

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Novembre 1998

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Hormones
et ménopause

La musique
de Cro-Magnon

Le nuage d'Oort

La vie en apesanteur

Écritures
sous contraintes

Amortissement
et dérivées non entières

La classification
périodique des éléments

Les bactéries artistes



JEU-CONCOURS

Calculatrice rudimentaire

par Pierre Tougne

6



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

7

TRIBUNE DES LECTEURS

8

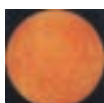


POINT DE VUE

Les modes en science

par Guy Ourisson

11



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La musique des sphères

par Marc Lachièze-Rey et Jean-Pierre Luminet

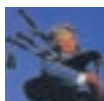
12

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Le «levier» de la politique monétaire

par Bernard Guerrien et Sophie Jallais

16

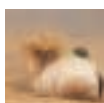


SCIENCE ET GASTRONOMIE

Terroirs de whisky

par Patrick Rives

20



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

22

- Un «roi des mers» égaré? ■ L'art du pisteur préservé
- La capitale des Mannéens ■ Régénération du foie

■ Parasites et environnement ■ Dracula, un enragé?

■ Accélération anormale ■ Images subliminales

■ Carrés hypermagiques

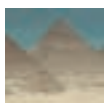


LOGIQUE ET CALCUL

Écritures sous contraintes

par Jean-Paul Delahaye

102



VISIONS MATHÉMATIQUES

Une main-d'œuvre pharaonique?

par Ian Stewart

108



ANALYSES DE LIVRES

110

■ Michel-Eugène Chevreul, *Un savant des couleurs*, sous la direction de G. Roque, B. Bodo et F. Viénot

■ Art et science de la couleur. Chevreul et les peintres, de Delacroix à l'abstraction, de G. Roque

■ Une introduction aux neurosciences cognitives, J. Delacour

■ L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, édité par C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu et F. Papy

■ Annuaire du Bureau des Longitudes, *Éphémérides astronomiques 1999*

Hormones et ménopause

36

par Craig Jordan

Des composés nommés SERM semblent efficaces contre le cancer du sein, l'ostéoporose et divers troubles associés à la ménopause.



Le corps humain en apesanteur

44

par Ronald White

Les séjours prolongés dans l'espace perturbent la physiologie humaine. La médecine progresse par l'étude des astronautes en orbite.



Son et musique au Paléolithique

52

par Michel Dauvois, Xavier Boutillon, Benoît Fabre et Marc-Pierre Verge

L'étude de quelques instruments sonores fabriqués par les hommes du Paléolithique et l'exploration acoustique de leurs grottes ornées montrent qu'ils utilisaient des phénomènes acoustiques et jouaient de la musique.



Le nuage de Oort

60

par Paul Weissman

Aux confins du Système solaire, des comètes formant un vaste nuage sont attirées presque autant par le Soleil que par les autres étoiles. Les astronomes étudient la dynamique de ce nuage afin de comprendre l'origine du Système solaire.



La création de nouveaux éléments 68

par Peter Armbruster et
Fritz Peter Hessberger

Au cours des dernières années, les physiciens ont créé trois nouveaux éléments : les éléments 110, 111 et 112.

**La classification périodique des éléments**

par Eric Scerri

Depuis ses prémices, il y a environ 200 ans, la classification périodique est devenue un outil essentiel pour les chimistes modernes.

**Les mathématiques de l'amortissement**

par Alain Oustaloup

On perfectionne les systèmes d'amortissement en utilisant les notions mathématiques de fractales, de récursivité et de dérivées non entières.

**Des photopiles sans soleil**

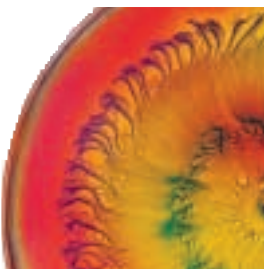
par T. Coutts et M. Fitzgerald

Les générateurs thermophotovoltaïques transforment directement la chaleur radiante en électricité. Ils remplaceront bientôt les groupes électrogènes.

**Les beautés du monde microbien**

par Eshel Ben-Jacob
et Herbert Levine

Les motifs des colonies de bactéries ou d'amibes ressemblent à ceux du monde minéral.

**L'intelligence derrière les objets**

Les manifestations de l'intelligence ne sont pas apparues subitement, par hasard ou par un coup de baguette magique, dès que le cerveau a atteint une taille suffisante (proche, a-t-on trop longtemps pensé, de sa taille actuelle). Les caractéristiques humaines telles que les pratiques de chasse, la confection d'outils, les réalisations culturelles – bijoux, peintures, instruments de musique – ont contribué au développement cérébral, lequel en retour a permis la poursuite de l'épanouissement technique et de la floraison artistique.

Notre cerveau actuel recherche les connaissances du cerveau passé, et pour cela il tente de discerner les activités intellectuelles sous-tendues par les reliques du passé. Dans cet esprit, il semble raisonnable de penser que le passage du sifflet utile, à la flûte, aux trous «harmonieusement» disposés, dénote une socialisation artistique (voir *Son et musique au Paléolithique*, page 52).

La question est : «Comment discerner la pensée derrière le réel?» En d'autres termes, comment mesurer la pertinence de l'interprétation des messages légués par nos ancêtres? L'exégèse est difficile : ainsi les dessins stylisés des grottes du Paléolithique supérieur, situés à proximité des peintures d'animaux, symbolisent-ils le vagin fécond, source de fertilité comme le pensait Leroi-Gourhan, ou représentent-ils des traces d'animaux utilisées à des fins d'enseignement? L'archéologue trouvera dans les réalisations anciennes mille belles intentions que leurs auteurs n'avaient peut-être pas, du moins de façon consciente. Cela peut agacer les puristes. Devraient-ils pour cela interdire ou se moquer de ces interprétations alors que nous les pratiquons avec emphase pour les expressions artistiques modernes? C'est en interprétant les caractéristiques techniques des objets anciens que l'on précisera leur fonction sociale.

L'analyse fondée sur les connaissances acoustiques actuelles, démontre que les facteurs de flûte et les percussionnistes qui jouaient en frappant les concrétions calcaires des grottes n'étaient pas des esprits simples n'utilisant, ou ne fabriquant, que des instruments simplistes. Chez nos lointains ancêtres, l'empirisme a progressé vers le raisonnement hypothético-déductif, qu'il s'agisse de retrouver la piste d'animaux, de percer les trous de la flûte ou de déterminer les meilleures résonances des stalactites.

Philippe BOULANGER

JEU-CONCOURS N° 53

PIERRE TOUGNE

Calculatrice rudimentaire

Une calculatrice arithmétique simple ne peut effectuer que les quatre opérations fondamentales : addition, soustraction, multiplication et division, plus l'extraction de racine carrée. Comment calculer une racine cubique à la précision de la machine (classiquement huit chiffres significatifs)? L'idée la plus simple est de procéder par dichotomie. Prenons l'exemple du calcul de la racine cubique de 10. On part d'une estimation par défaut et par excès, disons 2 et 3. On prend le

milieu de l'intervalle, soit 2,5 dont on compare le cube à 10, il est supérieur, donc le résultat cherché est dans l'intervalle [2, 2,5] et l'on recommence jusqu'à ce que l'intervalle soit inférieur à la précision d'affichage de la calculatrice. Il faut 26 itérations du processus pour obtenir le résultat 2,1544346. Ce procédé est long, utilise l'addition, la multiplication et la division, suppose de mémoriser les résultats intermédiaires et enfin demande de prendre une décision à chaque étape du

processus. Sauriez-vous trouver un algorithme itératif n'utilisant que la multiplication et la racine carrée pour calculer la racine cubique d'un nombre?

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

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 51

Pour analyser ce jeu de soustraction, il suffit de procéder à une analyse rétrograde.

Explicitons le procédé sur le jeu normal en base 5. Sur le tableau de la figure 1, la ligne supérieure indique le chiffre joué et la colonne de gauche le nombre affiché avant la soustraction. Dans chaque case du tableau, on place le chiffre 1 si le coup est gagnant, le chiffre 0 si le coup est perdant.

Comment remplit-on le tableau? Tout d'abord, les lignes -3, -2, -1 sont remplies de 1, car l'affichage étant négatif, l'autre joueur avait déjà perdu au coup précédent. La ligne 0 est remplie de 0, car tout coup du joueur aboutira à un résultat négatif, et donc toutes les positions de la ligne sont perdantes. Prenons maintenant la case (1,1) en bleu : les seuls coups jouables par le deuxième joueur sont les cases en bleu de la ligne supérieure qui sont toutes perdantes, donc la case (1,1) est gagnante pour le joueur, et l'on met un 1 dans celle-ci. Passons à la case (1,2) en rouge ; les réponses de l'adversaire sont les cases en rouge de la deuxième ligne supérieure qui sont gagnantes pour le deuxième joueur, donc la case (1,2) est perdante pour le joueur, et l'on met un 0 ; et ainsi de suite.

Afin d'automatiser le procédé, il est commode de se faire un cache montré sur la figure 2. Un carré du bas étant sur la case à remplir, on regarde les chiffres dans les trois cases correspondantes (par exemple, la troisième case à gauche correspond aux rectangles de la troisième rangée à partir du bas). Si au

		CHIFFRE JOUE			
NOMBRE AFFICHÉ AVANT LA SOUSTRACTION	-3	1	2	3	4
	-2	1	1	1	1
	-1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1
	1	1	0	0	0
	2	0	1	0	0
	3	0	0	1	0
	4	1	0	1	1
	5	0	0	0	0
	6	1	0	0	1

Figure 1

Figure 2

moins un 1 apparaît dans les cases vides de la rangée, on met un 0 dans la case et l'on met un 1 dans le cas contraire. Le tableau de la figure 1 montre le remplissage jusqu'à la ligne 6. Si on le prolonge, on voit très vite que les lignes se reproduisent avec une période 5 et que toutes les lignes $5 \times k$ (en base 10) ne comportent que des 0 et sont perdantes pour le premier joueur.

Pour la variante à qui perd gagne, il suffit d'invertir les 1 et les 0 des quatre premières lignes et de recommencer le remplissage sur le même principe : on découvre alors que les positions perdantes du premier sont $5 \times k + 4$ (en base 10). En base 6, les résultats sont $9 \times k$ pour le jeu normal et $9 \times k + 4$ ($k > 0$) pour le jeu à qui perd gagne.

Pour les bases supérieures, l'analyse manuelle devient vite impossible, mais un tableur ou un petit programme en *basic* font cela très bien. Que trouve-t-on? Après un début irrégulier, le tableau devient périodique (ce qui est prévisible), et il y a toujours des valeurs perdantes pour le premier joueur (ce qui est bien moins évident). Les périodes pour les bases de 2 à 12 sont données pour les deux variantes dans le tableau de la figure 3. Deux constatations s'imposent : après un début assez régulier, ces périodes sont assez imprévisibles et peuvent même décroître! D'autre part, ces périodes sont en général identiques dans les deux variantes, sauf pour les bases 9 et 12. L'espoir de trouver une règle générale me semble très hypothétique. Aucun lecteur ne l'a trouvée, mais c'est un défi. Que les médaillés Fields se mobilisent...

