvent emprunter des sentiers forestiers étroits, ce qui évite la construction d'un réseau dense de routes forestières. Or ces routes endommagent l'écosystème situé à proximité, et elles fournissent aussi des voies d'accès à la forêt. Les éléphants, en marchant, ne brûlent pas la terre brûlée, laissent derrière eux des terres arides et stériles ; elles permettent également aux braconniers de s'enfoncer au cœur des forêts, où ils traquent des animaux menacés d'extinction. D'autre part, les éléphants se nourrissent d'un « carburant » écologique, renouvelable et bon marché, tandis que les tracteurs consomment de grandes quantités de carburant polluant et coûteux ; leurs chenilles écrasent tout sur leur passage, bloquant la repousse de la végétation.

Si les équipes d'hommes et d'éléphants n'endommagent pas l'environnement, elles ne sont pas aussi efficaces que les véhicules automobiles, que de nombreuses entreprises d'exploitation forestière étrangères préfèrent. Pour compenser la lenteur de ces équipes, il faut abattre des milliers de troncs nécessaires, on doit utiliser beaucoup d'éléphants. Aujourd'hui, 5 700 éléphants sont ainsi employés au Myanmar ; c'est un nombre minimum pour la pérennisation du système.

En 1992, Khyne U Mar, vétérinaire de l'exploitation forestière du Myanmar, a contacté le zoo de Portland, dans l'Oregon, parce qu'elle cherchait à maintenir constant le nombre des éléphants de trait du pays. Naguère, les nouvelles recrues (des éléphants âgés de 12 à 18 ans) prove-

naient de la région de la Sibirie. Mais les éléphants sauvages sont aujourd'hui trop petites, même dans les grandes forêts du Myanmar, qui en abriteraient environ 5 000, pour que l'on puisse capturer des animaux pour l'exploitation forestière.

Entre 200 et 300 éléphants quittent l'exploitation chaque année, en raison de leur âge, de blessures ou parce qu'ils meurent. La progéniture du groupe s'élevant à 200 éléphants par an, on doit favoriser leur reproduction si l'on veut maintenir leur nombre.

Au zoo de Portland, on a mis au point un programme de reproduction des éléphants captifs. En appliquant nos méthodes de reproduction aux éléphants du Myanmar, nous pouvions préserver cette espèce menacée. Les éléphants utilisés dans l'exploitation forestière représentent près de 15 pour cent de tous les éléphants d'Asie, sauvages et domestiques. Si l'on parvient à maintenir leur nombre, la population d'éléphants restera assez diversifiée, d'un point de vue génétique, pour que les descendants soient robustes.

Si on oublie les éléphants forestiers, on oublie une espèce en disparition plus facile à protéger que le tigre, le guépard ou le loup. Toutefois, élever des éléphants, même dociles dans leur habitat naturel pose quelques difficultés. Même si les cinq inséminations artificielles que nous avons pratiquées n'ont pas donné de résultats, nous espérons pouvoir aider les éléphants du Myanmar à se reproduire. Nous sauverons alors ces animaux et la tradition de l'exploitation forestière. Le sort de ces géants se jouera au cours des 20 prochaines années.

LES EMPLOYÉS de l'Exploitation forestière du Myanmar ont été rassemblés pour cette photographie. Les éléphants transportent souvent les troncs d'arbres, posés en équilibre sur leurs défenses et maintenus en place par la trompe (en haut à gauche).





POUR TIRER DES RONDINS de teck sur le sol (ci-dessus) et pour traverser les rivières (à droite), les éléphants se contentent de sentiers ; contrairement aux tracteurs, ils n'ont pas besoin de routes. Certains troncs sont transportés par les torrents de montagne jusqu'au fleuve Irrawaddy, où ils sont rassemblés en vastes radeaux et transportés à Yangôn (anciennement Rangoon). Une fois sortis des forêts, les rondins sont chargés sur des camions.

Les éléphants doivent être habiles pour éviter de se blesser en transportant ces troncs massifs. Sensibles aux insulations, ils ne peuvent travailler que le matin ou en fin d'après-midi ; ils ne travaillent pas du tout pendant la saison la plus chaude, de mars à mai.



L'insémination artificielle d'un éléphant

Les éléphants femelles n'ont que trois périodes d'œstrus par an. Toutefois, aucun signe extérieur ne signale ces moments où elles peuvent être inséminées. Les imperceptibles modifications des concentrations sanguines en progestérone doivent être recherchées chaque semaine, voire chaque jour. Pendant la mousson, au Myanmar, il est déjà arrivé que les personnes transportant les échantillons sanguins à Yangon aient à traverser des fleuves en crue pour parvenir jusqu'à l'Institut de recherches médicales, qui dose la progestérone.

On doit connaître les périodes d'ovulation des femelles pour les inséminer artificiellement. Les femelles domestiques s'habi-

tuent rapidement au tube d'insémination flexible long de 1,5 mètre, qui respecte leur anatomie (sur la photographie, l'auteur observe le vagin de l'éléphant au moyen d'une fibre optique). On recueille le sperme d'éléphants mâles domestiques en utilisant un vagin artificiel de taille adaptée. On tente de mettre au point une méthode fiable pour congeler le sperme d'éléphant dans de l'azote liquide, afin de constituer une banque de sperme.

Grâce à une telle banque, on pourrait enrichir le patrimoine génétique des groupes d'éléphants disséminés sur tout le continent asiatique en leur apportant de nouveaux gènes : le transport de sperme d'éléphant est plus aisé que celui d'un éléphant !



LES OOZIES, ou dresseurs d'éléphants (à droite), utilisent une trentaine d'ordres différents pour communiquer avec leur éléphant. La plupart des éléphants obéissent à plusieurs oozies, mais quelques-uns n'obéissent qu'à un seul maître. Les oozies qui conduisent les éléphants les plus difficiles à contrôler ont un statut supérieur.

LES ABRIS (à gauche) où sont rangés les attelages servant au transport du bois sont souvent les endroits où l'on selle les éléphants. À la fin de la journée, on leur donne du riz cuit salé et, la nuit venue, on les lâche dans la forêt pour qu'ils y cherchent de la nourriture. À quatre heures du matin, l'oozie part chercher son éléphant et le retrouve grâce au son caractéristique de la cloche qu'il porte. Autrefois, quand les éléphants sauvages étaient plus nombreux, ils s'accouplaient souvent avec les femelles domestiques libérées pendant la nuit.





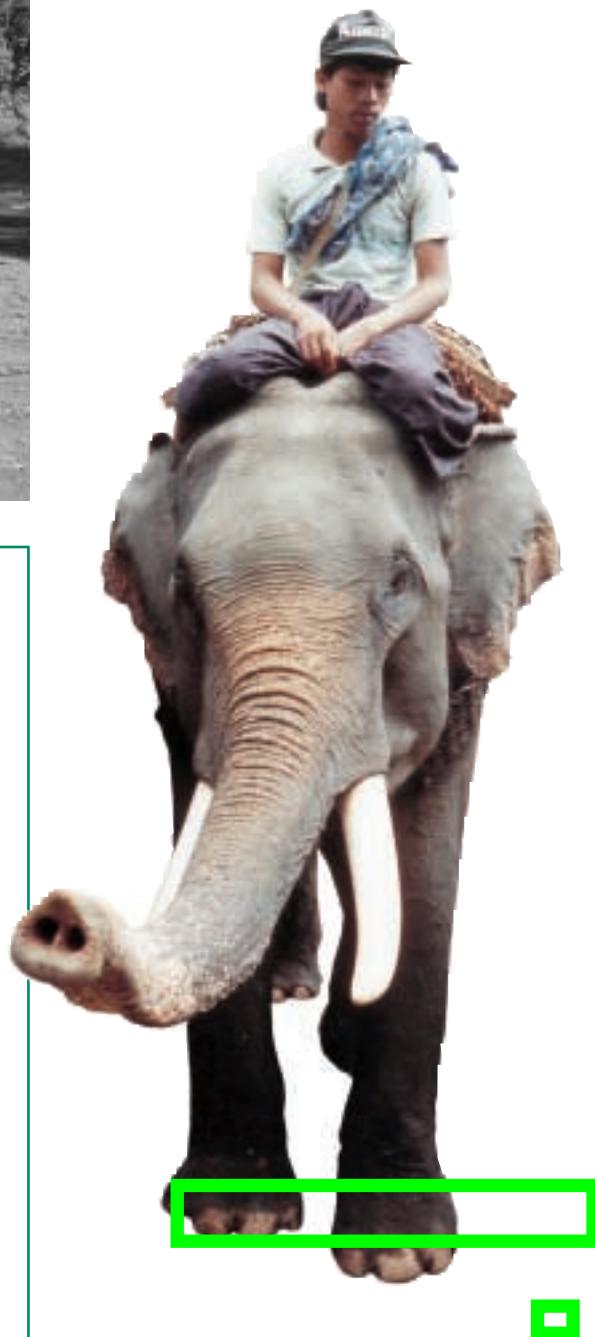
Seller un éléphant

La colonne vertébrale de l'éléphant doit être protégée des blessures qui risquent de survenir quand l'animal tire des troncs d'arbre de plus d'une tonne. Un coussin de feuilles et d'écorce sert de protection épaisse et moelleuse, sur lequel repose l'attelage. Cette « selle » empêche la chaîne de s'enfoncer dans le dos de l'éléphant. L'oozie s'assied sur le cou de l'animal. Ces photographies, prises par l'auteur dans un camp d'exploitation en Thaïlande (à droite) montrent comment les éléphants sont sellés, selon une tradition séculaire.





LE BAIN est un rituel quotidien qui peut durer une heure. C'est un moment privilégié, pendant lequel l'oozie frotte son éléphant, le lave et noue des liens avec lui. Les éléphants vivant en moyenne entre 50 et 60 ans, parfois même jusqu'à 80 ans, cette relation peut durer toute une vie.



Michael SCHMIDT est vétérinaire au zoo de Portland.

La couverture

IAN STEWART

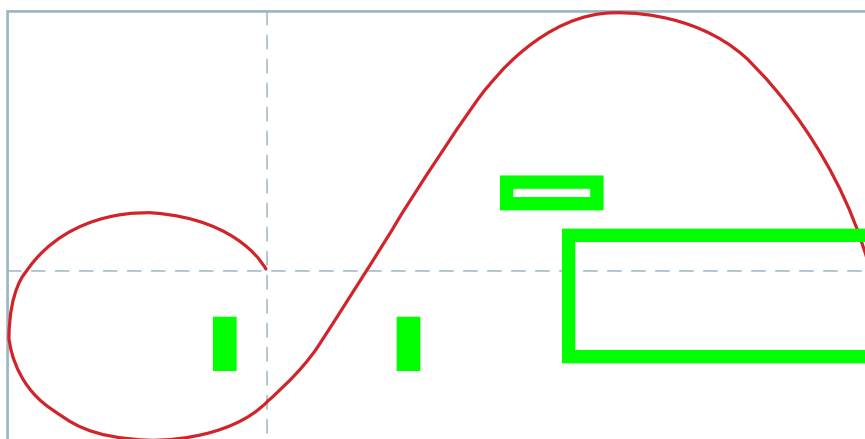
Quelle est la plus petite surface recouvrant une courbe de longueur unité ?

Le problème de la «Couverture de maman Ver» consiste à déterminer la plus petite surface à deux dimensions capable de recouvrir toute courbe d'un seul tenant de longueur unité. Cette singulière appellation s'éclaire quand on considère que la surface est une couverture et la courbe comme un bébé ver endormi. Sa mère a besoin de ce que nous appellerons une couverture universelle – une couverture qui recouvre bébé ver quelle que soit sa position. Il y a quelques décennies, le mathématicien Leo Moser, de l'Université de l'Alberta, au Canada, posa une question déconcertante, restée jusqu'à ce jour sans réponse : quelle est la forme de la couverture universelle d'aire minimale ?