BASE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PERIODE JEU NORMAL	2	3	4	5	9	57	114	183	645	501	120
PERIODE JEU INVERSE	2	3	4	5	9	57	114	18	645	501	1503

Figure 3

L'hippopotame aussi

Quand on le lance en l'air, le chat retombe sur ses pattes. Un autre animal possède ce don : l'hippopotame. Curieusement – alors que l'aptitude du chat à retomber d'aplomb est bien connue – celle de l'hippopotame n'a jamais été mise en évidence. Peut-être vous demandez-vous alors comment je sais qu'il la possède. C'est pourtant simple : je le sais parce que c'est vrai ! Je n'ai pas besoin d'attendre la confirmation expérimentale. (C'est l'avantage d'être un théoricien.) Pourquoi personne n'a-t-il encore eu la curiosité de lancer un hippopotame, et de le voir se récupérer habilement sur ses pattes (c'est un beau spectacle) ? Sans doute les chercheurs craignent-ils que l'animal, retombant dans la boue qui lui sert d'habitat, ne les éclabousse.

ment les mêmes termes qu'une autre personnalité, le mathématicien Alain Connes, interviewé voici quelques années : « Nous souffrons 90 % du temps », disait-il. Étrange constance de la proportion... Quel critère, alors, orientera un jeune masochiste vers le métier de mathématicien ou vers celui de coureur ?

Ceux qui en ont le goût pourraient entreprendre une collection de citations, dues aux professionnels les plus divers – écrivains, artistes, sportifs, scientifiques – reprenant toutes ce même thème. Il n'existe pas de spécialité qui ne mène à 90 % de souffrance (au moins !) quand on veut y exceller. Dure condition humaine.

S'il n'y a pas loin des inconnues à la gloire, il n'y a pas loin non plus de l'inconnu à l'anonymat. Or l'anonymat est cher aux adeptes de certains types de spectacles. C'est pour cela, j'imagine, que cette même lettre X désigne les films porno. Il y a beaucoup de sagesse dans cet usage : même vénale, même mimée grossièrement pour subvenir aux besoins des productions de films pour quartiers de gares, il y a toujours, dans la rencontre avec l'autre, un inconnu abyssal, tout le mystère du X.

Le passé est un mystère

Du nez de Cléopâtre à la maladie de Cromwell, en passant par le succès ou l'échec des attentats contre les tyrans, le rôle du hasard dans les affaires humaines donne le vertige. Mais s'agit-il bien de hasard ? La réponse à cette question diffère selon que l'événement considéré a déjà eu lieu, ou s'il est au contraire à venir, donc objet de craintes ou d'espoirs. Selon l'historien Jean Stengers, une étonnante dissymétrie sépare nos perceptions du passé et de l'avenir : le hasard s'applique au passé, guère à l'avenir.

Quand il pense à l'avenir, l'homme est habité de croyances – croyances en des forces bien ou malveillantes, en une bonne ou mauvaise étoile personnelle, en la possibilité d'infléchir les forces dont il dépend. Tout cela s'efface quand il se tourne vers le passé : « Que l'on songe aux innombrables prières adressées à Dieu pour qu'il évite aux hommes telle ou telle catastrophe. Que reste-t-il de cela lorsqu'on écrit l'histoire ? Pratiquement rien. Tout le vocabulaire, chargé d'idées et de sentiments, qui sert au présent et à l'avenir – le destin, la chance, la malchance, la veine, la poisse, la bonne fortune, la bonne étoile, la Providence, la baraka, le mauvais sort, l'injustice du sort, la bonté de Dieu, les aptitudes spéciales des saints – tout cela est presque complètement balayé, quand il s'agit du passé, au profit d'un mot et d'une idée : le hasard.

« Des mots chargés d'affectivité sont remplacés par un terme parfaitement neutre et froid. Toutes les forces que l'on croit voir en action dans le monde présent et futur sont obliérées au profit de l'incompréhensible. C'est le hasard, à peu près seul, qui occupe le passé. » (Jean Stengers, *Vertige de l'historien*, Les empêchements de penser en rond, 1998.)

Tu enfanteras dans la douleur

« C'est 90 % de souffrance et 10 % de bonheur », affirme Laurent Jalabert dans *Le Monde* (12-13 juillet 1998). L'étonnant n'est pas que cette personnalité soit un coureur cycliste : *Le Monde* s'est – récemment, mais fermement – reconverti en journal fana du sport. L'étonnant est que Jalabert utilise quasi-

X - files

Depuis que Descartes l'a utilisée pour désigner les inconnues, la lettre X fait une carrière magnifique. Elle a servi aux rayons X, ainsi baptisés initialement parce que leur nature était mystérieuse. Elle sert de réconfort aux victimes qui, à défaut de se venger d'un agresseur inconnu, se consolent en portant plainte contre X. Enfin, les étudiants les plus habiles à trouver les valeurs prises par l'inconnue X gagnent le droit d'entrer dans la Grande École, conséquemment surnommée X, ce qui est un premier pas vers la gloire.

L'impossible négativisme

On connaît l'ironie de cet homme préhistorique gravant de mystérieux hiéroglyphes sur une paroi tout en disant à son *Homo sapiens* de voisin : « Ça ne veut rien dire, mais ça les rendra fous dans 10 000 ans. »

D'autres beaux esprits, plutôt que s'exténuer à chercher le sens éventuel d'un texte obscur, déclarent sèchement qu'il n'en a pas. Ainsi ont procédé les physiciens A. Sokal et J. Bricmont. On s'en souvient, leur livre, *Impostures intellectuelles*, réunit des citations d'auteurs « postmodernes » suivies d'un blâme affirmant que les textes cités ne veulent rien dire. En réaction vient de paraître un livre collectif dont le titre sans surprise, *Impostures scientifiques* (La Découverte, 1998), annonce clairement l'intention : continuer la guerre. De cet ensemble inégal, retenons une remarque de Jean-Michel Salanskis : « L'affirmation qu'un texte n'a pas de sens est l'affirmation théorique la plus ambitieuse et la plus difficile à étayer qui soit. Établir qu'une phrase n'a pas de sens exigerait qu'on détienne une vue *a priori* des modes de la construction du sens, couvrant effectivement la multiplicité vertigineuse des possibilités en la matière, tenant compte de l'incidence de toutes les connivences et les partages de culture notamment. Je condamne donc la légèreté qu'il y a à professer dogmatiquement – et avec agacement par surcroît – que des phrases n'ont pas de sens. »

La position de J.-M. Salanskis a de la beauté. Seulement, les bluffeurs existent, semble-t-il : doit-on s'interdire tout moyen de les épinglez ? Et puis, même si J.-M. Salanskis a raison dans l'absolu, il faut une rare noblesse d'âme pour renoncer à ce plaisir grisant entre tous qui consiste à décréter que tel ou tel texte n'a aucun sens, donc que son auteur est un charlatan, donc que les lecteurs qui le prennent au sérieux sont des imbéciles...

L'aire manquante

Martin Gardner proposait dans *Les jeux mathématiques* (voir *Pour la Science* octobre 1998) l'énigme illustrée par la figure ci-dessous. Chaque motif est l'assemblage des mêmes 16 pièces, mais celui de droite a en plus un trou carré en son centre. D'où vient cette surface supplémentaire? La solution vient de la différence entre les angles aigus des petits et des grands triangles. Les côtés du motif de gauche sont donc légèrement concaves, tandis que ceux du motif de droite sont légèrement convexes : les angles aux coins sont supérieurs à 90 degrés, ce qui laisse au centre l'aire du carré.



Vaccination contestée

L'article de Philippe Kourilsky, *Un vaccin contesté* (voir *Pour la Science* septembre 1998) appelle quelques remarques. D'abord, ce n'est pas le vaccin qui est contesté, mais ses indications. J'injecte des dizaines de doses de vaccin anti-hépatite B, parfois plus de 20 par individu, depuis 15 ans, à des population à très haut risque, des hémodialysés. Qui peut contester que, dans cette population, la disponibilité du vaccin a été une révolution? Mais l'hépatite B se transmet par voie sexuelle et sanguine. Les précautions prises actuellement pour la transfusion rendent le risque extrêmement faible et, pour la transmission sexuelle, le préservatif reste la méthode de choix (avec le dépistage des partenaires qui deviennent réguliers) pour prévenir l'ensemble des maladies sexuellement transmissibles. À quoi sert alors de vacciner les nouveau-nés?

Comme pour toute thérapeutique, le fait d'étendre à la population générale la vaccination a fait apparaître les effets secondaires rares qui n'avaient pas été détectés auparavant. Combien de médicaments ont été retirés du marché quelques années après leur commercialisation, malgré les études préalables prouvant leur innocuité? Qui connaît un médicament efficace et sans aucun effet secondaire? Ce serait une grande première en médecine! Chaque fois que l'on introduit (notamment par effraction) dans l'organisme un antigène, il est susceptible de déclencher une réaction. Pourquoi contester que cet antigène destiné à

provoquer une réaction immunologique (fabrication d'anticorps anti-Hbs) chez un individu, puisse, sur un terrain particulier, provoquer une réaction immunologique inattendue qui peut intéresser de nombreux organes, et pas uniquement le système nerveux (voir sur l'Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/search%3Fhepatitis+b+vaccine+AND+side+effects>).

Chaque fois qu'un praticien prescrit un médicament, il doit évaluer le rapport «risque sur bénéfice», donc en connaître les deux termes, et informer son patient avant de décider avec lui d'une action thérapeutique. Les Français ne sont pas les seuls à nourrir des doutes, voir les sites aux adresses : <http://www.rmplc.co.uk/education/sites/autism9a.html> et <http://www.i-wayco.com/niin/vaccinationupdate/hepatitisb.html>

José GUIERIX, Saint-Pierre

On ne peut prétendre à la sécurité absolue. Sans doute, mais en tenant simplement compte des rapports entre l'intérêt et les risques, cette campagne de vaccination est un non-sens, en France. Peut-on éradiquer l'hépatite B dans un seul pays à l'heure de la mondialisation? On nous dit que l'un des objectifs premiers de l'Organisation mondiale de la santé est de supprimer cette maladie... Comment envisager sérieusement la chose en vaccinant 25 millions de Français au milieu de 320 millions d'Européens non vaccinés en les mêmes termes?

Jean-Marie GENDARME, Criel-sur-Mer

Pour étayer sa défense de cette vaccination, P. Kourilsky se réfère aux 271 cas d'atteintes démyélinisantes rapportées par l'Agence du médicament et ajoute qu'en fonction de l'incidence générale de ces maladies : «On en attendait deux à trois plus chez les vaccinés.» La vaccination aurait donc évité entre un tiers et la moitié des atteintes neurologiques! Pense-t-il sincèrement que l'on puisse adhérer à un tel raisonnement? Ces 271 cas correspondent en fait à des notifications spontanées que les médecins ont d'ailleurs beaucoup de mal à faire enregistrer, et après des délais interminables.

Les seules données irréfutables seraient des enquêtes épidémiologiques approfondies, effectuées par des experts indépendants. L'enquête, c'est qu'actuellement elles sont inexistantes. Ainsi, dans un dossier publié en 1997 par la Pharmacie centrale des hospices civils de Lyon, après neuf ans de mise sur le marché et six ans d'utilisation massive des vaccins recombinants, on lit : «L'efficacité des vaccins recombinants en terme de protection contre l'hépatite B a été évaluée» et : «Il convient

de promouvoir des études épidémiologiques appropriées pour explorer, notamment, les effets indésirables de ces vaccins.»

Le cas du BCG auquel P. Kourilsky se réfère est exemplaire. Une étude effectuée en 1984 situait le risque d'ostéite à BCG à 1 pour 28 270 en Suède et 1 pour 2 700 000 en France, soit 100 fois moins! L'explication la plus simple est qu'il n'existe pas de système de surveillance régulier de ces incidents en France.

Quant à l'évaluation du rapport entre le coût et le bénéfice de la vaccination antihépatite B, le résultat de la seule étude que je connaisse est sans appel : la politique vaccinale coûte 20 fois plus cher que le traitement des hépatites pour la population générale et cinq fois plus cher pour les hommes de 15 à 40 ans. Le coût est équivalent pour les homosexuels. La politique vaccinale ne devient rentable que pour les toxicomanes.

Michel GEORGET, Chambray-lès-Tours

Réponse de Philippe Kourilsky

La publication par les autorités de santé, le 1^{er} octobre 1998, d'un ensemble détaillé de données épidémiologiques ainsi que d'une étude de la comparaison des bénéfices et des risques de la vaccination contre l'hépatite B, répond à la plupart de ces remarques. Les conclusions ayant été largement diffusées et commentées, il suffit ici de rappeler deux points majeurs.

Aucune association statistiquement significative entre vaccination et sclérose en plaques (SEP) n'a été dégagée, ni dans les études françaises ni à l'étranger (voir le rapport de l'Organisation mondiale de la santé élaboré à la suite de la réunion d'experts tenue à Genève du 28 au 30 septembre 1998). Une étude menée en Grande-Bretagne laisse ouverte, mais sans validation des données, la possibilité que la vaccination agisse comme un révélateur, en provoquant une accélération des symptômes de la SEP sans en accroître l'incidence. L'évocation, par certains responsables, d'une «tendance» à l'association, est assez surprenante, car cette notion n'a pas de sens statistique. L'absence d'association est une conclusion qui, en raison de sa nature statistique, ne vaut que dans un certain intervalle de confiance. Ce que l'on peut traduire d'une autre manière : la vaccination est inoffensive sauf, peut-être, pour une sous-population dont la taille est d'autant plus réduite que les données épidémiologiques sont plus abondantes. On imagine, sans en avoir la preuve, que cette sous-population hypothétique pourrait être constituée de ceux qui ont des antécédents de SEP. Ce qui induit une logique de l'interrogatoire préalable à l'acte vaccinal. C'est, si j'ai bien compris, ce qui a conduit les pouvoirs publics à suspendre

DES LECTEURS

la vaccination des pré-adolescents en milieu scolaire.

La comparaison des bénéfices et des risques effectuée par J. Drucker et ses collaborateurs penche fortement en faveur de la vaccination (il s'agit de bénéfices médicaux et non économiques, comme l'évoque un lecteur). Le rapport souligne à nouveau l'absence de corrélation statistique et montre que, dans l'hypothèse d'une association, le nombre de premières atteintes démyélinisantes centrales (signalant l'émergence de la SEP) dans une cohorte de 800 000 pré-adolescents non vaccinés et fictivement suivis jusqu'à l'âge de 30 ans serait situé dans une fourchette de 0,56 à 2 cas au total. Dans le même temps, la vaccination éviterait, selon les scénarios, entre plusieurs centaines et plusieurs milliers d'infections par le virus de l'hépatite B, d'où résulteraient entre 3 et 29 hépatites aiguës fulminantes, ainsi qu'entre 12 et 147 cancers du foie.

L'objectif de la vaccination contre l'hépatite B n'est pas d'éradiquer le virus (ce qui n'est pas possible dans le court terme, en raison du nombre élevé de porteurs chroniques), mais d'offrir une protection individuelle contre la maladie. La vaccination des nourrissons a pour buts principaux de mettre l'enfant à l'abri de l'infection, de protéger le futur adolescent, et de bloquer la transmission verticale à partir de mères porteuses du virus. Dans les trois cas, les risques ne sont pas négligeables en raison de l'existence, en France, de 100 000 à 150 000 porteurs chroniques, pour la plupart asymptomatiques. La vaccination des enfants est à la fois efficace et de longue durée. Telles sont, je pense, les raisons qui motivent la recommandation des autorités de santé de poursuivre la vaccination des nourrissons. Selon les conclusions du rapport de J. Drucker, celle-ci devrait même être amplifiée, de façon à compenser la baisse de vaccination des pré-adolescents.

On ne pourra jamais conclure à l'innocuité absolue du vaccin, de même qu'on ne peut être totalement assuré que la prise d'un comprimé d'aspirine ne va pas provoquer un accident grave. La recherche du risque minimum est un exercice difficile. En l'occurrence, la suspension, en milieu scolaire, de la vaccination des pré-adolescents semble privilégier un risque hypothétique et faible par rapport à un risque avéré et beaucoup plus élevé. Ceci me renforce dans la conviction que j'ai déjà développée ailleurs qu'il est essentiel de mener des réflexions plus approfondies sur la notion de risque et sur le concept de précaution. Le principe de précaution est généreux dans l'intention, mais il recouvre d'importantes inversions de logique sociale. Dans son état actuel, il est largement dépourvu de contenu et peut être invoqué et utilisé à n'im-

porte quelle fin, y compris celle de bloquer toutes innovations, s'il n'est pas assorti de définitions et de méthodologies qui permettent de mieux circonscrire et, dans certains cas, de hiérarchiser les risques. Comme les réactions de certains lecteurs le montrent, les attitudes envers la vaccination sont souvent passionnelles. L'histoire de la vaccination et l'analyse des réactions qu'elle a suscitées et suscite encore, valent d'être réfléchies. L'actuel débat prendrait sa vraie dimension s'il était inscrit dans une réflexion calme et posée sur la définition et l'acceptabilité des risques aux plans individuel et collectif.

Atomes et éléments

Dans l'article de Philippe Chomaz et Gilles de France *Les symétries dans les atomes et les noyaux* (voir *Dossier Pour la Science, Les symétries de la nature*), on lit que «les Grecs connaissaient les cinq polyèdres réguliers... et les identifiaient aux cinq substances simples du monde : les cinq atomes». Platon a dû se retourner dans sa tombe, lui qui, contrairement à Démocrite et à ses atomes, a décrit le monde comme formé de quatre éléments associés chacun à un polyèdre régulier, le feu (le tétraèdre), la terre (le cube), l'air (l'octaèdre) et l'eau (l'icosaèdre), le cinquième solide régulier, le dodécaèdre, représentant l'Univers.

Plus loin, on apprend que : «Les propriétés chimiques des atomes varient périodiquement avec le numéro atomique comme l'a observé Alexei Mendeleïev sans le comprendre.» Alexei Mendeleïev doit être un parent de Dimitri Mendeleïev, l'homme de la classification périodique des éléments qui, mort en 1907, n'a effectivement rien compris à l'interprétation électronique de la notion de numéro atomique élaborée en 1913 par Henri Moseley.

Georges BRAM, Orsay

Réponse de Philippe Chomaz

Ces remarques sont justifiées. On peut ajouter que les Grecs ne connaissaient au début que quatre polyèdres réguliers, donc quatre éléments, et que la découverte d'un cinquième les plongea dans une grande perplexité. Cette crise a été résolue en associant le cinquième à l'éther.

Pour ce qui est du numéro atomique c'est la masse qui a servi de base à la classification périodique de Dimitri Mendeleïev, et non le nombre d'électrons, même si aujourd'hui nous savons que c'est ce dernier qu'il faut considérer. La vérité historique ne coïncide pas toujours avec la vérité physique, et les connaissances nouvelles permettent parfois de réinterpréter les découvertes anciennes et de corriger des erreurs.

Les modes en sciences

GUY OURISSON

L'attribution démocratique des crédits amplifie les modes.

Les sciences dures ne suivraient pas la mode et ne pourraient la subir. Elles avanceraient par étapes, quand elles le peuvent, quand les scientifiques constatent qu'ils peuvent combler une lacune, expliquer un point jusqu'alors inexpliqué, quand ils peuvent utiliser ce qu'ils ont acquis dans un domaine pour faire progresser un champ différent. Comment des activités aussi raisonnables, aussi rationnelles, seraient-elles influencées par des modes? Les activités scientifiques ayant d'autant plus de mérite qu'elles sont originales, elles perdraient tout mérite si elles n'étaient que des exercices à la mode.

Voire! Un instant de réflexion suffit pour démontrer l'ineptie de cette vision angélique du travail en sciences dures. Tout d'abord, la mode qu'on lance est parfaitement recommandable. Ainsi la chimie mettant en jeu des assemblages de molécules, la chimie supramoléculaire lancée, il y a une vingtaine d'années par Jean-Marie Lehn, valut à ce dernier un prix Nobel. Le style lucide que J.-M. Lehn utilise pour présenter ses travaux, les développements originaux qu'il n'a cessé d'y apporter, le choix d'un excellent terme, intuitivement compréhensible dans toutes les langues, ont attiré des dizaines de groupes de recherche, et la chimie supramoléculaire est devenue un axe majeur de développement de la chimie. Pourtant, si les travaux de J.-M. Lehn et de quelques autres qui s'en inspirent constituent une œuvre réellement originale, que de suivistes!

Pourquoi les démarches originales sont-elles l'exception? En partie parce qu'en sciences dures, certaines modes sont imposées par les commissions qui attribuent les moyens de travail. On peut ainsi accuser les commissions du CNRS d'avoir d'abord retardé en France l'avènement de la biologie moléculaire, à laquelle elles n'étaient pas réceptives. Cette obstruction a conduit les biologistes moléculaires à contourner le système, par une voie moins démocratique : ils ont obtenu leurs crédits de recherche

en s'adressant à la Délégation générale de la recherche scientifique et technique. Puis, une fois en place, les biologistes moléculaires ont siégé dans des commissions, et ils ont tué les sciences naturelles.

Ce type de fonctionnement pathologique résulte d'une difficulté de partage des crédits : il n'y en a pas assez pour toutes les disciplines, et les secteurs les plus actifs accaparent les budgets. Ainsi, quand la biologie a examiné les bases moléculaires du fonctionnement du monde vivant, elle a fait de si foudroyants progrès qu'elle a bouleversé notre santé, notre alimentation, l'économie mondiale, mais aussi la psychologie sociale de nos pays. Les activités plus classiques ont semblé peu fructueuses et peu utiles.