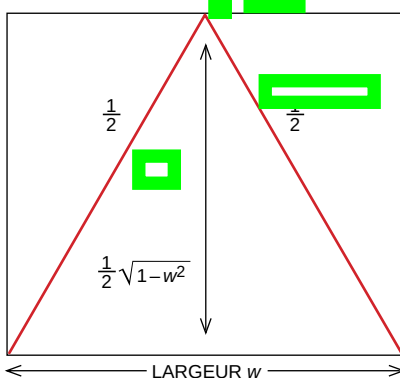
Pour le problème général, une solution évidente est un disque circulaire de rayon unité, dont l'aire est π , soit 3,141... Si le centre du disque est placé sur la tête

de bébé ver, sa queue est au plus à une unité de distance. En 1973, Jnarnetk Gerriets et George Pool, de l'Université d'État d'Emporia, décrivent une couverture pentagonale n'ayant qu'une aire de 0,28... Jusqu'à récemment, personne ne fit mieux. Mais, il y a quelques mois, David Reynolds, de la *Credence Systems Corporation*, à Beaverton, Oregon, me fit parvenir une démonstration selon laquelle une couverture en forme d'un certain quadrilatère d'aire $(4 + \sqrt{3})/24$, environ 0,239, est universelle.

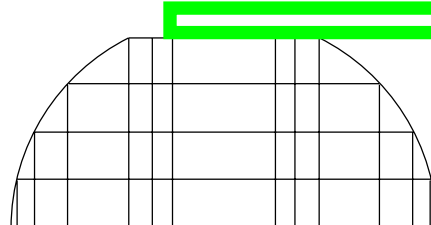
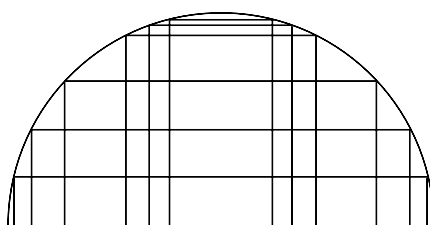
Résultat dramatique : une certaine variation de sa méthode pourrait conduire à des couvertures universelles encore plus petites. Toutes les solutions seront les bienvenues dans «Réaction», mais, s'il vous plaît, joignez une démonstration – ou une solide preuve expérimentale – du caractère universel de votre surface.



← LARGEUR →



1. On associe des parcelles rectangulaires pour recouvrir toute courbe de longueur un (en haut). La parcelle la plus grande est celle qui doit recouvrir les deux côtés égaux d'un triangle isocèle (à gauche). La famille formée par la totalité de ces parcelles peut être disposée de sorte qu'elles recouvrent un demi-cercle (au centre). Et l'on peut encore en rogner le sommet pour obtenir une couverture universelle d'aire encore plus petite (à droite).



LE PATCHWORK

Pour illustrer la méthode de D. Reynolds, nous allons l'utiliser pour montrer qu'un demi-cercle de diamètre unité – de surface $\pi/4$, environ 0,392 – est universel. Étant donné une position du bébé ver, traçons le segment joignant sa tête et sa queue ou, s'il s'est lové en boucle, un segment quelconque coupant son corps). Puis trouvons le plus petit rectangle entourant le bébé ver ayant deux côtés parallèles au segment (voir la figure 1). Appelons le rectangle une parcelle. Sa largeur, w , est comprise entre 0 et 1. Pour chaque valeur de w , nous pouvons estimer la hauteur du rectangle. La plus grande hauteur pour toute parcelle, égale à $\sqrt{1-w^2}/2$, est obtenue lorsque le bébé ver s'endort en forme de triangle isocèle.

Nous avons ainsi identifié une famille de parcelles, une pour chaque w , qui est «correctement» universelle. Quelle que soit la manière dont bébé ver s'est lové, une ou moins de ces parcelles le recouvre. Nous pouvons construire une couverture universelle en les surimposant. D. Reynolds appelle cette opération le patchwork de bébé ver, encore qu'elle évoque plutôt un recouvrement : les bords n'ont pas besoin d'être jointifs et, en fait, plus ils se recouvrent et mieux c'est. Qu'importe la manière dont les parcelles sont arrangées, la région qu'elles recouvrent est toujours universelle. Pour voir cela, imaginons que le bébé ver se soit enroulé et trouvons alors une parcelle qui le recouvre. Comme le patchwork de bébé ver contient cette parcelle, il recouvrira le bébé ver.

Notre tâche suivante est de recouvrir les parcelles pour obtenir l'édredon minimal. Si elles sont disposées symétriquement et à bases alignées, elles couvrent un demi-cercle de rayon unité. En conséquence, un tel demi-cercle est bien universel. Mais il n'y a pas de raison spéciale de choisir cet arrangement, ni de prendre des parcelles rectangulaires, et enfin il n'est pas indispensable d'utiliser la totalité des largeurs, de 0 à 1.

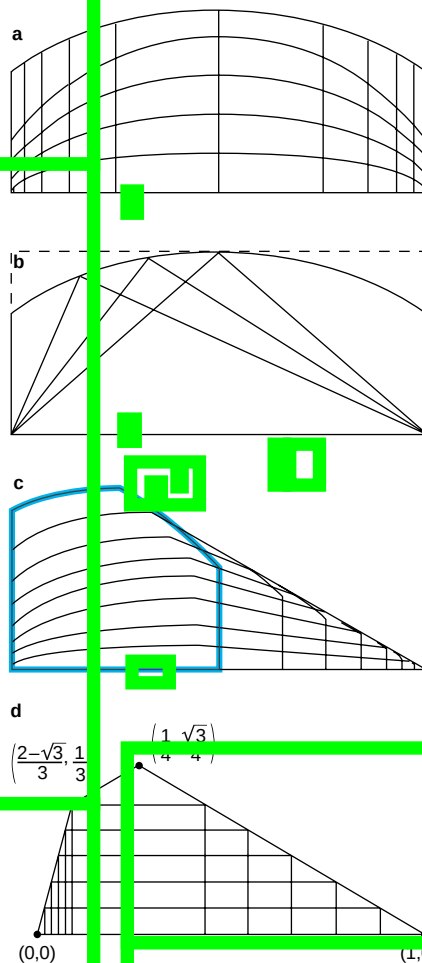
2. On obtient des couvertures plus petites (a) avec des parcelles ayant un bord elliptique (b). Quand on examine comment bébé ver peut se lover sous la couverture, on obtient des améliorations supplémentaires (c). La plus petite couverture connue a une aire égale à 0,299... (1)

Lorsque $w = \sqrt{5}/5$, la parcelle est carrée, et toute parcelle de hauteur supérieure à $\sqrt{5}/5$ peut être tournée de 90 degrés, après quoi sa nouvelle hauteur est inférieure à $\sqrt{5}/5$. Si l'on omet ces dernières parcelles dans le demi-cercle, on réduit ce dernier à une zone aplatie, d'aire réduite, mais qui reste universelle.

Un raisonnement à peine plus complexe impliquant de faire tourner bébé ver lui-même conduit D. Reynolds à conclure qu'en fait on peut retirer toutes les parcelles pour lesquelles w est inférieur à $1/2$. Qui plus est, la hauteur maximale de la parcelle n'est nécessaire qu'au milieu, et chaque parcelle peut être limitée par un arc d'ellipse. Quand on tient compte de ces améliorations, on obtient la couverture représentée sur la figure de droite. À première vue, il peut sembler que nous ayons poussé la méthode à son extrême limite, mais la couverture peut encore être rognée. Ainsi, si bébé ver touche la limite elliptique de la parcelle, disons à gauche de son milieu, alors il ne peut la toucher aussi à droite. De la sorte, nous pouvons éliminer une partie du coin supérieur droit de chaque parcelle. La réunion des parcelles résultantes conduit à une couverture limitée par un arc d'ellipse et trois segments.

En construisant ces parcelles, nous avons supposé que la tête et la queue de bébé ver restaient en quelque sorte fixées sur le sol. L'arc elliptique de la frontière provient d'une seule parcelle, celle de largeur $1/2$ (représentée en bleu sur l'illustration c à droite). Mais tout ver recouvert par cette parcelle peut être glissé vers l'extrémité droite de la couverture, où il reste beaucoup d'espace libre. En envisageant plusieurs formes clés pour le ver, D. Reynolds montra que l'arc d'ellipse et le segment vertical de notre précédente couverture pouvaient être remplacés par deux segments de droites. Le résultat est une couverture d'aire de seulement 0,239... comme nous l'avons mentionné.

Lorsqu'on approfondit ce type d'optimisation géométrique, il est souhaitable de garder à l'esprit qu'il peut ne pas exister de solution optimale. Même si l'on trouve une suite de solutions, chacune meilleure que la précédente, une telle suite peut ne pas converger ou converger vers quelque chose qui ne soit pas optimal. Richard Courant et Herbert Robbins introduisirent un bon exemple de ce cas dans leur ouvrage classique *What*



Is Mathematics? C'est un problème que j'appelle : «La tente de maman mouche». Bébé mouchette doit surmonter plus, une patte tendue en l'air. Sa maman le recouvre d'une couverture qui, tene une tente, touche le sol de tous côtés. Quelle tente a-t-elle la plus petite ?

Une tente conique à base circulaire convient et, à hauteur donnée, sa sur-

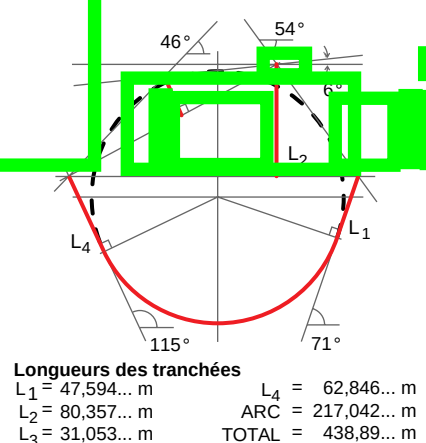
face décroît lorsque celle de sa base décroît. En fait, on peut trouver une tente d'aire aussi petite que l'on veut, ce qui est impossible. Un cône de base d'aire 0 n'est pas une surface, mais un segment de droite, de sorte qu'il ne saurait recouvrir bébé mouche en un sens raisonnable. Ainsi, pour la «tente de maman mouche», il n'y a pas de solution optimale – si l'on exige que la tente soit une surface.

Aussi n'est-il pas évident que «la couverture de maman ver» ait une solution définitive. Cela dépend du type de couverture que l'on considère. Tous les vers polygonaux de longueur 1, par exemple, peuvent être recouverts par une couverture d'aire nulle. De telles couvertures existent en grand nombre, mais elles sont pleines... de trous : le problème pourrait alors être plus adéquatement désigné comme «Fait de maman anguille». À l'opposé, John Marstrand, de l'Université de Bristol, Angleterre, prouva en 1979 qu'aucune couverture d'aire nulle ne saurait couvrir tout ver régulier (par régulier, j'entends une courbe ayant une tangente en tout point). Le résultat de J. Marstrand suggère que la couverture de maman ver possède une solution bien définie, une solution intéressante. Peut-être bien celle de D. Reynolds.

Mais les mathématiciens amateurs ne peuvent encore trouver du plaisir à essayer d'en trouver de meilleures. Qui plus est, le problème admet de nombreuses variations, presque toutes non résolues : existe-t-il une couverture universelle de périmètre minimum ? Et que faut-il penser de «Sac de couchage de bébé serpent», un sac qui doit contenir un serpent de longueur un, quelle que soit la manière dont il se contorsionne en trois dimensions ? Et pouvez-vous examiner le problème des vers qui vivent à la surface d'une sphère ?

Réaction

John Darr, de Columbus, Ohio, m'envoie une série de lettres à propos de «Un dron peut en cacher un autre» (*Pour la Science*, n° 216 et «Réaction» *Pour la Science*, n° 219). Il propose d'abord une solution à deux tranchées de longueur totale 440,64... mètres, qui améliore celle indiquée dans «Réaction» de *Pour la Science*, n° 219. Mais sa lettre indique une solution avec trois tranchées, encore meilleure puisque sa longueur totale est de 43,89... mètres (représentée ci-contre). Quelqu'un proposera-t-il une meilleure solution à quatre tranchées ?