La situation est même devenue paradoxale : alors que la mode moléculaire, si fertile, si innovante, devenait hégémonique, nos grands herbiers, tels celui du Muséum, n'ont pas assez bénéficié des possibilités nouvelles que leur offraient l'informatique, le traitement des images, l'analyse chimique automatisée à grand débit ou les méthodes d'analyse du génome. Le dernier rapport de conjoncture du CNRS, en 1996, contient, dans ses 600 pages, quelques brefs paragraphes qui défendent les sciences naturelles, sans utiliser ce terme démodé, mais comment un chasseur de papillons pourrait-il être recruté comme chargé de recherche si la commission qui décide est majoritairement acquise aux modes modernes?

La belle affaire, a-t-on dit : les herbiers ou collections de papillons sont jolis, mais inutiles. Là encore, méfions-nous de jugements hâtifs : cet été, les revues *Nature* et *Science* ont signalé l'état de santé désastreux des grenouilles du monde entier : le crapaud doré semble avoir disparu des Antilles ; dans d'autres régions, plusieurs espèces ne sont plus qu'en petit nombre ; les grenouilles sèchent sur pied, et un examen postmortem montre qu'elles ont été infectées par un champignon dont on ignorait qu'il attaquait les

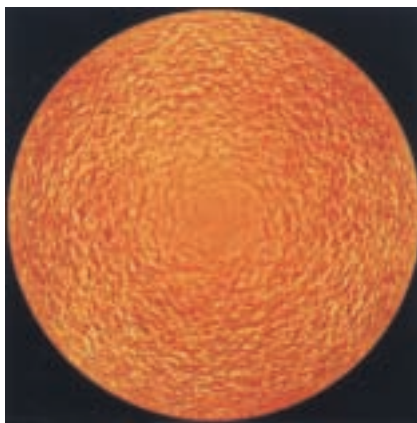
batraciens. Hélas, les spécialistes des grenouilles sont devenus encore plus rares que les batraciens eux-mêmes, et personne ne sait interpréter les observations : s'agit-il de phénomènes cycliques, et donc réversibles? Ou bien cette infection risque-t-elle de devenir une pandémie? Peut-on se passer de grenouilles sans souffrir ensuite d'invasions de moustiques et de limaces? Les grenouilles sont-elles sensibles au champignon parce qu'elles avaient été fragilisées par les ultraviolets, que l'atmosphère dégradée filtrerait mal? La disparition des grenouilles annonce-t-elle notre apocalypse? La disparition programmée des batrachologues et autres naturalistes de terrain nous oblige à avouer notre ignorance.

Comment éviter un trop fort effet des modes sur l'attribution des crédits de recherche et, donc, sur la survie de certaines disciplines? Comment compenser le pouvoir de nuisance de commissions démocratiques, où la majorité impose logiquement sa loi? La commission des subventions pour la recherche de l'OTAN a utilisé une méthode qui consistait à ne distribuer selon les critères démocratiques classiques que 90 pour cent des crédits disponibles, et à réserver les dix pour cent restants aux projets hors mode, quitte à renvoyer ces dix pour cent à la séance suivante, quand ce type de demande manquait. C'est ainsi qu'elle a réussi à subventionner une étude turco-irlandaise sur le contenu des rêves dans les différentes civilisations européennes, une étude italo-américaine sur l'utilisation de photographies de satellites pour l'étude de l'évolution architecturale d'une ville italienne, des études des petits animaux des forêts africaines, etc.

Les chercheurs ne doivent pas redouter l'existence de modes, mais ils doivent les lancer plus que les suivre, et les institutions scientifiques doivent plus les contrôler que les subir.

Guy OURISSON est vice-président de l'Académie des sciences.





La musique des sphères

MARC LACHIEZE-REY • JEAN-PIERRE LUMINET

Des Pythagoriciens à la physique moderne, les démarches intellectuelles qui cherchent à appréhender le monde utilisent la notion d'harmonie.

Les globes voltent sous mes doigts, traçant les courbes musicales de ce poème. (André Suarès, «Le Musicien des sphères», dans *Images de la grandeur*, 1901)

En physique, l'une des plus intéressantes théories d'unification des interactions tente de décrire les particules non pas comme des corpuscules ponctuels, mais comme des vibrations de minuscules «cordes», entités géométriques à une dimension. Ce type de modélisation, fondé sur des symétries mathématiques particulières, constitue l'un des derniers développements d'une tradition qui remonte aux Pythagoriciens.

Pour ces derniers en effet, l'Univers devait nécessairement se manifester par des proportions «justes», par des rythmes, par des nombres : le monde chantait et vibrerait harmonieusement ! Dès le VI^e siècle avant notre ère, ils avaient remarqué que les intervalles musicaux tels que l'octave, la quinte, la tierce, etc., s'obtiennent en faisant vibrer des cordes dont les longueurs sont des fractions entières de la longueur qui engendre la note fondamentale, comme $1/2$, $2/3$, $3/4$, etc. Considérant le cosmos dans son ensemble comme un système harmonieux, ils en avaient déduit que les sept notes naturelles de la gamme étaient en correspondance avec les sept corps célestes connus (le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles), auxquels s'ajoutaient trois sphères supplémentaires pour atteindre le nombre dix, parfait entre tous (car c'est notamment la somme des quatre premiers entiers).

Un peu plus tard, au IV^e siècle, Platon décrit, dans *l'Épinomis*, cette harmonie céleste, en déclarant notamment que les astres exécutent «le plus magnifique de tous les chœurs». Cicéron évoque dans le *Songe de Scipion* ce son «si intense et si agréable» qui remplit les oreilles de son héros : «l'impulsion et le mouvement de ces orbes [célestes] sont réglés selon certains intervalles inégaux, obéissant à des rapports de proportion très exacts. Les plus aigus sont tempérés par les plus graves, et leur équilibre donne différentes harmonies.»

Cette tradition, assimilant le cosmos à un instrument de musique, se perpétue pendant le Moyen Âge et jusqu'à la renaissance scientifique. Au XVII^e siècle, le jésuite encyclopédiste Athanasius Kircher évoque, dans *l'Œuvre universelle des muses* (*Musurgia universalis*), «la grande musique du monde, cette merveilleuse correspondance des cieux, des éléments et des créatures» (voir la figure 4), tandis que le médecin londonien Robert Fludd décrit, dans *Des deux mondes* (*Utriusque Cosmi*), l'Univers comme un luth monocorde conçu par Dieu, dont les dix registres (les dix sphères célestes pythagoriciennes) traduisent l'harmonie de la Création.

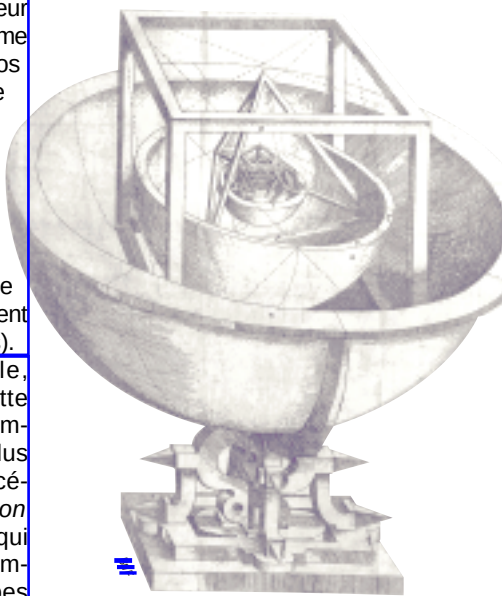
Pour le Français Marin Mersenne, tout ce qui s'exprime par des proportions peut être traité en termes d'harmonie et donc, en particulier, la disposition des orbes célestes. À la même époque, l'astronome allemand Johannes Kepler reprend l'idée qu'un astre émet un son d'autant plus aigu que

son mouvement est rapide, et l'adapte à sa découverte de la nature elliptique des orbites planétaires : des intervalles musicaux bien définis sont associés aux planètes (voir la figure 3). Kepler voit dans cet enrichissement de la symphonie céleste la confirmation de sa découverte : la «beauté harmonique» du monde, qui selon lui émane d'une volonté divine explicite et s'adresse directement à notre âme.

Près d'un siècle plus tard, l'œuvre d'Isaac Newton englobe deux visions du monde apparemment antagonistes : d'une part une conception mécaniste (le monde s'explique comme une grande horloge réglée par des lois universelles) ; d'autre part, l'idée que la nature reste soumise à une harmonie d'ordre supérieur – d'où son intérêt profond pour l'alchimie, la théologie, voire l'astrologie. En réalité, les immenses succès de sa mécanique (prédiction du retour des comètes périodiques, découverte de la planète Neptune par le calcul) seront en partie dus à la mise en œuvre de nouvelles et puissantes constructions mathématiques, dont l'accord avec le monde observable exprime l'harmonie de ce dernier. Newton accomplit ainsi le rêve de Kepler : «Cet arrangement aussi extraordinaire du Soleil, des planètes et des comètes n'a pu avoir pour source que le dessein et la Seigneurie d'un être intelligent et puissant» (*Principes de la Philosophie Naturelle*, 1687)

L'HARMONIE DANS LA PHYSIQUE MODERNE

Après Newton, l'harmonie sera toujours invoquée par les physiciens pour décrire et pour comprendre le monde, mais sous des formes nouvelles. «Quand, à une certaine occasion, j'ai demandé au professeur Einstein comment il avait trouvé la théorie de la relativité, il me répondit qu'il l'avait trouvée parce qu'il était tout à fait convaincu de l'harmonie de l'Univers» rapporte l'épistémologue Hans Reichenbach. Métaphysique, philosophie, religion, éso-térisme, références musicales et artistiques disparaissent du discours explicite de la



1. Dans *Le secret du monde*, Kepler voyait l'Univers comme un emboîtement de solides parfaits : «les solides symétriques s'insèrent les uns après les autres avec tant de précision entre les orbites appropriées que si un paysan demandait à quels crochets les cieux sont fixés, il serait facile de lui répondre».

science. Physique et astrophysique parlent pourtant de spectres, de fréquences, de résonances, de vibrations, d'analyse harmonique. Grâce à cette dernière notamment, n'importe quel signal variable dans le temps peut se décrire par une composition de fonctions trigonométriques.

Cette harmonie est exprimée sous une forme mathématique, plus souvent géométrique que musicale conformément au programme que Galilée propose dès 1623 dans *Il Saggiatore* (*L'Essayeur*). «Or [l'Univers] est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vraiment en un labyrinthe obscur». La physique post-newtonienne oscille en fait entre une conception purement mécaniste et une vision plus harmonique. Cette hésitation rappelle un antagonisme évoqué par Héraclite, selon lequel l'harmonie émise par la lyre résultait d'une lutte entre la tension des cordes et le bois.

La vision harmonique possède à son actif quelques-unes des synthèses fondatrices de la physique : après les tentatives géométriques et musicales de Kepler, il y eut la formule empirique de Titius-Bode, établie à la fin du XVIII^e siècle, qui décrivait la distance des planètes au Soleil par une suite harmonique : la Terre est à $0,4 + 0,3 \times 2^1$, soit une unité astronomique du Soleil, Mars en est à $0,4 + 0,3 \times 2^2$ unités astronomiques, etc. Autre exemple, au XIX^e siècle, la classification des raies spectrales de l'atome d'hydrogène en fonction de ses fréquences vibratoires fut initialement proposée par le Suisse Johan Balmer, puis reprise par le Suédois Johannes Rydberg. Ils découvrirent que les fréquences des raies d'émissions (qui résultent d'une désexcitation de l'atome) s'expriment par une formule unique qui faisait intervenir des nombres entiers, à la manière des intervalles musicaux. Aujourd'hui, cette «harmonie» spectrale s'explique bien dans le cadre de la mécanique quantique : les niveaux d'énergie des électrons d'un atome étant discrets et non continus, ils peuvent être mis en correspondance avec des nombres entiers

L'harmonie secrète du monde prend aujourd'hui le nom de symétrie. La physique contemporaine utilise en effet les symétries de la géométrie moderne, c'est-à-dire l'invariance de certaines figures ou objets mathématiques par des transformations mathématiques (des groupes de symétries), pour décrire, classifier, unifier les particules élémentaires et leurs interactions, ainsi que les modèles d'Univers dans son ensemble. Platon ou Kepler ne faisaient rien d'autre. La théorie des groupes, l'outil mathématique moderne qui permet

d'exprimer les symétries, a seulement élargi la palette des symétries utilisables : au lieu d'utiliser les symétries simples de la sphère ou des polyèdres réguliers (invariance par des rotations continues ou discontinues), les physiciens utilisent des symétries plus complexes (groupe d'inva-

riance de matrices, groupes cristallographiques, etc.), mais qui ouvrent de nouvelles perspectives. C'est avec ces groupes que sont décrits les comportements des particules, que sont développées la théorie quantique des champs, les théories de jauge ou la théorie des supercordes.



2. Dans ses *Divines harmonies*, Hildegarde de Bingen (1098-1179), abbesse du monastère des Bénédictines de Rudesheim, décrit sa musique comme un moyen de saisir la joie et la beauté originelle du paradis. Cette miniature extraite du *Scivias* (*Connaît le chemin*) illustre la conception de la mystique rhénane, selon laquelle l'homme est, dès sa naissance, en accord symphonique avec le ciel.



3. Dans *Harmonices Mundi*, œuvre majeure de Kepler, l'astronome expose sa troisième loi selon laquelle les carrés des temps des révolutions sidérales sont proportionnels aux cubes des grands axes de leurs orbites. Kepler associe à chaque planète non plus une seule note, comme c'était le cas avec des orbites circulaires, mais plusieurs notes, déterminées par la variation de la vitesse sur l'orbite elliptique. Pour mieux se convaincre de sa trouvaille, Kepler note que «La Terre chante mi, fa, mi afin que tu conjectures, à partir des syllabes, que la misère et la famine prévalent dans notre domicile».

LE CHANT QUANTIQUE

Une longue controverse, prolongée jusqu'au début de notre siècle, a opposé les visions corpusculaire et ondulatoire de la lumière. Selon Newton, les rayons lumineux étaient constitués de petits grains de lumière, mais cette conception ne pouvait rendre compte des phénomènes d'interférences ni de diffraction. Dans l'expérience de Young, par exemple, un pinceau de lumière traverse deux trous situés devant un écran. Or, sur l'écran, n'apparaissent pas des impacts de corpuscules, mais une alternance de zones sombres et de zones claires ; ces «franges d'interférences» résultent de la composition de l'onde lumineuse avec elle-même, tantôt s'annulant (zones sombres), tantôt se renforçant (zones claires).

L'hypothèse ondulatoire, quant à elle, est incompatible avec l'effet photoélectrique : des électrons peuvent être arrachés à un métal soumis à une irradiation lumineuse. Pour expliquer cet effet, Einstein avait supposé en 1905 que la lumière est constituée d'un ensemble de corpuscules, les photons.

Le corpuscule, objet quasi-ponctuel précisément localisable, et l'onde, structure délocalisée, «étalée» dans tout l'espace, sont apparemment antagonistes. La nature vibratoire des ondes lumineuses, l'analogie avec les ondes sonores qui en constituent le modèle, leur confère explicitement une connotation harmonique, insistant notamment sur ce qui réunit les objets physiques, tandis que la vision purement corpusculaire considère le monde comme un assemblage de particules individuelles.

Chacune de ces conceptions – mécaniste et particulière d'un côté, harmonique et ondulatoire de l'autre –, est insuffisante si elle est prise séparément. La révolution de la physique quantique a consisté à résoudre la contradiction, en introduisant une vision «dualiste» : ni particulière, ni ondulatoire dans le sens classique, le «champ quantique» incarne une synthèse

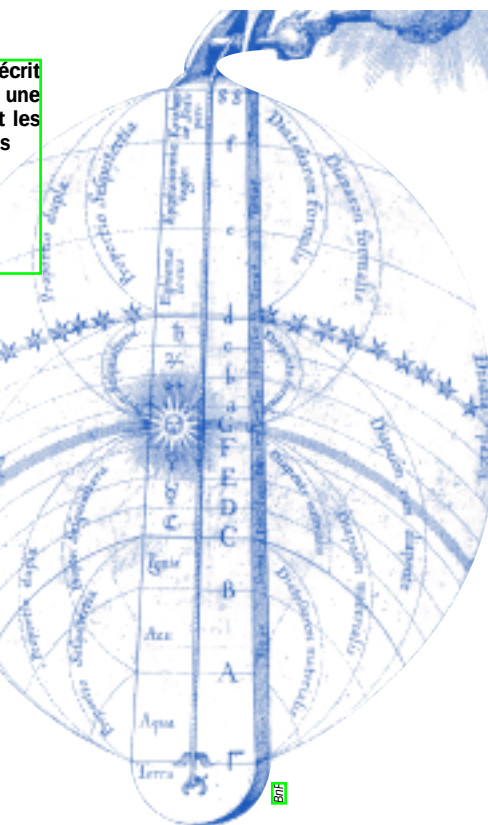
4. Le médecin alchimiste Robert Fludd (1619) décrit l'Univers comme un instrument de musique à une corde dont les modes vibratoires représentent les astres. La corde cosmique embrasse deux octaves de sept notes chacune. Les deux octaves s'étendent du sol grave (Γ) associé à la Terre, jusqu'à un sol aigu associé à l'Empyrée (la demeure des dieux) (gg), en passant par le sol médian associé au Soleil (G).

des aspects mécaniste et harmonique. Non seulement la lumière, mais aussi la matière, sont des champs quantiques.

Un champ quantique remplit l'espace entier, comme une immense membrane prête à vibrer. Ses vibrations (analogues à celles d'un tambour qui émet des sons) se manifestent, selon leur nature, sous forme de lumière, ou sous forme de particules : matière, lumière, rayonnements, toute la réalité observable du monde n'est qu'excitation de champs quantiques. Certains modes de vibration du champ électromagnétique correspondent à la lumière ordinaire, d'autres aux ondes radio, aux rayons X, etc. D'autres champs matérialisent des quarks (les constituants élémentaires du neutron et du proton) et des électrons. Tous ces champs constituent le monde. Les lois de la physique quantique ne sont autres que les règles harmoniques qui gouvernent les vibrations des champs.

CORDES VIBRANTES

Malgré son expression en termes de champs, la physique quantique est encore sous-tendue par une représentation de certaines particules élémentaires, comme l'électron ou le photon, en termes de points de dimension nulle. Cela pose plusieurs problèmes conceptuels. Par exemple, des infiniment grands apparaissent dans les calculs lorsque des infiniment petits, dus aux dimensions nulles des particules, se retrouvent au dénominateur. Ces «singularités» sont indésirables, car, en physique, toute quantité mesurable doit être finie. La



présence de telles singularités était déjà gênante en physique classique. De surcroît, en physique quantique, l'idée de particule de dimension nulle s'accorde mal avec les relations d'incertitude – selon lesquelles il est impossible, par exemple, de localiser en un point infiniment précis la position d'une particule. Mais surtout, comment attribuer à une particule sans dimension les degrés de liberté correspondant aux différents nombres quantiques, tels que la charge électrique, le spin (ou moment cinétique élémentaire) ?

La théorie des cordes résout en partie ces difficultés en identifiant les entités élémentaires – les particules – à des lignes ou à des boucles extrêmement petites, et non à des points. Toutes les propriétés des particules résultent alors des différents modes de vibrations de ces cordes ouvertes ou fermées. Introduit dans les années 1960, le concept de corde fut abandonné, puis réintroduit 20 ans plus tard en vue d'une unification des lois de la physique : certains physiciens espèrent aujourd'hui que cette théorie rendra compte des quatre interactions fondamentales connues – la gravitation, l'électromagnétisme, les interactions nucléaires forte et faible – en termes d'une «superinteraction» unique.

Enrichie d'une symétrie supplémentaire, la «supersymétrie» (selon laquelle toute particule de spin entier a un partenaire supersymétrique de spin demi-entier), la théorie des cordes a été renommée «théorie des supercordes». Toutefois, les physiciens ne peuvent la formuler de façon cohérente que dans un



4. Certains théoriciens ont imaginé que les éléments constitutifs du monde pourraient être des cordes de diamètre infime et non des particules ponctuelles (sans dimension). Les interactions entre cordes seraient les fondements de la physique microscopique.

espace muni d'un grand nombre de dimensions. Le monde serait ainsi fait d'entités à une dimension (les cordes) vibrant dans un espace à n dimensions ($n = 10$ ou 26 , selon les modèles) (voir la figure 4).

Premier problème, comment retrouver les trois dimensions usuelles de l'espace (les supercordes ne prévoient pas de dimension supplémentaire du genre «temps»)? Le plus simple est de considérer que les dimensions supplémentaires sont fortement enroulées sur elles-mêmes, selon un rayon de courbure infime. À notre échelle de résolution, l'espace semblerait posséder trois dimensions, pour les mêmes raisons qu'une ficelle, objet à trois dimensions, semble ne posséder qu'une dimension lorsqu'elle est vue de loin, du fait de sa faible épaisseur. Ce n'est qu'à des échelles microscopiques (de l'ordre de 10^{-35} mètre, la longueur de Planck) que les dimensions supplémentaires de l'espace seraient manifestes.

Ces théories, mathématiquement si complexes que personne ne parvient aujourd'hui à les maîtriser vraiment, ont de nombreux aspects séduisants. En particulier, la gravitation, qui paraît si différente des autres interactions (elle n'est pas quantifiable au sens habituel du terme) y est décrite de manière naturelle. Si ces théories se révèlent pertinentes, il restera à interpréter la nature intime du monde, dont les propriétés résulteraient des modes vibratoires de cordes à jamais inaccessibles à nos sens.

On retrouve ainsi, par un biais inattendu, la musique secrète des Pythagoriciens, qui n'est perceptible qu'aux «oreilles» adaptées à leur écoute. Dans le *Songe de Scipion*, Cicéron disait que la musique des astres ne pouvait s'entendre qu'en quittant la Terre pour rejoindre les orbes gigantesques du ciel. La théorie des supercordes nous suggère que la musique des particules microscopiques ne pourrait s'appréhender qu'en plongeant au cœur de l'infiniment petit.