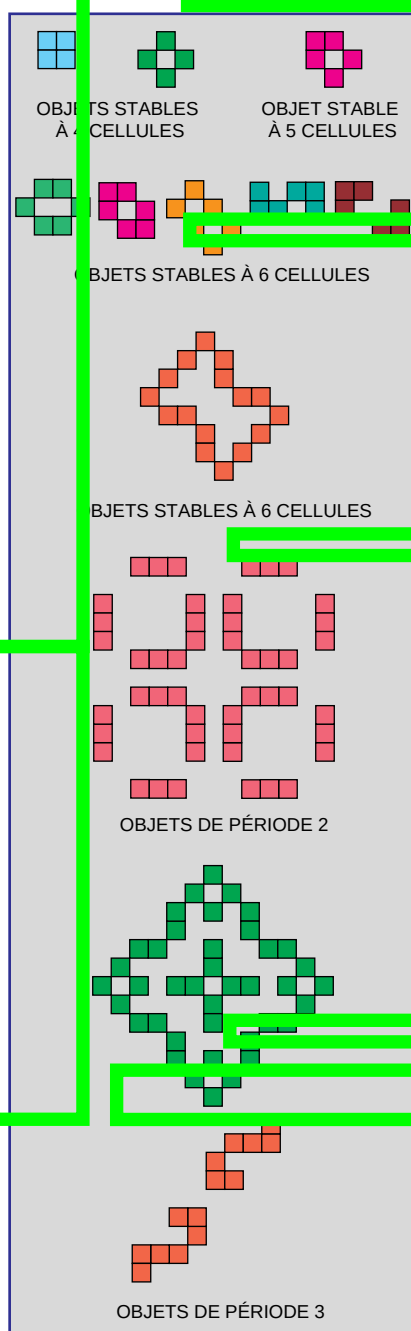
Le Jeu de la vie, toujours vivant...

JEAN-PAUL DELAHAYE

Depuis 25 ans, les biologistes du Jeu de la vie explorent une planète riche et étrange.

John Conway fixa les règles du *Jeu de la vie* il y a 25 ans et créa une science nouvelle. Depuis, les spécialistes ont poursuivi l'exploration d'un monde dont la définition tient en trois lignes, mais dont la richesse semble inépuisable. La discipline est à la croisée des chemins de la physique – on y construit des machines –, de la biologie – les êtres qu'on y étudie sont des cellules qui naissent et meurent –, des mathématiques – on y prouve parfois des théorèmes – et de l'informatique – les ordinateurs y jouent le rôle de microscopes. Ces cinq dernières années, une bande de passionnés du jeu a beaucoup fait progresser la discipline. Le monde du *Jeu de la vie* est un plan infini quadrillé dont chaque case est, soit occupée par une cellule, soit vide. Chaque case possède huit voisins et, d'une génération à l'autre, des naissances et des décès s'y déroulent mécaniquement selon la règle simplissime de Conway : si une case est vide et que trois de ses voisins sont occupées, alors une naissance s'y produit (étrange sexualité!) ; si une case est occupée, la survie n'y est possible que si deux ou trois cases voisines sont occupées ; dans tous les autres cas, la case se retrouve vide à la génération suivante. En résumé, naissance si 3 voisins, survie si 2 ou 3 voisins.

Ces règles, choisies parce qu'elles sont assez naturelles (la vie nécessite déjà de la vie, mais trop de vie provoque l'étouffement) et qu'elles engendrent un monde inattendu, ont dépassé toutes les espérances de son créateur. Toutefois les mathématiciens, qui savent traiter des problèmes d'une abstraction et d'une difficulté étourdissante, sont assez démunis pour résoudre la plupart des problèmes que pose cette biologie : lorsqu'ils les résolvent, c'est d'une façon peu satisfaisante, comme nous allons le voir. Cet incapacité laisse le champ ouvert aux étranges ingénieurs-biologistes à qui l'on doit les progrès récents que nous allons présenter.



1. Configurations stables et configurations périodiques du *Jeu de la vie*.

CROISSANCES INFINIES ET CROISSANCES RAPIDES

Après avoir constaté que certaines figures (configurations de cellules) sont stables, que d'autres sont périodiques (on en connaît des centaines maintenant), diverses questions se posent. La première est : une population de cellules peut-elle croître indéfiniment?

La réponse, positive, a été donnée dès 1970 par des étudiants du MIT ; cependant de nouvelles démonstrations plus simples de ce résultat sont disponibles et la figure 2 en indique deux tout à fait amusantes trouvées en 1992 et 1993 : l'*Extenseur* et le *Chasse-neige*.

A chaque fois, ces configurations avancent en laissant derrière elles une traînée. Cette traînée, stable pour le *Chasse-neige*, est en mouvement périodique pour l'*Extenseur*. Si vous placez un obstacle sur le chemin de ces configurations, ne serait-ce qu'un bloc de quatre cellules formant un carré (c'est la configuration stable la plus simple), sa rencontre avec le *Chasse-neige* ou la tête de l'*Extenseur* détruira celui-ci, ainsi que toute la traînée qui s'embrase à toute vitesse, laissant, après s'être consumée, des débris éparpillés.

Le *Chasse-neige* ou l'*Extenseur* créent un nombre de cellules de plus en plus grand (s'il ne rencontre pas d'obstacles), mais le nombre de cellules vivantes augmente que proportionnellement au temps (on dit aussi « en t ») et les cellules n'occupent qu'une petite partie de l'espace infini du plan (une bande étroite). Les questions suivantes viennent donc à l'esprit :

- Peut-on créer une configuration qui se répand petit à petit sur tout le plan avec une densité positive (par exemple, une case occupée sur deux) ?
- Peut-on créer une configuration dont le nombre de cellules augmente plus vite que le temps ?

La réponse positive à ces deux questions est donnée par une extraordinaire machine appelée le *Recouvreur-du-plan*, qui est représentée sur la figure 3 et qui n'est connue que depuis 1993. À mesure des générations, les quatre têtes de pont du *Recouvreur-du-plan* avancent, créant un carré occupé par des bandes alternant vides et pleines qui sont stables et recouvrent la surface avec une densité de cellules de $1/2$. Comme les têtes de pont avancent à vitesse constante, la zone recouverte a une surface qui croît en fonction du carré du temps (on dit « en t^2 ») et donc, le nombre de cellules vivantes croît lui aussi « en t^2 ». Une configuration dont la croissance est « en t^2 » était déjà connue depuis les années 1970, mais elle faisait intervenir

2 069 cellules, alors qu'ici il n'y en a que 206. Tim Coe a découvert en 1995 une variante du *Recouvreur-du-plan* à 187 cellules.

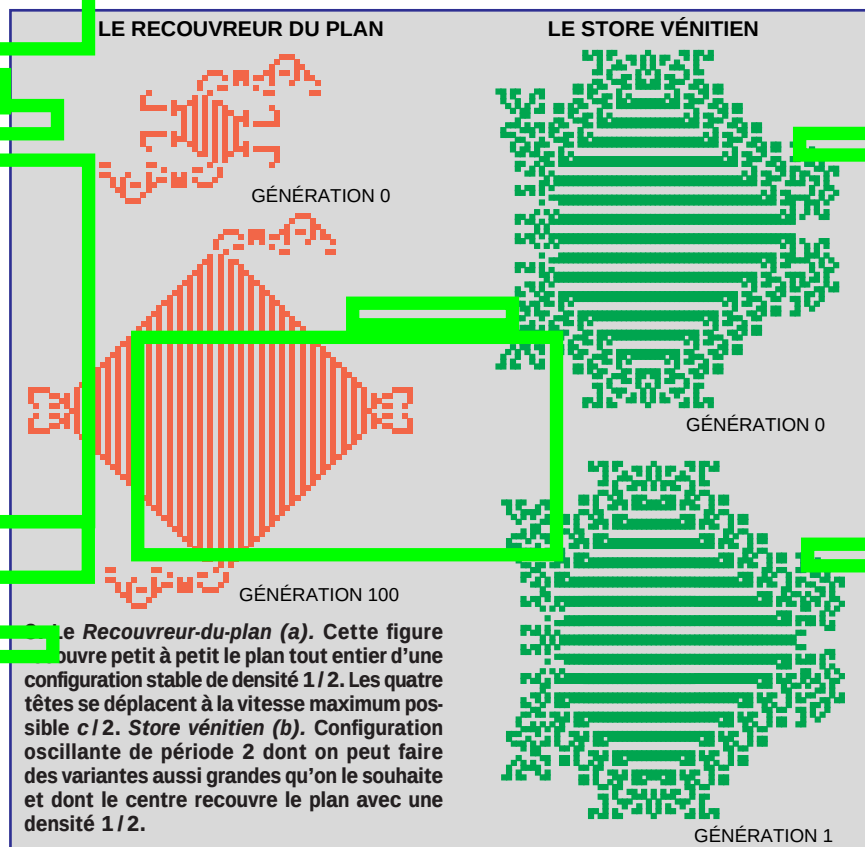
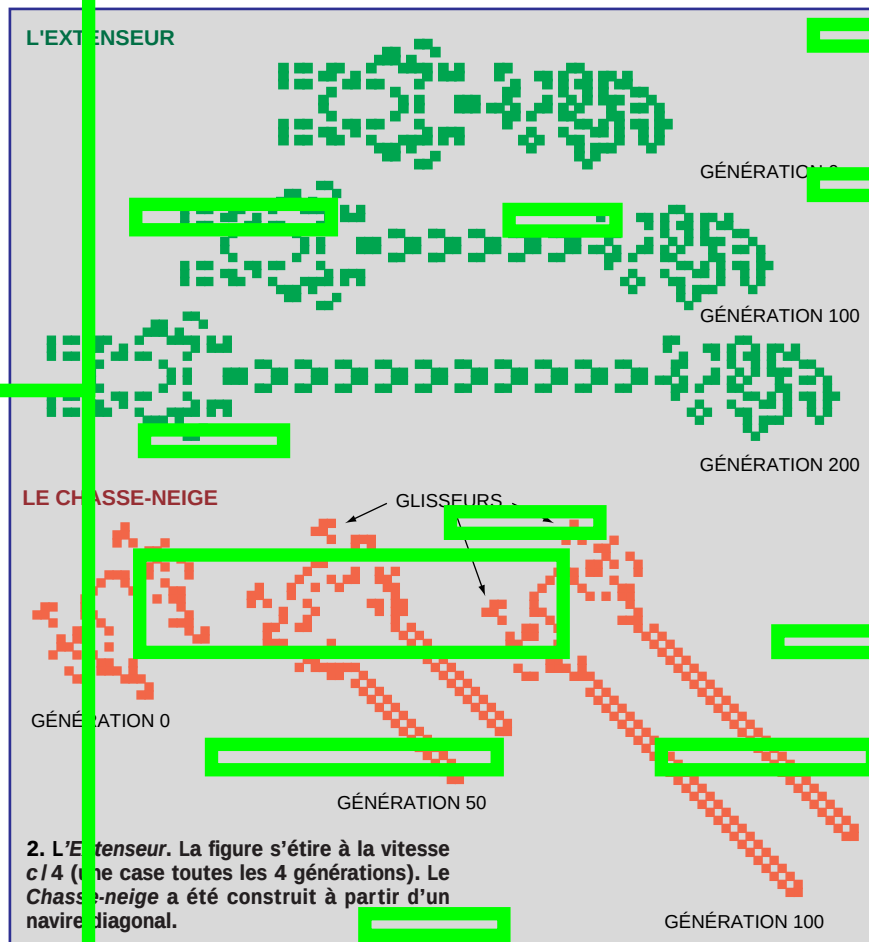
La configuration limite du *Recouvreur-du-plan* est une figure stable de densité $1/2$: un réseau de lignes pleine-vider-vider-... Le réseau infini de lignes vide-vider-pleine-pleine-vider-vider-pleine-pleine-... est aussi intéressant, car il oscille : à chaque génération, les lignes pleines se vident, et les lignes vides se remplissent. Il s'y maintient donc aussi une population infinie de densité $1/2$. Une version finie de cette configuration existe, c'est le *Store vénitien* représenté sur la figure 3. Cette configuration périodique de période deux montre qu'on peut recouvrir de manière permanente un carré à bords obliques par une population de densité $1/2$, un fait qui était loin d'être évident avant que l'on n'ait découvert la délicate broderie qui en stabilise les bords.

On démontre facilement que la croissance d'une configuration ne peut pas être plus rapide que « en t^2 », et donc le *Recouvreur-du-plan* est ce qui permet d'obtenir la croissance la plus rapide imaginable. L'art des ingénieurs du monde de Conway s'est exercé sur ces problèmes de croissance. À l'aide de combinaisons savantes de composants mis au point année après année depuis 25 ans, ils ont construit des objets aux taux de croissance remarquables et qui comportent plusieurs centaines de cellules, parfois plusieurs milliers. Ils ont ainsi obtenu des croissances « en $\sqrt{t}$ », « en $\log t$ » (le nombre de naissances diminue petit à petit) et « $\log t$ » « en $(\log t)^2$ », en « $\sqrt{t}$ ». Plus amusant encore, ils ont réussi à faire croître la population d'une configuration linéairement en $C.t$, avec pour constante C le nombre irrationnel $(8 - 31\sqrt{5})/10$: la configuration calcule donc des approximations de plus en plus fines de $\sqrt{5}$.