Marc LACHIÈZE-REY et Jean-Pierre LUMINET, directeurs de recherche au CNRS, sont commissaires de l'exposition «Figures du ciel» qui se déroule à la bibliothèque François-Mitterrand du 10 octobre au 10 janvier 1999.

Marc LACHIÈZE-REY et Jean-Pierre LUMINET, *Figures du ciel*, Seuil / Bibliothèque nationale de France, 1998

***Les nouvelles théories des cordes, Pour la Science*, avril 1998**

Étienne KLEIN et Marc LACHIÈZE-REY, *La quête de l'unité*, Albin Michel, 1996

Jean-Pierre LUMINET, *Les poètes et l'univers*, Le Cherche Midi, 1996

Dominique PROUST, *L'harmonie des sphères*, Dervy, 1990.

Baisse des taux en Europe : les politiques contre les banques centrales

Le Monde, 8 octobre 1998

En ces temps de perturbations boursières et de mouvements de capitaux, l'attention se porte sur la «politique monétaire» des autorités. Notamment sur les déclarations du président de la *Federal Reserve* américaine, examinées à la loupe par les savants exégètes financiers. Une bonne politique monétaire renforce la croyance en des «valeurs sûres» – essentiellement, les titres (obligations et bons du Trésor) émis par l'État.

Éliminons une idée simpliste : une bonne politique monétaire n'a pas pour première finalité la protection de vos économies : elle est conçue pour réguler l'activité économique et le niveau des prix. La politique monétaire détermine l'activité des banques, qui créent de la monnaie lorsqu'elles acceptent les demandes de crédit. Cette régulation peut être directe, de type réglementaire, par un rationnement du crédit, la banque centrale imposant une limite à la prodigalité des banques ; le terme très suggestif de «corset» a été utilisé en Angleterre dans les années 1950 pour désigner la contrainte imposée par le crédit rare.

Toutefois une intervention directe de l'État serait mal acceptée par les tenants plus ou moins durs du libéralisme. Aussi l'action indirecte prévaut-elle : la banque centrale n'interdit pas le crédit, mais agit sur les taux d'intérêt, rendant le crédit plus ou moins cher. Les taux d'intérêt, fixés par la banque centrale ou le Trésor public, constituent le taux minimum de référence pour les banques. Ainsi la «politique monétaire» ne porte pas sur la monnaie, mais sur les taux d'intérêt !

Comment ces taux modifient-ils la masse monétaire ? Indirectement, par le biais de l'activité économique qui induit la création monétaire (à travers le crédit) ; la relation causale entre les variations de la production et celles de la masse monétaire s'exerce dans le sens produit-monnaie et non dans le sens contraire, comme journalistes et économistes le laissent entendre. Nous sommes loin de

Le «levier» de la politique monétaire

BERNARD GUERRIEN • SOPHIE JALLAIS

Ce levier serait les taux d'intérêt des banques centrales. D'autres leviers, comme les taxations, ont plus d'effets sur l'activité économique.

l'époque où l'or et l'argent étaient des éléments essentiels de la masse monétaire, au point que l'afflux de métaux amenés d'Amérique par les galions espagnols de Philippe II provoquait une hausse brusque de la demande de biens, donc de l'activité et surtout des prix.

Les taux d'intérêt déterminent le coût des emprunts : une hausse entraîne le retrait de certains projets, une baisse en rend d'autres attrayants. Ainsi, les variations du taux d'intérêt influent-elles sur l'activité économique, et donc sur la création monétaire : l'action causale n'est pas du type monnaie-activité, mais de la forme taux intérêt-activité-masse monétaire. Les fluctuations, parfois brutales, des marchés boursiers qui suivent les variations – réelles ou anticipées – des taux d'intérêt de la Réserve fédérale américaine ou de la *Bundesbank* en témoignent. Toutefois le levier des taux d'intérêt a «beaucoup de jeu», et la réaction de l'appareil économique à cette commande peut être imprévue, voire perverse.

LA «LOI DE GOODHART»

Pendant les années 1980, les autorités monétaires ont essayé de contrôler la masse monétaire (par les taux d'intérêt), en fixant des marges dans lesquelles elle devait évoluer (politique alors qualifiée de «monétariste»). L'échec fut patent, en partie à cause d'une particularité de l'économie : les «particules élémentaires» économiques sont des êtres pensants et actifs, qui modifient leur comportement en tenant compte du contexte. Ainsi, les individus, quand ils constatent que certaines «lois» – régularités observées – régissent l'activité économique, alors ils en tiennent compte et, ce faisant, les transforment (ou les infirment).

Le phénomène est patent dans les domaines monétaire et financier : dès qu'on constate une régularité ou que les autorités imposent une règle, alors les agents économiques modifient leur comportement, de sorte que la régularité

disparaît ou la règle est contournée. Goodhart, un économiste de la Banque d'Angleterre, a constaté qu'il suffit que les autorités annoncent publiquement les objectifs qu'elles se fixent concernant l'évolution de la masse monétaire pour qu'ils ne se réalisent pas.

Et cela pour une raison fort simple : afin d'éviter des pertes, dans le cas où les objectifs gouvernementaux ne seraient pas atteints, les agents font appel à des moyens de paiement autres que ceux pris en compte par les autorités (dans l'évaluation par celles-ci de la masse monétaire) ou, si nécessaire, en inventent de nouveaux (qui sont, sous des formes diverses, des reconnaissances de dettes). En conséquence, l'évolution de la masse monétaire est difficilement prévisible, voire chaotique, et plus personne ou presque n'accorde une grande importance à cette évolution, dont la mesure dépend d'ailleurs de l'indicateur utilisé pour l'évaluer.

Pour le «pilotage», l'État dispose d'un autre levier : les interventions sur la production, la consommation et la distribution, que ce soit de façon directe (construction d'infrastructures ou entreprises nationales) ou indirecte (à travers les taxes et subventions). C'est la politique budgétaire. Ce levier est moins à la mode que le taux d'intérêt et, pourtant, son action est moins imprécise, puisque plus en prise avec l'activité économique. Évidemment, elle s'inscrit contre l'idée – trop répandue – que ce type d'intervention risque de perturber cette «fine mécanique» que serait le marché. Toutefois, si l'on regarde de plus près, on constate que l'intervention directe de l'État à travers la réglementation (système de protection sociale, notamment), la production et la taxation-impôts agit très fortement sur l'économie, puisqu'elle porte sur la moitié de l'activité de la plupart des pays. Hélas pour notre entendement, leur publication est moins « parlante » que les fluctuations boursières, suivies heure après heure dans les médias...



Terroirs de whisky

PATRICK RIVES

L'analyse statistique des données montre comment déguster les scotches.

L'Écosse, terre d'élection du whisky ! Il s'y nomme scotch, et il en existe plusieurs appellations : les *single malt* sont obtenus à partir d'orge fermentée provenant d'une seule distillerie ; les *blended* sont des mélanges de liqueurs de différentes qualités, pouvant être issues de plusieurs régions de production. Évidemment les *single malt* sont les préférés des connaisseurs, qui scrutent leurs qualités : nez, couleur, corps, bouche et finale.

La provenance d'un *single malt* détermine-t-elle ses qualités organoleptiques ? Si oui, peut-on regrouper les scotches en terroirs d'où proviendraient des boissons analogues ? Afin de répondre à ces questions, François-Joseph Lapointe et Pierre Legendre, de l'Université de Montréal, ont analysé les données réunies par le dégustateur Michael Jackson, qui a décrit, goûté et jugé les quelque 330 *single malt* que produisent les 109 distilleries les plus prestigieuses d'Écosse.

Les techniques d'analyse des données utilisées extraient des informations relatives à la population des *single malt*. Ces derniers sont décrits par des caractères (la couleur, le nez, la bouche, le corps et le finale), qui peuvent prendre plusieurs modalités. Ainsi le nez peut être aromatique, tourbeux, léger, doux, frais, sec, fruité, herbeux, salé, sherry, épicé, riche ; ou encore le corps peut être moelleux, moyen, plein, rond, mielleux, léger, ferme, gras...

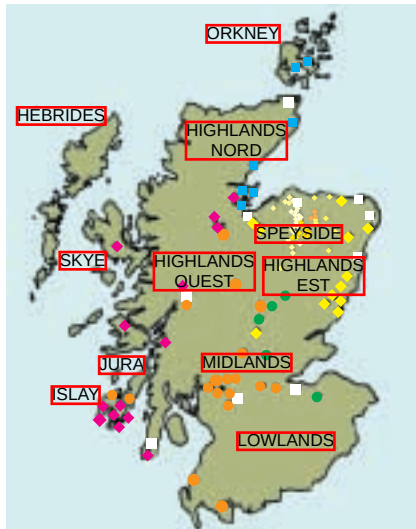
Comment découper la population des *single malt* en groupes d'individus analogues, afin de déterminer ensuite s'ils proviennent d'un même terroir ? Les statisticiens canadiens ont choisi de ne retenir qu'un scotch par distillerie, afin d'analyser ainsi 109 *single malt*.

Pour quantifier les impressions, ils les ont considérées chacune comme un caractère, qui prenait une valeur 1 quand il était présent dans un *single malt*, et 0 dans le cas inverse. Puis ils ont regroupé les données statistiques dans un tableau découpé en cases : en lignes, les individus ; en colonnes, les caractères.

Ils ont ensuite calculé une distance entre les *single malt* pris deux à deux en divisant le nombre de caractères communs aux deux whiskies comparés par le nombre

total de caractères relevés pour l'une ou l'autre des deux boissons. La distance est alors égale à 1 moins ce paramètre. L'ensemble de ces distances forme une nouvelle matrice, où la valeur d'une case représente la distance entre les whiskies respectivement associés à la ligne et à la colonne. Plus cette distance est petite, plus les whiskies sont proches.

Il restait alors à regrouper les individus. La classification hiérarchique que l'on utilise alors crée la partition progressivement, en agrégeant deux à deux les individus les plus proches : l'agrégat est alors considéré comme un individu nouveau, qui remplace les deux individus agrégés



Les whiskies gustativement analogues sont signalés par un même symbole.

(les modalités de ses caractères sont alors la moyenne de celles des deux individus). On continue ainsi à grouper jusqu'à ce que tous les individus soient rassemblés en une seule famille : on obtient un dendrogramme. Pour obtenir différentes partitions, on effectue une « coupure » du dendrogramme à une certaine distance de la racine. Plus on tranche près de celle-ci, moins les classes sont nombreuses.

Le dendrogramme obtenu pour les *single malt* se divise en deux branches : d'un côté, les whiskies plein or, corps sec et fumé ; de l'autre, des boissons ambrées, aromatiques, au corps léger, moelleux en bouche et de finale fruitée. Le premier groupe de 69 individus est alors subdivi-

visé en scotches ambrés, de corps charnu, fruité, gras et épicés, et les boissons dorées, au corps moelleux et léger, avec une finale herbeuse. Plus on s'éloigne de la racine, plus les groupes sont petits.

Revenons à la composante géographique. L'Écosse est divisée en trois régions de production de scotch : les Highlands, les Lowlands et l'île d'Islay. Ces trois régions sont découpées en treize districts. Les auteurs ont construit un nouveau tableau en mettant en ligne et en colonne les 109 scotches. L'intersection d'une ligne et d'une colonne contient un 0 si les scotches correspondants *i* et *j* sont issus du même district, elle est 1 dans le cas contraire.

Quand on compare cette matrice à celle qui a engendré le dendrogramme, on observe que le découpage des régions de production correspond à la partition, tirée du dendrogramme, en 6 ou en 12 groupes. Ces groupes correspondent à des terroirs.

Mieux encore, les analyses qui conduisent à un tel découpage prouvent que l'eau, le sol, le microclimat, la température et l'environnement en général sont les facteurs déterminant les caractéristiques des *single malt*. Les secrets et les traditions des distillateurs n'induisent que de petites différences.

Enfin, les statisticiens canadiens ont cherché les relations entre les cinq types de caractères. La réponse est nette : le nez, la couleur, le corps et la bouche ne sont pas des caractères indépendants. La couleur d'un scotch est reliée à son nez et à son corps. Le nez est lié à la bouche et, dans une moindre mesure, au corps. En revanche, la finale, c'est-à-dire l'impression qui reste en bouche quand on a fini de boire, ne dépend ni du nez, ni de la bouche, ni du corps, ni de la couleur, de sorte que la méthode de dégustation qui consiste à recracher la boisson après en avoir jugé la couleur, le nez, le corps et la bouche est critiquable, puisqu'elle néglige un paramètre fondamental.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 30 novembre 1998, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Un «roi des mers» égaré?

Des coelacanthes ont été récemment pêchés au large de l'Indonésie.

La première capture d'un coelacanth vivant au large de l'embouchure du fleuve Sud-africain Chalumna, en 1938, eut un effet retentissant dans le monde scientifique. Ce gros poisson, *Latimeria chalumnae*, bleu-acier, a des nageoires à base charnue et une queue en demi-cercle prolongée en son milieu. Il fut considéré comme un «fossile vivant», un survivant de la préhistoire. Son nom scientifique rappelle l'origine géographique du premier spécimen, et évoque Courtenay Latimer, la conservatrice du Musée d'histoire naturelle d'East London, en Afrique du Sud, qui en fit le premier croquis. Le groupe des coelacanthes est apparu il y a environ 360 millions d'années. Les derniers coelacanthes connus à l'état de fossiles datent de 80 millions d'années. Les coelacanthes appartiennent à une

lignée, très diversifiée à la fin de l'ère primaire, où l'on a recherché en vain l'ancêtre des tétrapodes (tous les vertébrés, poissons exceptés) : le groupe des dipneustes (des poissons dotés de poumons) est plus proche des amphibiens primitifs que les coelacanthes.

Ces animaux ont des caractères surprenants pour des poissons, par exemple une articulation entre les parties antérieure et postérieure de la boîte crânienne. En outre, les mouvements coordonnés des nageoires en nombre pair diffèrent de ceux des autres poissons, mais sont identiques à ceux des membres des tétrapodes. Les biologistes se perdent en conjectures.

En 1952, un deuxième coelacanth a été capturé près de l'île d'Anjouan, dans l'archipel des Comores. Depuis, de nouveaux spécimens sont capturés chaque année et enrichissent les collections des musées. Deux autres, probablement transportés par un courant, ont été capturés en 1992 et en 1995 au Sud du canal du Mozambique, mais un point semblait établi : l'habitat des coelacanthes était limité géographiquement à l'archipel comorien.

Pourtant, d'autres spécimens ont été signalés en Indonésie. En septembre

1997, l'un d'eux fut photographié sur la carriole d'un poissonnier sur le marché de Manado. Plusieurs pêcheurs ont révélé avoir capturé ce poisson nommé localement *raja laut*, ou le roi de la mer.

Un nouvel individu vient d'être trouvé près de l'île de Manado Tua, en Indonésie, à près de 10 000 kilomètres des Comores. Selon Mark Erdmann et Roy Cadwell, de l'Université de Berkeley, et selon Kasim Moosa, de l'Institut des sciences de Djakarta, il s'agit d'un poisson de 1,2 mètre de longueur, pesant près de 30 kilogrammes ; il a été remonté dans des filets posés à 150 mètres de fond par des pêcheurs. Par ses caractères morphologiques externes, à l'exception de sa teinte brune, il ressemble à *Latimeria chalumnae*, mais seules des études comparatives de leurs génomes indiqueront leur degré de parenté.

Ces spécimens indonésiens ont-ils été transportés, à partir des Comores, par les courants, comme l'ont été ceux qui ont été découverts en 1992 et en 1995, ou appartiennent-ils à une population établie dans la mer des Célèbes ? Plusieurs arguments montrent qu'il s'agit bien d'une nouvelle population. Ainsi, le site de la capture – une pente volcanique creusée de grottes et de cavités sous-marines – ressemble au biotope où vivent les coelacanthes des Comores. Or, la probabilité de trouver un environnement identique à celui de départ, en suivant un courant, est très faible. De plus, les courants marins et l'histoire géologique des deux aires géographiques ne justifient pas le transport d'une région vers l'autre.

Latimeria chalumnae est actuellement classé parmi les espèces menacées, mais on dispose de trop peu d'informations pour préconiser des actions de conservation. La surpêche dans les Comores et la faible fécondité de l'espèce menacent la survie de cette population estimée à 500 individus. La découverte d'une nouvelle population de coelacanthes ne remet pas en cause les actions nécessaires à la sauvegarde de l'espèce, mais exige l'élargissement du cadre de leur application. Il est surprenant que la présence en Indonésie de ce poisson de grande taille, pêché par les populations locales, soit passée inaperçue. Découvrira-t-on d'autres populations de coelacanthes ? D'autres espèces marines encore inconnues ?

Lionel CAVIN

Musée des Dinosaures, Espéraza (Aude)



Un coelacanth brun vient d'être pêché en Indonésie.

L'art du pisteur préservé

Les techniques des chasseurs bochimans sont transmises par un ordinateur de poche.

Le cerveau avec lequel l'homme moderne comprend son passé s'est développé dans des conditions de vie qui ont, pour la plupart, disparu. Une des techniques les plus anciennes de l'*Homo sapiens sapiens* est la chasse à l'arc et la flèche empoisonnée, que seuls quelques chasseurs du désert du Kalahari se souviennent avoir pratiquée ; ces témoins sont âgés et abandonnés par la société et, dans quelques années, ils auraient disparu, emportant dans leur tombe un savoir ancestral, si l'ethnologue Louis Liebenberg ne s'était intéressé à leur sort et à leur art. Il étudie depuis 13 ans comment les pisteurs bochimans identifient la trace de leur proie, l'approchent pour qu'elle soit à portée (une vingtaine de mètres) de leur arc, puis suivent l'animal blessé pendant des jours, distinguant sa trace de celles des autres animaux. L. Liebenberg a appris à lire les moindres déjections et les caractéristiques subtiles des empreintes : il sait, en examinant la profondeur d'une empreinte et son orientation, identifier l'animal, savoir s'il se nourrit ou s'enfuit. «S'il faut peu de temps pour acquérir les techniques de base du pistage, remarque-t-il, il faut des années pour parvenir à un niveau

avancé. Le pistage des animaux requiert des sens très aiguisés, une grande finesse d'observation, de l'endurance physique, de la patience, de la concentration, de la vivacité, une bonne mémoire, un esprit analytique, une connaissance approfondie de la nature, de l'intuition et de la créativité.»

L. Liebenberg pense que le scientifique s'identifie avec l'objet de ses recherches. «Que ferais-je si j'étais cette particule élémentaire, ou ce faisceau d'électrons», s'interroge le physicien ? «Comment réagirais-je si j'étais cette molécule», se demande le chimiste ? Comme ces scientifiques, le pisteur interroge les traces en se mettant dans la peau de l'animal et formule des hypothèses confirmées ou infirmées par le contexte. Un bon pisteur «pense comme l'animal, ou mieux, a l'impression d'être cet animal chassé.» Il se pourrait que l'art et la pratique des chasseurs, qui obligeaient à des raisonnements, soient la première manifestation de l'esprit scientifique.

Les chasseurs bochimans sont pour la plupart analphabètes : ils conservent leurs points de repère en mémoire, sans les noter, et il est difficile de cerner les différents aspects de leur savoir, et la variété des indices qu'ils utilisent. L'ethnologue a mis au point, avec un associé informaticien, un ordinateur de poche, nommé *CyberTracker*, pour enregistrer les données des pisteurs.

Une série d'icônes représentent, sur des écrans successifs, les observations possibles : vision d'un animal, identification d'une trace, activité de l'animal, nature de sa nourriture. Grâce au dispositif GPS incorporé, le pisteur enregistre le lieu, la date et l'heure de chaque observation.

BRÈVES

Lampes salvatrices

Au Sri Lanka, la moitié des habitations n'ont pas l'électricité et les Sri Lankais s'éclairent avec des lampes à pétrole de fortune. Instables, ces lampes se renversent facilement : leur contenu en pétrole se répand et s'enflamme, provoquant des incendies qui mutilent ou tuent chaque année des centaines de malchanceux. Le chirurgien Wijaya Godakumbura a mis au point une lampe à pétrole à deux faces planes et munie d'un bouchon qui, lorsqu'elle bascule, ne crée pas d'incendie. Coût : un franc la lampe.



Des africains comme les autres

Notre espèce, *Homo sapiens*, est-elle apparue il y a environ 100 000 ans en Afrique avant de se répandre sur tout le Globe, ou une espèce plus ancienne, *Homo erectus*, a-t-elle évolué de façon convergente en Europe, en Afrique et en Asie depuis un million d'années ? Des paléontologues défendaient cette deuxième hypothèse pour l'Asie, car ils voyaient une continuité des fossiles humains retrouvés en Chine. La génétique vient leur donner tort : l'ADN de 28 populations chinoises a été analysé et révèle leur proximité avec les autres populations du monde.

Alerte

Lorsque nous percevons un son dont l'intensité augmente, nous surestimons cette augmentation : c'est le résultat d'une expérience menée par John Neuhoff à l'Université de Pennsylvanie. Nous anticiperions ainsi l'arrivée d'une éventuelle menace, ce qui était un avantage indéniable pour nos ancêtres confrontés à de redoutables prédateurs.

Une plante en or

Certaines plantes ont la propriété de pomper dans le sol des métaux. Des chercheurs néo-zélandais viennent de montrer qu'une plante, *Brassica juncea*, extrait, dans ses feuilles et ses racines, l'or quand ce métal est dissous dans le thiocyanate d'ammonium, une solution utilisée dans les mines. La plante meurt empoisonnée par le cyanure de la solution, mais l'or y est 30 fois plus concentré dans les cendres obtenues par combustion de la plante que dans le sol.

Suite page 24



Les Bochimans du Kalahari associent l'art du pisteur et des méthodes de chasse ancestrales, utilisant l'arc et les flèches empoisonnées. Les pisteurs reconnaissent l'empreinte de sabot de l'animal qu'ils chassent.