DENTS DE SCIE, PUFFEURS ET NAVIRES

Autres merveilles, les configurations *dents de scie*, qui sont conçues d'une façon telle que le nombre de cellules augmente puis diminue, puis augmente puis diminue, etc. les maxima atteints étant de plus en plus grands (les effectifs constituent ce que les mathématiciens appellent une suite n'ayant pas de limite). La plus simple des configurations *dents de scie* connue – qui n'est pas si simple que cela! – est représentée à la figure 4, et son subtil fonctionnement y est décrit.

La plus petite configuration dont on puisse prouver qu'elle s'étend indéfini-



ment comporte initialement 11 cellules et est représentée à la figure 5. Elle fut découverte par Charles Corderman, qui menait une recherche exhaustive sur les configurations simples. Il existe d'autres configurations qui semblent survivre longtemps et s'étendre petit à petit, mais elles ont un comportement tellement irrégulier qu'on ne réussit pas à prouver leur croissance illimitée. La figure découverte par Corderman a contribué au regain d'intérêt pour le *Jeu de la vie*, qui s'est manifesté depuis cinq ou six ans. Voici pourquoi.

La configuration de Corderman est ce qu'on appelle un *puffeur*, c'est-à-dire une configuration qui se déplace en laissant derrière elle des débris qui forment une sorte de grand zigzag composé de blocs carrés stables (voir la figure 5). Lorsque les traces sont régulières

(comme c'est le cas pour l'*Extenseur* et le *Chasseur-neige*, qui sont aussi des puffeurs), on peut essayer de modifier le puffeur de façon à ce que les débris soient réguliers. Le puffeur devient alors un *navire* : une configuration qui se déplace.

Inversement, à partir d'un navire, on peut souvent construire des puffeurs. La configuration de Corderman semblait donc pouvoir donner naissance à des navires. Mais c'est seulement en avril 1991 que Dean Hickerson réussit cette transformation que les passionnés avaient tentée sans succès pendant de nombreuses années. La transformation en navire n'est en rien évidente, puisque le résultat comporte maintenant 180 cellules, mais le travail en valait la peine, car le navire obtenu est d'un genre inconnu jusqu'alors.

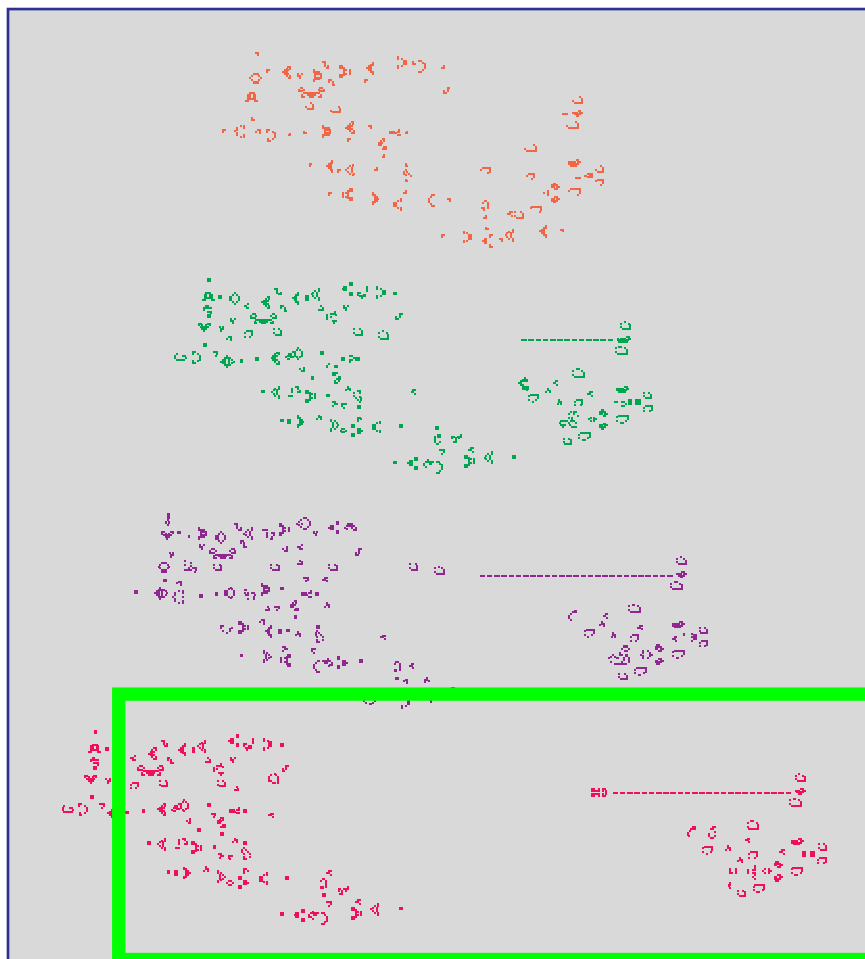
Pour le comprendre, il faut donner quelques précisions sur les navires du *Jeu de la vie*. Un navire est une configuration qui, après N étapes (sa période), se retrouve déplacée de A cases horizontalement et de B cases verticalement (navire de type $A-B$). Pour l'instant, tous les navires connus sont de type *transversal* ($A=0$ ou $B=0$) ou de type *diagonal* ($A=\pm B$), bien qu'il n'ait jamais été prouvé que seuls de tels navires étaient possibles (voir plus loin).

L'étude théorique montre qu'un navire de type $A-B$ a nécessairement une période N plus grande que $2(A+B)$. Par exemple, un navire qui se déplace horizontalement d'une case à la fois ne peut pas le faire en moins de deux générations, et un navire qui se déplace d'une case en diagonale (type $1-1$) ne peut pas le faire en moins de quatre générations.

Les navires connus il y a dix ans avaient tous une période N multiple de 4 et avaient tous la vitesse $c/2$ (pour les navires transversaux) ou $c/4$ (pour les navires diagonaux). La vitesse de la lumière c correspond à un déplacement d'une case par génération horizontalement, verticalement ou en diagonale : rien dans le plan de Conway ne peut se déplacer plus vite que c . Il n'y a aucune raison pour que tous les navires aient les vitesses $c/2$ ou $c/4$ et des périodes multiples de 4, et c'est sur ce point que de nombreuses découvertes ont été faites ces dernières années, dont le navire construit par Dean Hickerson qui a une vitesse $c/12$ et une période de 96. Après 20 ans de chasses infructueuses, il est étonnant qu'on ait pu en quelques années trouver tant de choses nouvelles concernant les navires du *Jeu de la vie*, au point d'ailleurs que Davis Bell leur a consacré un livre. Ce sont d'ailleurs les nouveaux navires qui ont conduit au merveilleux *Recouvreur-du-plan*.

Parmi les découvertes récentes concernant les navires, citons : des navires de période 3 (le premier fut trouvé en 1989 par Dean Hickerson), de période 3 (certains avancent à vitesse $c/2$, d'autres à la vitesse $c/3$), de période 5 (certains avancent à la vitesse $c/5$, d'autres à la vitesse $2c/5$). Des grammaires de composants ont été élaborées, qui permettent de construire des bateaux aussi longs ou larges qu'on veut, et des astuces ont été mises au point pour obtenir des bateaux de période aussi grande qu'on le souhaite.

Les méthodes utilisées pour obtenir ces résultats méritent quelques commentaires, car il serait naïf de croire qu'il suffit d'essayer au hasard en écrivant des programmes de quelques lignes. L'ex-



4. Dents de scie. Cette configuration possède un effectif en dents de scie, c'est-à-dire qu'elle passe alternativement par un maximum (de plus en plus grand), puis par un minimum (constant de 977 cellules). La configuration est composée d'un lance-navires (à gauche) et d'un puffeur qui s'éloigne à droite. Le puffeur laisse derrière lui une traînée de clignotants (un clignotant est un groupe de trois cellules alignées côte à côte). Le lance-navires envoie une salve (unique) de deux navires qui cognent la traînée et en provoquent la destruction progressive à la vitesse $2c/3$. Lorsque la traînée est détruite (on a alors atteint l'effectif minimum), le puffeur se remet à produire une traînée et envoie un navire en arrière, qui atteint au bout d'un certain temps le lance-navires (qui était resté en quelque sorte en attente sans rien lancer). Celui-ci envoie alors une nouvelle salve de navires qui provoquent, quand elle l'atteint, la destruction de la traînée devenue très longue, etc.

ploration à l'aide de programmes est bien un outil essentiel pour ces découvertes mais c'est à l'aide d'algorithmes subtils qu'on progresse. Ces algorithmes que les passionnés s'échangent entre eux et ajustent année après année, entre autres choses, analysent les essais infructueux déjà tentés pour ne pas rechercher dans des directions peu prometteuses, et essaient des configurations ressemblant à des configurations déjà connues pour être intéressantes.

Le nombre de configurations à explorer est bien trop grand pour que même les plus rapides des ordinateurs puissent découvrir des objets intéressants en procédant bêtement au hasard : le nombre de configurations différentes possibles contenues par exemple dans un carré de 10 cases sur 10 cases est de $2^{100} \sim 10^{30}$, ce qui est bien plus que ce qu'ils pourraient explorer même si on confiait aux passionnés du jeu tous les ordinateurs de la terre pendant un an.

C'est donc en perfectionnant programmes et algorithmes, en y intégrant des configurations déjà trouvées, en décomposant les figures intéressantes connues et en les recomposant différemment, bref c'est en utilisant toute l'ingéniosité dont un informaticien peut être capable que les ingénieurs-biologistes du *Jeu de la vie* trouvent ces machines étranges adaptées à la physique simplifiée du monde de Conway (n'oubliez pas que tout est toujours régi uniquement par «naissance si 3 voisins ; survie si 2 ou 3 voisins»). Peut-être que du génie est parfois utile.

LANCE-GLISSEURS ET LANCE-NAVIRE

Un glisseur est une configuration de cinq cellules (voir la figure 2) qui se déplace en quatre générations d'une case en diagonale (c'est le plus simple des navires et sa vitesse est $c/4$). Les lance-glisseurs sont des configurations qui restent fixées à un endroit, mais qui périodiquement engendrent un ou plusieurs glisseurs qui constituent alors des «courants» de glisseurs et s'éloignent indéfiniment du lance-glisseur.

Il existe aussi des lance-navires et des puffeurs lance-glisseurs ou lance-navires, et ce sont toutes ces configurations dynamiques qui constituent les composants élémentaires qu'on assemble pour construire les objets ayant un taux de croissance «en $\log(t)$ » ou autre.

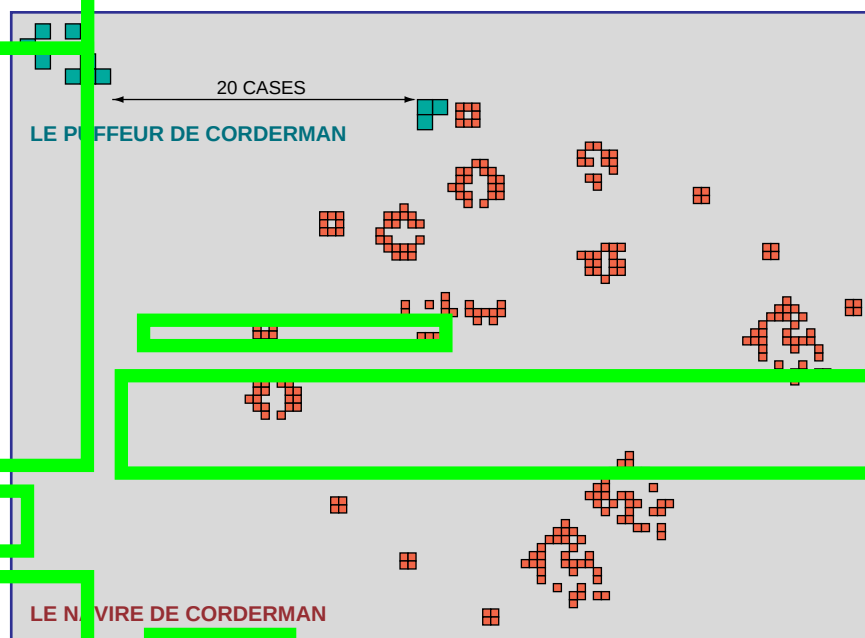
Il existe, par exemple, des lance-glisseurs qui émettent un glisseur toutes les 30 générations (le premier découvert est de cette catégorie), d'autres toutes les 23 générations. Il en existe aussi de

plus compliqués qui émettent toutes les 15 générations (celui-là est assez gros). D'autres émettent un courant irrégulier, car résultant d'une interaction complexe et difficile à analyser ; on les appelle *lance-glisseurs aléatoires*. D'autres émettent très rarement, par exemple toutes les 360 générations ou plus rarement encore.

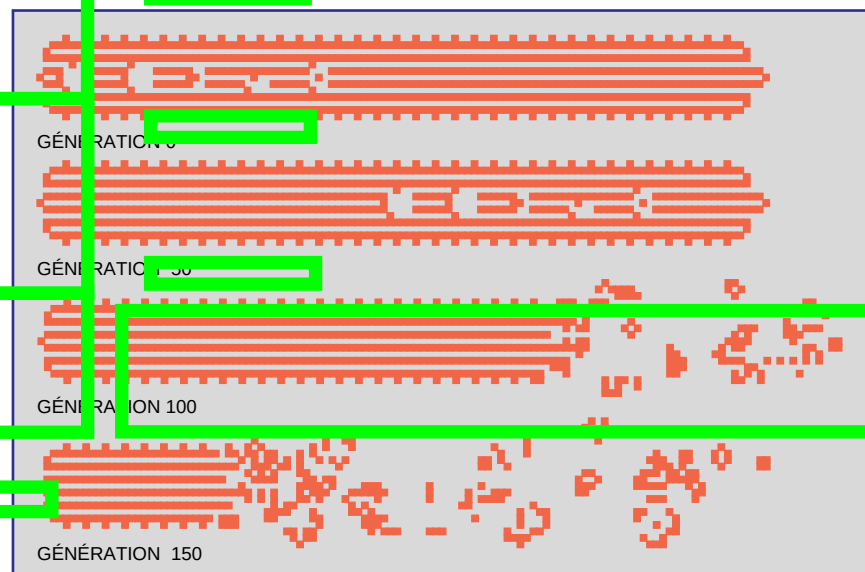
La configuration la plus extraordinaire que j'ai vue est construite à partir de navires lance-glisseurs et de navires

lance-navires. Elle synthétise une suite de navires exactement espacés comme la suite des nombres premiers : il y a un navire pour 2, un pour 3, un trou pour 4, un navire pour 5, un trou pour 6, un navire pour 7, des trous pour 8, 9, 10, etc. Ce calcul des nombres premiers par une machine du *Jeu de la vie* était prévu par la théorie.

En effet, en analysant certains des composants disponibles, dès les années 1970, John Conway a réalisé qu'on pou-



5. Le *puffeur de Corderman* est la plus petite configuration dont on est certain que l'effectif augmente indéfiniment. Le *navire de Corderman* a été tiré du puffeur de Corderman ; contrairement à tous les navires connus jusqu'en 1989, sa vitesse $c/12$ est différente de $c/2$ et de $c/4$.



6. La configuration *Zip* illustre le déplacement (à la vitesse c) d'une perturbation dans un fil. Pour exploiter ce genre de fil (plus rapide que les classiques courants de glisseurs qui avancent à la vitesse $c/4$), il faudrait en stabiliser les extrémités, concevoir des portes ET, OU, NON, dessiner des branchements et des angles droits, toutes choses qu'aujourd'hui personne n'a réussi à obtenir.

vait créer les courants de glisseurs et les faire interagir entre eux pour obtenir des portes logiques ET, OU, NON, comme dans un circuit électronique. Les éléments de base pour construire un ordinateur universel (c'est-à-dire capable de calculer toute fonction calculable) étaient donc présents et on en a déduit alors qu'en s'y prenant bien il était possible de faire calculer les nombres premiers à une configuration, ou les coefficients du binôme ou tout ce qui vous intéresse et qu'un ordinateur sait calculer.

Mais d'un résultat mathématique, «on peut construire une configuration qui calcule les nombres premiers» à la réalisation pratique d'une telle configuration avec vérification qu'elle fonctionne, il y a un pas énorme qui a demandé plus de 20 années.

On a là un exemple de la différence entre l'*existence mathématique* et l'*existence pratique*. Le mathématicien, même lorsqu'il donne explicitement les règles qu'il faut employer pour obtenir tel ou tel objet (c'est ici le cas), ne se préoccupe pas nécessairement de mener le travail jusqu'à son terme : il sait que c'est possible, il a des arguments abstraits qui l'en persuadent et ça lui suffit. Aux ingénieurs de terminer le travail si ça les amuse!

De la même façon, les mathématiciens du *Jeu de la vie* ont établi depuis longtemps qu'il était possible de construire des navires de type $A - B$ avec A et B quelconques. Pourtant, ainsi que nous l'avons déjà dit, on n'en connaît aujourd'hui que de type $A - B$ avec $A = 0$ (déplacement vertical) ou $B = 0$ (déplacement horizontal) ou $A = \pm B$ (déplacement diagonal), et donc en particulier aucun navire de type $1 - 2$ n'a jamais été vu. Un lecteur saura-t-il en découvrir un?

De même encore, on sait prouver mathématiquement qu'il existe des configurations autoreplicatrices — qui se reproduisent au bout d'un certain nombre de générations —, mais jamais personne jusqu'à présent n'en a aperçu sur son écran d'ordinateur. On le voit, les bâtisseurs d'empires imaginaires que sont les ingénieurs-biologistes du *Jeu de la vie* ont encore du travail devant eux.

FOU OU SAGESSE?

Les gens qui s'occupent du *Jeu de la vie* sont parfois l'objet de railleries : pour mener toutes ces expériences de biologie imaginaire, ne faut-il pas être fou et irresponsable (car bien sûr les ordinateurs utilisés sont coûteux, et le temps passé à ces recherches pourrait l'être à des calculs plus productifs).

Mais après tout... est-ce si fou que cela d'étudier l'un des plus simples

mondes possibles? N'est-ce pas le seul moyen pour évaluer ce qui est nécessaire, comme concepts, comme mécanismes, de base, comme chimie minimum, pour faire «fonctionner un monde». Ce que nous voyons se produire dans le plan de Conway nous apprend que, même si notre Univers nous apparaît complexe, cela n'entraîne pas que ses lois le sont.

Le principe du rasoir d'Occam veut qu'on minimise ce qu'on fait intervenir dans une explication ou un modèle : cette exploration du minimum générant la complexité qu'est l'étude du *Jeu de la vie* peut donc être vue comme une physique ultra-fondamentale ou une biologie théorique ultime. C'est donc un travail scientifique aussi important que bien d'autres menés ici ou là dans les milliers de sous-disciplines scientifiques existant maintenant et qui ne sont pas toujours aussi amusantes et esthétiques!

Le logiciel *LifeLab* pour Macintosh (en shareware pour 50F) est livré avec des centaines de configurations, dont les plus belles de Dean Hickerson et Alan Hensel et toutes celles mentionnées dans l'article. Pour l'obtenir adressez-vous à Andrew Trevorrow, 19 Abbott Lane, North Adelaide 5006 Australia (e-mail: akt@kagi.com). Les propriétaires de PC peuvent s'adresser à l'adresse ftp :

ftp://life.anu.edu.au/pub/complex_systems/alife/life/lifep.zip

Un navigateur Internet à l'adresse :
<http://www.cs.jhu.edu/~callahan/>

vous fournira bien d'autres informations encore sur le *Jeu de la vie*.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et techniques de Lille et chercheur au laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

D. I. BELL, *Spaceships in Conway's Game of Life*, NEA Information Systems, Canberra, Australie, dbell@pdact.necisa.oz.au, 1993.

J. H. CONWAY, E. R. BERLEKAMPS et R. K. Guy, *Winning Ways for your mathematical plays*, Academic Press, 1982.

M. GARDNER, *The game of life*, *Mathematical Games*, in *Scientific American*, 10-1970, 11-1970, 12-1970, 1-1971, 2-1971, 3-1971, 4-1971, 11-1971, 1-1972, 12-1973.

M. GARDNER, *Wheels, Life and other Mathematical Amusements*, W. H. Freeman, New York and San Francisco, 1983.

W. POUNDSTONE, *The Recursive Universe. Cosmic complexity and the limit of scientific knowledge*, Oxford Univ. Press, 1985.

Les sons naturels

SHAWN CARLSON

Comment enregistrer et analyser les sons émis par les animaux.

L'évolution est le plus grand des compositeurs. Vous en doutez ? Arrêtez-vous sur une plage déserte et écoutez : le vent, les vagues et les mouettes font une symphonie plus majestueuse et plus belle – à mon goût – que celles que l'on entend dans les salles de concert. Et les plages ne sont pas les seuls lieux enchanteurs : toute la surface de la Terre retentit de dizaines de millions de sons émis par les oiseaux, par les amphibiens, par les mammifères ou par les insectes. Bien qu'ils nous charment souvent, un pour cent seulement de ces sons ont été correctement enregistrés et archivés. Bien moins encore ont été analysés. Avec un peu de soin, vous pouvez capter des sons qui n'ont jamais été enregistrés et étudier leurs structures.

Vous pouvez même contribuer à enrichir les bibliothèques de sons naturels des laboratoires de zoologie. Les matériels professionnels de prise de son coûtent plusieurs milliers de francs, mais des découvertes sont possibles avec un budget bien inférieur. Avec l'aide de quelques logiciels spécialisés et d'un petit matériel d'enregistrement, vous pouvez faire un travail de recherche original.

Avant les prises de sons, apprenez à reconnaître les animaux à leurs cris : lisez des guides, renseignez-vous auprès de naturalistes, partez en visite commentée avec des gardes forestiers ou avec des guides de parcs naturels avertis et, surtout, écoutez des enregistrements. De nombreux disques présentent les chants des oiseaux, et la rubrique *Analyses de livres de Pour la Science* a récemment présenté *Entomophonia*, un disque compact qui présente les chants d'insectes. Consultez également les enregistrements de cris d'animaux à la médiathèque du Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

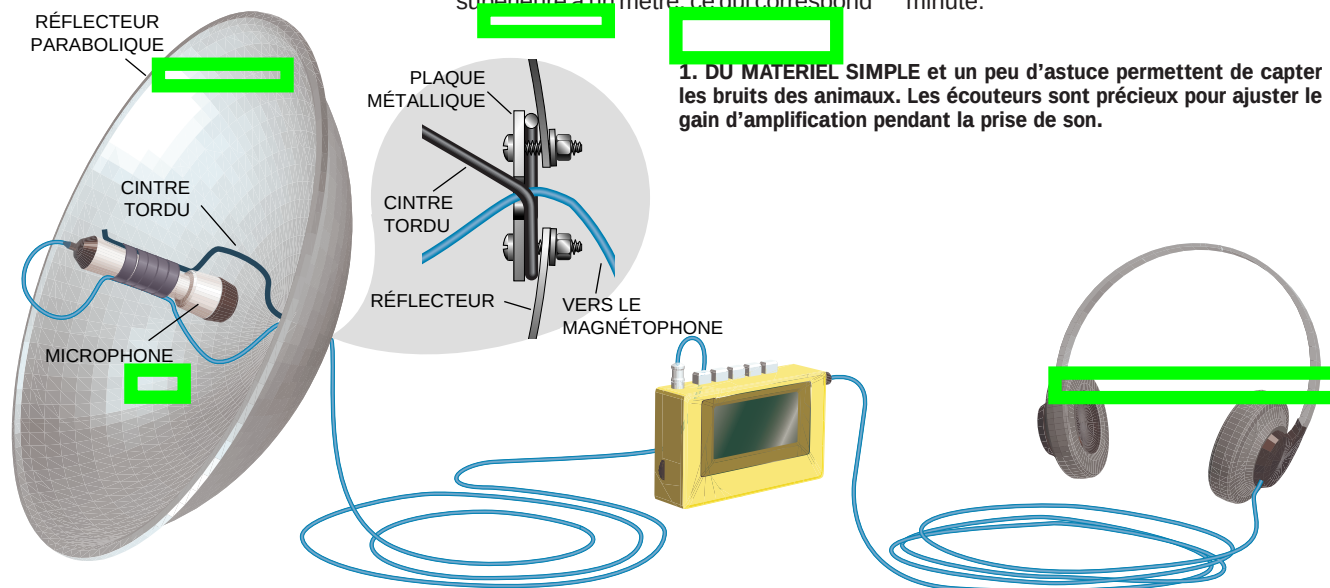
Pour enregistrer correctement les sons de la nature, vous devrez apprendre à les isoler de tout le fond sonore. Vous y parviendrez en utilisant un réflecteur parabolique, qui éliminera tout son qui ne proviendra pas de son axe. Si vous placez un microphone à son foyer, celui-ci ne captera que le son vers lequel pointe la parabole. N'utilisez pas un réflecteur trop grand, car vous ne pourriez plus le transporter commodément dans la nature (limitez son diamètre à un mètre). Pour être réfléchi, une période de l'onde sonore doit tenir à l'intérieur de la parabole : ainsi vous ne pourrez pas amplifier d'onde sonore de longueur d'onde supérieure à un mètre, ce qui correspond

à des fréquences supérieures à 344 hertz. Heureusement la plupart des animaux produisent des sons de fréquence supérieure à 344 hertz. Par exemple, les chants d'oiseaux ont des fréquences comprises entre 2 000 et 6 000 hertz. Vous trouverez facilement votre réflecteur parabolique soit dans des magasins de hi-fi, soit dans les magasins de surplus militaires, soit encore dans les magasins qui vendent des ustensiles de cuisine. Certains chaudrons chinois ou de grands saladiers donnent d'étonnants résultats ; de petits parapluies bien tendus, une luge en plastique, des réflecteurs de lampe ou même le fond d'un barbecue rond font également l'affaire.

Une fois le réflecteur parabolique trouvé, vous devrez vous procurer un microphone, un magnétophone et des écouteurs. Au centre de la parabole, percez un trou assez large pour y faire passer le fil du microphone. Un cintre en fil de fer rigide fait un bon support. Enroulez en spirale l'extrémité du fil de fer à la base de la parabole et boulonnez une plaque de métal par-dessus pour maintenir le fil fixé à la parabole (voir la figure 1).

Avec du ruban adhésif fort, fixez le microphone à l'autre extrémité du fil de fer. Le microphone doit faire face à la parabole. Procédez par essais successifs pour déterminer la meilleure position du microphone, puis raccordez ce dernier au magnétophone portable. Ces deux appareils peuvent être simples : vous apprendrez déjà beaucoup avec un microphone qui coûte moins de 200 francs et avec un minicassette banal.

Pour vous entraîner, allez d'abord au zoo, où les animaux sont nombreux et confinés, et où vous pourrez effectuer d'éventuels rafistolages de dernière minute.



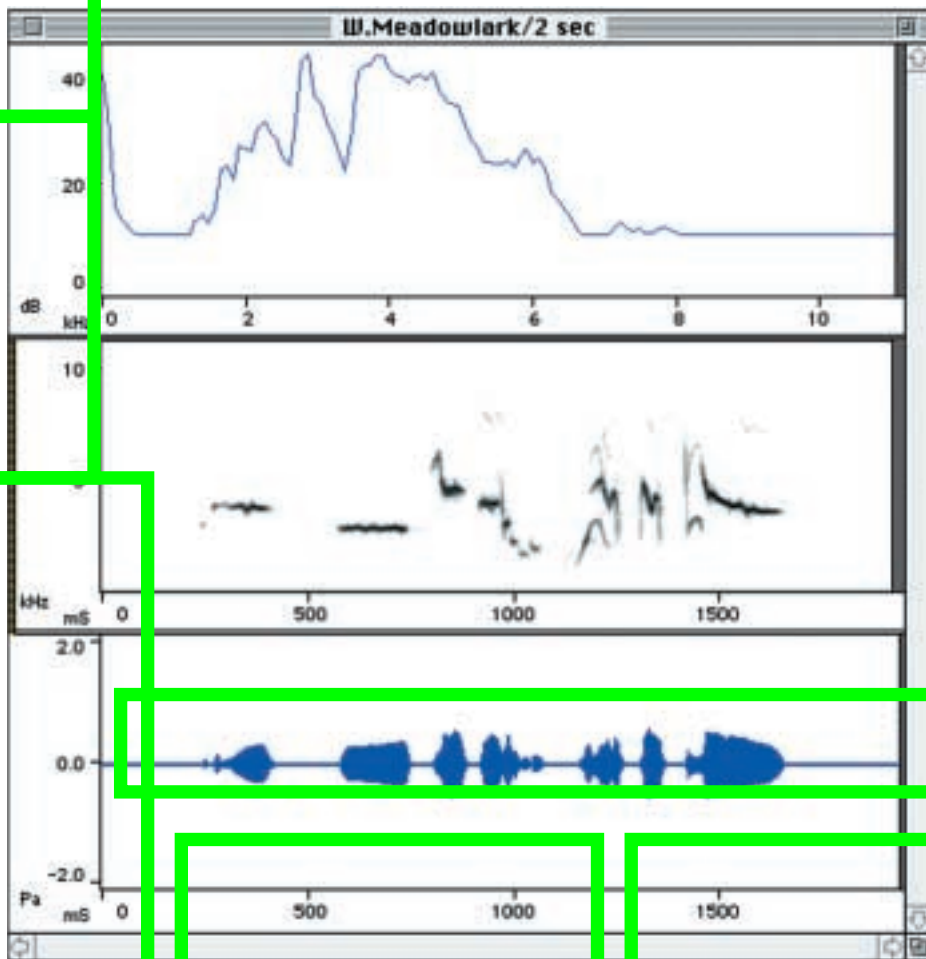
1. DU MATÉRIEL SIMPLE et un peu d'astuce permettent de capter les bruits des animaux. Les écouteurs sont précieux pour ajuster le gain d'amplification pendant la prise de son.

Puis, quand vous partirez en pleine nature, soyez attentif à ce qui se passe derrière l'animal que vous voulez enregistrer : comme les téléobjectifs, les microphones paraboliques raccourcissent la distance entre le premier et l'arrière-plan, de sorte que les sons provenant de derrière votre cible paraîtront anormalement forts. Essayez toujours de vous placer de sorte que votre microphone pointe vers le haut ou le bas : ainsi le bruit de fond sera celui du ciel ou du sol.

Naguère, seuls les professionnels pouvaient analyser les sons, mais aujourd'hui le logiciel *Canary* pour ordinateurs *Macintosh* facilite l'étude des sons naturels. Ce logiciel indique instantanément la constitution des sons (voir la figure 2) ; il permet d'isoler n'importe quelle partie d'une mélodie, de l'analyser et de masquer les erreurs d'enregistrement. Il efface les bruits indésirables, tels les grondements des camions dans le lointain.

Cependant *Canary* est surtout utile parce qu'il permet de comparer différents sons et de déterminer leur degré de ressemblance. Quand on lui demande de telles comparaisons, il calcule un indice, égal à un pour des sons identiques et à 0 pour des sons complètement différents. Le programme passe en revue une mélodie après l'autre, en synchronisme, et les compare. Puis il reporte chaque résultat sur un diagramme. Il édite ensuite le diagramme, afin que vous puissiez observer graphiquement la différence. Cette fonctionnalité permet toutes les explorations possibles. Vous pourrez ainsi mesurer la différence entre deux chants consécutifs d'un même oiseau, comparer le chant d'un oiseau avec celui d'un autre animal de la même espèce et vérifier vos hypothèses sur les chants d'espèces apparentées.

Avec un peu d'astuce, vous pouvez même mesurer les différents temps d'arrivée du son sur trois microphones distants les uns des autres et en déduire la position de l'oiseau qui chantait (le son se propage à environ 344 mètres par seconde et arrivera d'abord sur le microphone le plus proche de l'animal). Vous pourrez ainsi reconstituer les mouvements d'un oiseau particulier et déterminer l'étendue et les frontières de son territoire, ou essayer d'analyser le déplacement d'une chauve-souris en train de chasser, en captant ses ultrasons. Les possibilités sont infinies, et la puissance du logiciel *Canary* vous fera oublier son prix : environ 1 500 francs (voir en fin d'article).



2. LE CHANT DE L'ALOUETTE est représenté de trois façons par le logiciel *Canary* : par la quantité d'énergie émise par l'oiseau à chaque fréquence (en haut), par les diverses fréquences présentes dans ce chant en fonction du temps (au milieu) et par l'intensité du son (mesurée en unités de pression) en fonction du temps (en bas).

Si vous avez un ordinateur compatible IBM et le système d'exploitation DOS ou WINDOWS, vous pourrez utiliser les logiciels *Wave* (sous WINDOWS), *Sound Forge* ou *Software Audio Workshop*. Ces logiciels, ayant été conçus pour des ingénieurs du son et pas pour des scientifiques, il leur manque certaines des fonctionnalités les plus utiles de *Canary*. Toutefois ma préférence va à *Wave*, qui visualise les sons et décode leurs fréquences.

Si vous tenez vraiment à enrichir les banques de données professionnelles, vous aurez besoin d'un équipement professionnel. Hélas un bon microphone coûte environ 6 000 francs et un magnétophone haute performance, le double. Que peut alors faire un amateur ? D'abord s'associer avec d'autres amateurs afin de constituer un fonds commun suffisant. Contactez les associations naturalistes de votre région, mettez une petite annonce dans les revues sur la nature ou, encore, si vous êtes relié à un réseau informatique, envoyez un message électronique sur Internet.

N'oubliez pas les studios de prise de sons. Les lycées et les universités : il s'y trouve peut-être des mordus de la nature qui ont déjà une partie du matériel dont vous rêvez. Les plus ambitieux pourront aussi fonder une association à but non lucratif, qui pourra recevoir des subventions publiques ou privées.

Pour plus d'informations, vous pouvez vous adresser à l'Association L'Oiseau Musicien des preneurs de sons animaliers, 21, rue des Rossays, 91600 Savigny-sur-Orge.

Pour obtenir des informations sur les logiciels, contactez la Société des scientifiques amateurs en envoyant deux dollars à l'adresse suivante : Society for Amateur Scientists, 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, USA. Vous pouvez obtenir gratuitement la même information sur Internet, à : <http://www.the sphere.com/SAS/>.

Onirogrammes



Quelques pastilles de couleur au fond d'un kaléidoscope engendrent, par réflexion sur deux miroirs, une surprenante variété de motifs. Une goutte d'encre, déposée sur le pli d'une feuille de papier, puis étalée symétriquement, produit des formes dont les psychologues, depuis Rorschach, se servent pour tester l'imaginaire de leurs clients. La symétrie d'axe vertical est riche de connotations, sans doute parce que, dans la nature, elle est propre au règne animal.

Depuis quelques années, je construis des textures, pour les besoins de l'image en relief, avec un double souci. La texture doit être aléatoire, mais sans monotonie, pour que le regard y trouve rapidement des repères. Elle doit être visuellement riche mais sans verser dans le figuratif, pour ne pas suggérer d'interprétation autre que celle découlant du pur relief. Je recherche un point d'équilibre analogue à celui du grammelot, cet exercice vocal où l'on tient un discours qui semble être 100 pour cent français, mais ne contient aucun mot de la langue. Ces textures sont riches de formes cachées, qui se révèlent par symétrie.

Dans les exemples présentés ici, des bandes de texture ont été symétrisées et accolées. La symétrie est immédiatement perceptible sur les axes : peu à peu, l'organisation s'étend sur les bords. Quand on tourne la page de 90 degrés, la zone perçue comme symétrique semble se rétrécir de part et d'autre de l'axe, et l'on cherche plutôt à organiser la texture sur une moitié de bande, comme une vue panoramique. Dans la nature, la symétrie d'axe horizontal signale un plan d'eau, et l'interprétation se concentre sur ce qui est au-dessus de l'axe.

Les visages s'obtiennent facilement (avec des textures tachetées) ainsi que des personnages de dessin animé (avec des textures à lignes épaisses et espacées). Les insectes ou les « chinoïseries » sont également produits en abondance. J'ai essayé sur les deux orinogrammes d'éviter de tomber dans ces facilités.

Les textures ont été confectionnées manuellement, en utilisant beaucoup les ciseaux, la colle et la photocopieuse. Les variétés sont améliorées au fil des mois et croisées pour donner de nouvelles espèces. L'espoir est de produire une page entière qui s'organise visuellement sans recours à la symétrie !

Jacques NINIO
Laboratoire de Physique Statistique
École Normale Supérieure



Physique

La juste argile

Sous la direction de M. Daoud et C. Williams. Éditions de Physique, 1995.

La juste argile? Ce livre au titre un peu étrange est une collection d'articles qui décrivent les principaux aspects de ce qu'il est convenu de nommer la «matière molle». Dans la préface, Pierre-Gilles de Gennes définit cette matière molle comme un état de la matière sur lequel une petite perturbation extérieure produit une réponse très forte. Une telle définition s'applique à des matériaux variés : polymères, tensioactifs (détergents), cristaux liquides, colloïdes, films de mouillage... Tous ces matériaux se rencontrant fréquemment dans la vie quotidienne, un des attraits de l'étude de la matière molle est la relation directe avec le monde industriel.

Le livre traite des divers aspects de la matière molle : physique, chimique et, dans certains cas, applications industrielles avec des exemples concrets, comme dans les chapitres sur les colloïdes ou sur les matériaux polymères. Son but n'est pas la présentation académique et complète du sujet, ni l'exposition des théories les plus récentes et les plus complexes, mais l'illustration, par des exemples simples, des principaux concepts et de l'originalité des propriétés rencontrées. Dans tous les chapitres, les auteurs se sont efforcés d'utiliser un langage simple, qui rend la lecture accessible à un vaste public. Ce parti pris n'interdit pas de discuter des idées et des modèles récents et, parfois, subtils. En ce sens, la présentation des polymères en solution par T. Witten, qui introduit la renormalisation sans le dire et sans formalisme mathématique plus compliqué que la règle de trois, est un petit bijou. Le niveau requis n'étant pas très élevé, le livre peut être conseillé comme une introduction à la matière molle à de nombreux étudiants, physiciens ou chimistes. L'dernier fil conducteur de ce livre est constitué par les travaux de P.-G. de Gennes, qui ont marqué profondément tous les sujets abordés et qui sont abondamment cités.

Le premier chapitre, par Françoise Brochard-Wyart, est consacré aux phénomènes de capillarité et de mouillage. Après une introduction aux principaux concepts classiques, la présentation est

organisée autour de six expériences (dont l'une aurait été faite par Jean-Marc di Meglio «pour faire plaisir à de Gennes») que le lecteur est censé pouvoir reproduire aisément. Je crains cependant que cette reproduction ne soit parfois difficile. Le texte est agrémenté par de nombreux schémas et photographies, souvent spectaculaires. Il montre bien que ce domaine, trop longtemps considéré comme classique, réserve encore bien des surprises ; certains résultats récents, tel le mouvement des gouttes sous l'effet de gradients de tension de surface, choquent l'intuition.

Ces dernières années, les notions de fractales et de dimension fractale sont apparues comme des concepts unificateurs dans le domaine de la matière molle et des fluides complexes. Une présentation très claire en est faite dans le deuxième chapitre par M. Daoud et H. van Dommelen. La description part d'exemples montrant, dans certains matériaux, des corrélations anormales de densité décroissant comme des lois de puissance. Les notions d'autosimilarité, d'autoaffinité et même de multifractalité sont ensuite introduites sur le plan général, avant quelques exemples concrets (polymères et membranes, gélification et percolation, modèles de croissance et d'aggrégation). Le dernier paragraphe est consacré aux problèmes subtils de la diffusion sur une fractale et des modes élastiques des objets fractals.

Le troisième chapitre donne une introduction simple à l'«univers des colloïdes». Les diverses forces en jeu dans les suspensions colloïdales et la théorie classique d'Einstein sont exposées et illustrées par des exemples précis. Après la description de la cinétique d'aggrégation et de la structure des agrégats colloïdaux (qui peut être fractale), les deux dernières parties sont consacrées au traitement de surface des particules colloïdales avec des polymères et des tensioactifs (qui jouent souvent un rôle prépondérant) et au mode de préparation des suspensions colloïdales.

Les deux chapitres suivants sont consacrés aux tensioactifs. C. Taupin donne une brève introduction aux propriétés tensioactives des molécules amphiphiles et aux structures qu'elles forment en solution (micelles, émulsions, microémulsions...). G. Porte aborde plus spécifiquement deux aspects : les micelles géantes (qui peuvent, pour certaines propriétés, être considérées comme des polymères semi-rigides, bien que ces objets à l'équilibre se font et se défont en permanence) et les membranes fluides. La notion d'énergie de courbure et le rôle des fluctuations d'ondulation

des membranes, développés notamment par W. Helfrich, sont clairement exposés et confrontés aux résultats expérimentaux. Ce chapitre se termine par une discussion de la phase L_3 , qui est une phase bicontinue où une membrane sépare deux régions de solvant qui sont continues et interpénétrées, mais qui ne sont pas interconnectées.

Trois chapitres sont ensuite consacrés aux polymères. La chimie des polymères, abordé par F. Candau, décrit la synthèse de polymères dans des structures auto-assemblées, en microémulsion ou avec des tensioactifs polymérisables. La synthèse en microémulsion permet de former des polymères de très haute masse moléculaire et, notamment, des polymères hydrogels, à partir de microémulsions inverses. Le mécanisme est très différent de celui de la polymérisation en émulsion, et l'on peut arriver à synthétiser une chaîne polymère par gouttelette de microémulsion. Une autre idée est de figer les structures formées par les tensioactifs. Cela se obtient de deux façons : soit en introduisant le monomère dans la structure (par exemple, pour des phases lamellaires ou pour des phases cubiques), soit en utilisant des tensioactifs polymérisables (formant des vésicules ou des micelles). On fige ainsi des structures qui peuvent avoir des applications importantes, par exemple en pharmacologie.

Les propriétés des polymères en tant que matériaux sont décrites par Lucien Monneveux. Le chapitre couvre la structure des polymères semi-cristallins, la transition vitreuse, la viscoélasticité des polymères à l'état fondu et des élastomères, puis la mécanique des polymères solides. Il se conclut par une présentation de la mise en œuvre des matériaux plastiques.

T. Witten décrit (en français!) les propriétés des polymères en solution à partir des propriétés plus générales de structures fractales. Cela permet d'étudier non seulement la structure et la conformation de polymères en solution, mais encore leurs propriétés dynamiques (écoulement, diffusion), par analogie avec l'adsorption de marcheurs aléatoires par un objet fractal. Le modèle de reptation qui décrit le mouvement de polymères en solution concentrée est aussi brièvement décrit.

Enfin le dernier chapitre, dû à J. Prost et C. Williams, porte sur les propriétés physiques des cristaux liquides. L'accent est mis sur l'élasticité et sur les défauts des diverses phases cristal liquide : nématiques, smectiques (lamellaires), phases chirales et colonnaires. On y voit des photographies superbes de la texture de ces phases observées sous microscope. Les applications à l'affichage sont mention-

nées à la fois pour les nématiques et pour les smectiques C chiraux.

En conclusion, ce livre donne une idée assez complète de la physique et, dans une moindre mesure, de la chimie de la matière molle sous une forme pédagogique attrayante du fait des nombreuses illustrations et accessible à un public assez large. À ma connaissance, il existe peu d'équivalents à cet ouvrage, et je pense qu'il sera très utile à tous ceux qui s'intéressent plus ou moins directement à ce domaine de la recherche (ingénieurs et techniciens de l'industrie chimique, étudiants...). Le titre du livre, expliqué à la page 84, est tiré d'un livre de Gaston Bachelard ; la «juite argile» formée par le mélange de la terre et de l'eau est celle qui possède la consistance que l'eau n'a pas et la plasticité qui manque à la terre sèche.

J.-F. JOANNY

Biologie

Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution

Sous la direction de P. Tort. Presses universitaires de France, 1996.

Il n'est plus nécessaire de souligner l'importance de l'œuvre de Charles Darwin dans l'histoire de la pensée biologique. La publication de *L'origine des espèces*, en 1859, marque incontestablement une rupture épistémologique dans l'approche et dans la conception du monde vivant. D'autres chercheurs, avant lui, avaient avancé l'idée d'une transformation des espèces à travers le temps, mais Darwin, en proposant un mécanisme raisonnable pour présider à ces changements, déclenche une révolution scientifique. C'est à partir de lui que s'impose peu à peu l'idée d'une évolution de la vie, et toute la biologie moderne peut se réclamer de l'héritage darwinien.

Cependant les idées de Darwin ont filtré au-delà de la biologie pour s'exprimer dans des domaines variés, parmi lesquels la sociologie ou la philosophie tiennent une place de choix. Le succès même du darwinisme avait son revers, et il a conduit à des distorsions, des malentendus ou des caricatures. Depuis T. Lyssenko, apôtre d'un «darwinisme créateur» proche d'un lamarckisme primaire, jusqu'aux sociobiologistes modernes, en passant par les partisans d'un eugénisme censé pallier l'absence

de sélection naturelle dans l'espèce humaine, nombreux ont été les avatars de «la descendance modifiée par la sélection naturelle» de Darwin, souvent perçue à travers le prisme déformant des thèses de M. Spencer. Plus de 100 ans après la mort de Darwin, une récapitulation et une mise au point étaient nécessaires ; l'un des buts de ce dictionnaire que de clarifier l'héritage darwinien.

L'ouvrage aborde le darwinisme à la fois naïf, les biais des concepts et par celui des auteurs. Tout d'abord, il faut relever les concepts extraits directement de l'œuvre de Darwin, qui permettent de remonter à l'intelligence même de la théorie, de sa genèse et de ses propositions. Ce travail de recherche débouche sur les concepts nés de l'héritage darwinien. L'éo-darwinisme, théorie synthétique de l'évolution, révisions modernes de celle dernière englobant les acquis, inconnus de Darwin, de l'hérédité mendélienne, de la génétique des populations, de la paléontologie, de la biologie moléculaire ou de l'écologie... Ce foisonnement de données a engendré des concepts nouveaux qui éclairent ou prolongent les idées de Darwin en les adaptant aux connaissances nouvelles ou en les modifiant pour répondre à de nouvelles interrogations. Dans la nébuleuse scientifique et littéraire qui entoure la théorie de Darwin, d'autres concepts qui ont au jour sont examinés dans le dictionnaire, certains utilisant avec plus ou moins de bonheur les préceptes darwiniens, d'autres essayant au contraire de les combattre. L'ensemble illustre la vigueur du débat scientifique et épistémologique autour de l'évolution et de ses modalités.

Les auteurs qui font l'objet de notices sont d'abord ceux qui ont été utilisés par Darwin et cités dans ses principaux ouvrages théoriques. À chacun est consacrée une présentation biographique plus ou moins étendue, et un exposé de leurs principaux travaux, découvertes ou théories, alors qu'est donnée la raison de leur citation par Darwin. Sont aussi examinés, dans les mêmes conditions, ceux dont les recherches ont constitué une contribution positive ou négative aux théories de l'évolution ou à l'histoire du darwinisme. On y trouvera donc des penseurs néo-lamarckiens ou des antiévolutionnistes, à côté des noms de ceux qui, après Darwin, ont continué de forger les instruments qui permettent aujourd'hui de mieux comprendre le mouvement perpétuel de la vie.

Les articles du dictionnaire peuvent avoir une fonction pédagogique directe, expliquant simplement les mots ou les théories, ou bien ils peuvent participer à un débat prospectif dans lequel des

rédacteurs différents expriment des idées différentes. La longueur des articles n'est pas toujours proportionnée à l'importance d'un auteur ou à l'impact d'un sujet ; elle est déterminée par un souci didactique, avec des éclairages utiles sur certains points peu connus. Le darwinisme russe ou le darwinisme italien, par exemple, occupent une place importante, alors que celle du darwinisme anglo-saxon est modeste relativement au nombre de travaux qu'il représente. Chaque article est suivi d'une bibliographie, parfois abondante, qui permet d'approfondir une question en remontant aux sources, et de corrélats qui renvoient à d'autres rubriques du dictionnaire et élargissent considérablement les possibilités d'information.

Le *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution* est une entreprise originale, la première d'une telle ampleur à être consacrée à Darwin, à ses théories et à leur genèse, de même qu'à leur influence en dehors de la sphère biologique. Instrument de travail nécessaire pour les chercheurs, il est également une source inépuisable pour tous ceux qui s'intéressent à la biologie, à l'évolution ou, simplement, à l'histoire des idées depuis un siècle.

Louis de BONIS

Médecine

Les chemins d'Esculape

Maurice Tubiana. Éditions Flammarion, 1995.

Avec son récent livre, Maurice Tubiana apporte une vision nouvelle de la santé et de la maladie. Il n'étudie pas exclusivement Esculape et ses descendants comme l'ont fait tant d'historiens de la médecine, mais s'intéresse aussi aux chemins, parfois divergents, suivis par la pensée médicale, des origines à nos jours.

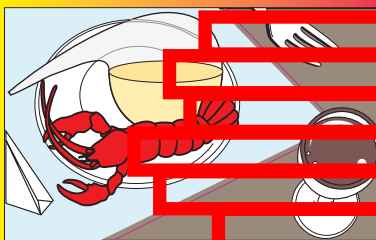
À l'aube de l'histoire, la maladie fit l'objet de deux interprétations. Pour les Mésopotamiens, la souffrance était une punition voulue par les dieux ; pour guérir, il convenait de les apaiser, de ne plus pécher. Cette médecine «méta-physique», qui fit naître maintes pratiques de sorcellerie et, plus tard, de rites religieux, sera adoptée par le judaïsme, puis par le christianisme. Vers la même époque, la médecine égyptienne, au contraire, se voue à l'observation ; on dissocie la maladie de la

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 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 mars 1996

FRANCE

info

morale. À sa mort, devant le tribunal d'Osiris, chacun est récompensé ou puni selon ses actes. La maladie est considérée comme un accident de la nature, que l'on doit tenter de réparer. Les observations se multiplient : on cherche les relations entre le mal et l'environnement, une pharmacopée élémentaire se développe.

Les Grecs suivront la pensée égyptienne, Hippocrate faisant la synthèse des connaissances de son temps, au VI^e siècle avant notre ère. Pour lui, toute affection résulte d'un déséquilibre intérieur (entre les quatre humeurs qu'il décèle) et des agressions de l'environnement. Ils pressent d'une façon naïve, certes, le tempérament plus tard défini de façon scientifique et les facteurs écologiques qui doivent, eux aussi, offrir un état de « congruence » avec l'individu.

Cinq siècles plus tard, à Rome, Galien reprendra les thèses hippocratiques tout en les précisant. Mais bientôt, la vague du christianisme venue du Proche-Orient envahit toute la Méditerranée et l'Empire romain. La maladie est considérée comme une punition. Devenue suspecte à l'Église, la pratique médicale entre en sommeil, car on ne doit pas s'opposer à la volonté d'un Dieu infiniment juste qui punit les coupables, mais ne saurait laisser souffrir les innocents. Dans les grandes écoles, on cherche des responsables et l'on accuse : les gitans, les lépreux et, bien entendu, les juifs, victimes expiatoires de tous les malheurs de la chrétienté.

Toutefois, la méthode hippocratique, objective, n'est pas totalement perdue : elle est développée par les Arabes. Certes, le Coran affirme que rien n'arrive sans la volonté de Dieu, « bon et miséricordieux », mais il ordonne aussi de chercher et de connaître. Les musulmans d'abord au Proche-Orient (Rhazès, Avicenne aux IX^e et XI^e siècles), puis au Maghreb et en Andalousie (Averroès au XII^e siècle), développent la science médicale. Autour d'eux travaillent des juifs qui comportent quelques acquis de la médecine arabe dans les écoles à peine entrouvertes de l'Europe chrétienne (Salerne, Tolède, Barcelone, Montpellier, Paris).

La médecine française n'évoluera pas pendant des siècles. Un ballon d'oxygène est porté par la Renaissance, qui ouvre les portes à la science d'observation, essentiellement à la physique et à l'astronomie : viennent Newton, Descartes, Copernic et même Galilée, qui fera la cruelle expérience de contredire les textes sacrés. Toutefois ce libéralisme relatif ne profite guère à la médecine : le XVII^e siècle s'en tient encore aux

vieilles conceptions, mal comprises, des médecins de Molière, pédants et ignares, qui se jettent à la tête des aphorismes d'Hippocrate ou de Galien qu'ils interprètent à leur manière. Leur thérapeutique se borne à des saignées et à des clysters.

L'Angleterre, où la Réforme a introduit un courant libéral, va prendre une avance sur l'Europe catholique, soumise à la férule de Rome. C'est ainsi qu'Harvey décrit la circulation du sang (déjà pressentie par les Grecs, puis par les Arabes), ce qui permet désormais d'introduire des substances à visée thérapeutique par voie intraveineuse. La pharmacopée s'enrichit alors de multiples drogues, notamment grâce aux travaux de Sydenham. Chez nous, la Révolution française brise les dernières entraves, et le rationalisme s'impose. La médecine française explose bientôt. La tendance à individualiser les maladies, déjà sensible ailleurs, s'affirme dans notre pays.

Durant la première moitié du XIX^e siècle, Bichat et, surtout, Bayle et Laennec montrent que chaque affection se caractérise par des lésions spécifiques, qui s'expliquent par des signes faciles à percevoir. La pneumologie, la cardiologie révèlent leurs secrets. On commence à comprendre la mécanique du système nerveux grâce aux travaux de Pinel, de Esquirol, de Babinsky, de Charcot, qui s'intéressent aussi aux troubles de l'esprit. Des progrès importants sont observés dans les pays voisins : en Allemagne, Virchow montre que le cancer est dû à une prolifération de cellules anormales et envahissantes, tandis qu'Erlan fait accomplir d'immenses progrès à la pharmacologie. Bientôt viennent les « trente glorieuses », au cours desquelles Darwin démontre la réalité du transformisme et offre un schéma cohérent de l'évolution ; Pasteur met fin au mythe de la génération spontanée en décrivant des germes visibles (bactéries) ou invisibles (virus) qui provoquent les maladies infectieuses ; de son côté, Claude Bernard souligne la réalité du milieu intérieur (essentiellement le sang) et les multiples mécanismes de régulation qui assurent sa constance. Loin de l'Allemagne, à Brno, en Moravie, un moine, Gregor Mendel, en hybridant certaines variétés de pois, met au jour les lois de l'hérédité. Dès avant Pasteur, la vaccination antivariolique, fruit d'une observation empirique, avait mis fin aux grandes épidémies de variole qui tuaient les enfants ou les défiguraient pour la vie. Après Pasteur, les vaccinations se généralisent, l'hygiène s'instaure ; Röntgen découvre les rayons X ; Béclère les applique à l'étude photographique des viscères et des

os. Désormais on ne peut renéger les lésions en dehors de toute méthode invasive. Le monde qui entre dans le xx^e siècle subit une profonde vague de scientisme. On pense que la médecine aura raison de toutes les maladies. La «Révolution industrielle» a relevé globalement le niveau de vie : à la fin du XVIII^e siècle, on mourait à 27 ans ; à la fin du XIX^e siècle, à 44 ans ; aujourd'hui, à 80 ans.

La médecine progressera encore avec la découverte des sulfamides et des antibiotiques, avec la mise au point d'une chimiothérapie anticancéreuse et avec les traitements immunologiques. On maîtrise mieux l'endocrinologie et l'arrivée de multiples psychotropes amène à former ou à réduire fortement les services de psychiatrie. La transfusion sanguine permet des interventions longues, saignantes, telle la chirurgie à cœur ouvert, alors que la découverte du système majeur d'histocompatibilité, jointe à la connaissance d'immunosuppression, ouvre la voie aux greffes d'organes.

Ces avancées de la médecine soulèvent de nouveaux problèmes socio-économiques. D'abord l'apparition, dans la pyramide des âges (devenue «obésique», d'une classe de gens âgés de

plus en plus nombreux, ce qui implique une révision du mode de retraite pour que chacun vive décemment jusqu'à la fin de ses jours. En outre, chaque nouvelle technique coûte cher. Avec le prix d'une seule greffe cardiaque, on pourrait soigner (ou prévenir) des millions de gripes. Aussi les États doivent-ils développer une médecine de prévention et, bientôt grâce à l'inventaire complet du génome, une «médecine de prédiction», appelées l'une et l'autre à éviter des maladies prévisibles ou seulement probables. Faute de quoi aucune caisse d'assurance ne pourra supporter le poids de ce nouvel accès à la santé.

Aujourd'hui la maladie apparaît comme un phénotype fait de la convergence de facteurs innés et de facteurs acquis. N'est-ce pas, traduite en termes modernes, la vieille intuition hippocratique du terrain et de l'environnement réagissant l'un sur l'autre ?

Maurice Tubiana expose, avec une merveilleuse clarté, le long cheminement de la médecine moderne, qui en trois mille ans et à la faveur d'une méthodologie sans cesse plus rigoureuse, amène à la médecine du temps présent et laisse entrevoir celle de l'avenir. Un beau livre à lire et à méditer.

Jacques RUFFIÉ

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Slim Films.
P. 9 (en haut à gauche et en bas à gauche) : A.B. Dowse, SPL/Photo Researchers, Inc. P. 9 (en haut à droite) : Scott Camazine, Photo Researchers, Inc. P. 9 (en bas à droite) : Science Source/Photo Researchers, Inc. P. 10 : Enrico Ferrelli/Cosmos. P. 13 : Beth Phillips, avec l'aimable autorisation de l'American Museum of Natural History. P. 14 (à gauche) : *Over de Voortelling in Wonderbaerlyke Veranderingen der Surinamsche Insecten* (1730) ; P. de Bay, avec l'aimable autorisation de Trustees of the Victoria and Albert Museum. P. 14 (à droite) : Avec l'aimable autorisation de Öffentliche Kunstsammlung, Kupferstichkabinett, Basel. P. 16 : Chantal Nicolas-INRA. Pp. 20 à 23 : documents PLS. P. 24 : Funck et Kristensen/Nature. P. 26 : NASA/HST. P. 27 : document PLS. P. 28 : Christoph Zollikofer et Marcia Ponce de León, Institut d'anthropologie de l'Université de Zurich. P. 29 : Marc Thévoz. P. 32 : N. Pittet. Pp. 34 et 35 : Laurie Grace. P. 36 : Karl Gude. P. 38 : Katherine Lambert. P. 39 : Blanche/Gamma. P. 40 : Sirovish/Press. Pp. 42 et 43 : Suzanne Barnes. P. 44 (dessins) : Lisa Burnett. P. 44 (photographie) : avec l'aimable autorisation de Richard Weindruch. P. 45 : Richard Weindruch. P. 46 : Kirk Boehm, Wisconsin Regional Primate Research Center. P. 47 (en haut) : Tomo Narashima. P. 47 (en bas) : Dana Burns-Pizer. P. 48 : Karl Gude,

d'après Loy L. Walford, University of California, Los Angeles. P. 51 : Scot Hill. P. 52 : Jarek Schneiderman Design. P. 53 : Lisa Burnett. Pp. 54 et 55 : Lisa Braiman. P. 56 : Scot Hill. P. 59 : Slim Films. P. 60 (en haut) : Roberto Osti. P. 60 (en bas) : Örjan Ekeberg, Royal Institute of Technology, Stockholm. P. 61 : Roberto Osti. P. 61 (cartouche) : Tony Sica, Gamma Liaison. P. 63 : Carey Ballard. Pp. 66 et 67 : Volker Prinz. Pp. 68 et 69 : Roberto Osti. P. 70 : Dmitry Schidlovsky. P. 72 (à gauche) : Thomas Mayer, Das Fotoarchiv. P. 72 (à droite) : Jochen Tack, Das Fotoarchiv. P. 74 (à gauche) : Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics and Space Administration. P. 74 (Lune) : National Aeronautics and Space Administration. Pp. 74 et 75 (Génésis) : Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics and Space Administration. P. 75 (Terre) : Tom Van Sant, The Geosphere Project. Pp. 76 et 77 (en haut) : Jarek Schneiderman. Pp. 77 (en bas) et P. 78 (en haut) : Michael Goodman. P. 78 (en bas) : National Aeronautics and Space Administration. P. 79 : Michael Goodman. P. 83 : PLS/PLS. Pp. 84 à 86 : Richard Ross. PLS. P. 87 : Michel Hamon. Pp. 88 et 89 : documents PLS. Pp. 90 à 95 : Richard Ross. Pp. 96 et 97 : Johnny Johnson. Pp. 100 à 103 : document PLS. P. 106 : Michael Goodman. P. 107 : Cornell Laboratory of Ornithology. Pp. 108 et 109 : Jacques Ninio, École normale supérieure.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat : Annie Tacquenot, Pascale Thibault, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Monique Pouzol. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Louis. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Laurent Benzon, Denis Bezozzi, Philippe Bougnoux, Paloma Cabaza-Orcel, Paul Decaix, Évelyne Host-Plaret, Marie-Thérèse Landousy, Éric Levin, Sylvie Macdétel, Anne Masé, Claude Olivier, Guy Pelus, Fabienne Renous, Jacqueline Stern.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Renne. Board of Editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leary, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Satcha Neameck, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hargley. Co-Chairman : Pierre Gercens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ France
Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06
Tél. (0) 46 34 21 42.
Téléx : LIBEIN 202978F.
Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Morulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Conay

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 sont déposés.

Une autorisation de reproduction a été 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 en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.