Origine de la caulerpe

L'origine de l'algue *Caulerpa taxifolia* qui envahit progressivement la Méditerranée depuis une dizaine d'années semble élucidée. Cultivée dans plusieurs aquariums publics et privés, cette algue d'origine tropicale a pu être libérée dans la mer lors de la vidange d'un de ces aquariums ou remonter de la mer Rouge par le canal de Suez. Comment trancher? En comparant le génome de l'algue méditerranéenne, celui des caulerpes des aquariums et celui des caulerpes tropicales. Le verdict moléculaire est tombé : le génome de la caulerpe méditerranéenne est quasiment identique à celui des algues cultivées dans les aquariums et nettement différent de celui des algues tropicales.



Repas marin

Que mangeaient les plésiosaures, grands reptiles marins de l'ère secondaire? Des mollusques. L'estomac de l'un de ces animaux, conservé au Muséum de l'Université de Tokyo, a livré les restes de quelques dizaines d'ammonites, mollusques céphalopodes abondants dans les mers de cette époque. Les coquilles calcaires ont toutefois disparu : ont-elles été broyées par les dents du prédateur, ou digérées?

Huile d'olive propre

La production d'huile d'olive est une source de déchets végétaux toxiques pour l'environnement. Des chercheurs tunisiens et français viennent de mettre au point un procédé biologique visant à rendre ces résidus propres. Dans un premier temps, en présence d'oxygène, un champignon microscopique dégrade les tanins et les polyphénols contenus dans les résidus, qu'une flore microbienne adaptée fermente ensuite en produisant du méthane. Le rendement (80 pour cent) est encourageant.

Une autre Terre?

Une équipe américaine a découvert deux nouvelles planètes autour d'étoiles semblables au Soleil. Si l'une d'elle gravite très près de son étoile, l'autre est à une distance du même ordre de grandeur que la distance Terre-Soleil. Pour la première fois, une planète où règnent des conditions de température analogues à celle de la Terre a été ainsi repérée.

Suite page 26



Les Bochimans enseignent leur art à des adolescents ; ils sont employés dans les parcs naturels pour surveiller la faune. Louis Liebenberg est à gauche sur la photographie du haut.

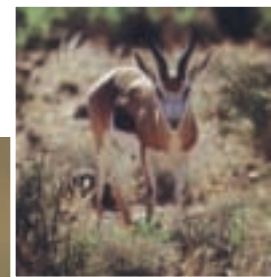
A la fin du parcours, les données recueillies sont transférées du *CyberTracker* à un ordinateur central. Ce suivi enrichit les connaissances sur la vie animale : dans le parc national Kruger, les observations ont montré que l'alimentation des rhinocéros différait en hiver et en été, ce qui permet de pallier, par des apports de fourrage, une végétation insuffisante en temps de sécheresse et de sauvegarder les populations menacées. L'ordinateur de terrain est précis, rapide et très efficace dans la lutte contre le braconnage.

Les pisteurs ont rapidement assimilé l'usage du *CyberTracker* et apprécient leur nouvelle fonction sociale. Malgré la richesse de leurs connaissances, ils

ont été trop longtemps confinés dans des emplois subalternes, sans débouché, à réparer des clôtures ou à creuser des trous. Aussi sont-ils heureux que leur savoir, longtemps déprécié, soit utilisé pour la préservation de l'environnement et l'étude des animaux qui appartiennent à leur culture ancestrale.

Ainsi le raisonnement lié au pistage et à la chasse, qui a façonné pendant des millions d'années le cerveau de l'homme, est-il préservé de l'oubli. Juste à temps.

Louis Liebenberg est l'un des cinq lauréats 1998 du Prix de l'esprit d'entreprise décerné par la Société Rolex.



Grâce au *CyberTracker*, le pisteur bochimane enregistre les observations complexes en sélectionnant des icônes représentant les observations possibles.

La capitale des Mannéens

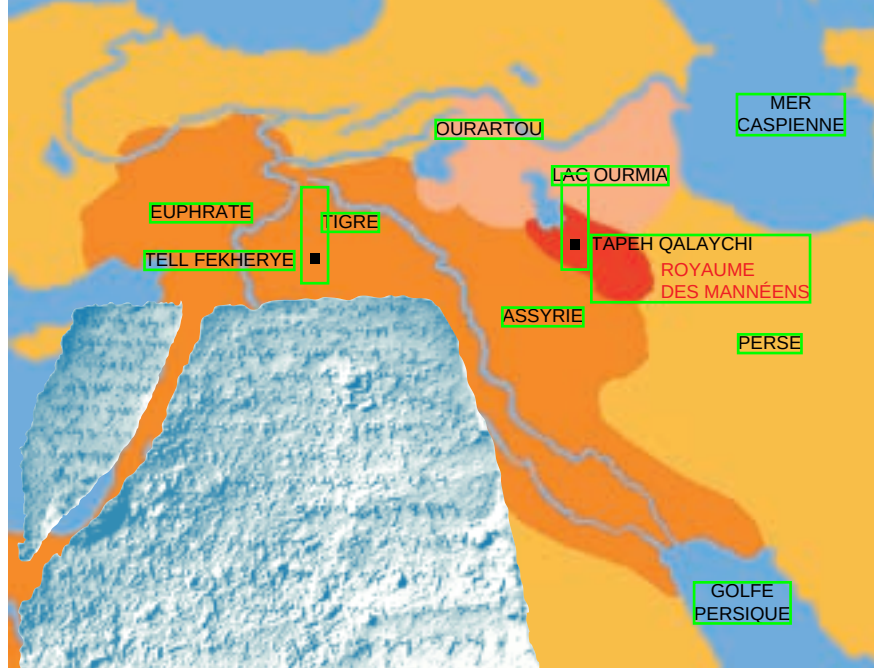
Une interprétation d'une inscription araméenne indique l'emplacement de la capitale du royaume des Mannéens.

Les archéologues situent le royaume de Manna au Nord-Ouest de l'Iran actuel, au Sud du lac Ourmia. Son existence est avérée du IX^e au VII^e siècle avant notre ère. Il était cerné par trois nations puissantes : l'Ourartou (l'Arménie actuelle), l'Empire assyrien (la Syrie et le Nord de l'Irak) et la Perse (Iran actuel). L'histoire du royaume mannéen n'était reconstruite qu'à partir de textes assyriens écrits en cunéiforme, et les informations sur la religion et la langue restent rares.

A Tapeh Qalaychi, site mannéen près de Bukan, des archéologues ont mis au jour en 1985 un morceau d'une stèle en pierre (80 centimètres de largeur et 150 de longueur) où est gravée une inscription en araméen. Un autre morceau de cette stèle a été découvert cinq ans plus tard sur un marché des antiquités, en Iran. Le site des fouilles serait un ancien temple dont les murs étaient en briques émaillées à motifs floraux et animaux. Il fait partie d'un complexe religieux, dans une place fortifiée qui, ainsi que nous le verrons par la traduction des inscriptions, était dans la capitale du royaume de Manna.

L'araméen ne s'écrit qu'avec des consonnes, les voyelles sont intercalées au moment de la lecture. L'inscription de la stèle comporte 13 lignes. Le texte est une série de malédictions que l'on retrouve sur d'autres stèles comme celles découvertes en Syrie, à Sfiré ou à Tell Fekherye. On lit par exemple «*Que sept vaches allaient un seul veau et qu'il ne soit pas rassasié*» ou «*que disparaissent de son pays la fumée du feu et le bruit des deux meules*». Ces malédictions menaçaient des pires maux (famine et foudre divine), les profanateurs de la stèle et ceux qui ne suivraient pas ses préceptes. André Lemaire, directeur d'études à l'École pratique des hautes études, en réinterprétant cette inscription, apporte des informations nouvelles sur le culte mannéen et précise une nouvelle localisation de la capitale de ce royaume. D'après la forme de certaines lettres, la stèle daterait de l'époque du roi mannéen Ullusunu (-716 à au moins -713).

A cette époque, l'Empire assyrien est le plus puissant du Proche-Orient. Il a,



La stèle araméenne a été trouvée à Tapeh Qalaychi sur le territoire de l'ancien royaume des Mannéens (en rouge). Il est cerné par l'Assyrie, l'Ourartou et la Perse. Le fragment principal a été trouvé en 1985, le petit morceau à gauche, cinq ans plus tard.

depuis 200 ans, soumis les petits royaumes araméens qui n'ont jamais réussi à s'unir, mais il a adopté la langue des peuples conquis, la langue araméenne. L'écriture cunéiforme de l'assyrien, fondée sur un système d'environ 450 idéogrammes, régresse au profit de l'alphabet de l'araméen qui devient la langue littéraire, religieuse et politique, la langue qui sera 700 ans plus tard celle du Christ.

Dans la seconde moitié du VI^e siècle avant notre ère, l'Empire perse qui a supplanté l'Empire assyrien, s'étend de l'Égypte à la vallée de l'Indus. Des vestiges archéologiques découverts dans plusieurs régions témoignent que l'araméen y est toujours utilisé en tant que langue administrative et culturelle. Cette langue est d'origine sémitique comme le phénicien, l'hébreu ou l'arabe, tandis que le perse se rattache à l'indo-européen, comme l'arménien.

La relative simplicité de l'araméen ne justifie pas son usage étendu : la diffusion de l'araméen chez les Perses s'explique par les relations que les Mannéens entretiennent avec leurs voisins. Leurs alliances sont changeantes, et ils se tournent vers la nation temporairement la plus forte. Ainsi, entre -716 et -712, des chefs mannéens aident le roi assyrien Sargon II, maître de la région, dans ses guerres contre les Ourartéens et les Mèdes, immigrants aryens originaires de la région située au Nord de la mer Caspienne. Par la multiplicité de leurs alliances, les Mannéens sont en contact avec toutes les cultures des royaumes voisins.

La facture et les motifs des briques émaillées retrouvées sur le site de Tapeh Qalaychi rappellent ceux d'autres vestiges trouvés sur des sites ourartéens. Elles démontrent, selon Ali Mousavi,

archéologue à l'Université Louis Lumière de Lyon, l'influence de l'art ourartéen sur celui des Mannéens. Ces similitudes traduisaient-elles une soumission des Mannéens aux Ourartéens, une imitation artistique, ou l'ouverture du peuple mannéen aux échanges culturels ?

La versatilité diplomatique des Mannéens expliquerait la transmission de l'araméen. La découverte de cette stèle écrite en araméen sur un site mannéen prouve qu'ils parlaient l'araméen. Ils l'ont appris au contact de l'Assyrie, puis l'ont transmis aux Perses quand ceux-ci ont commencé leurs conquêtes au VI^e siècle avant notre ère.

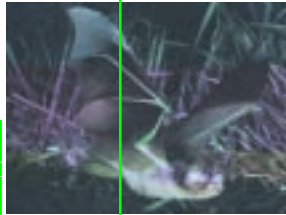
Revenons à l'inscription araméenne de la tablette. Elle mentionne la divinité principale araméo-assyrienne Hadad aux côtés de Haldi, le principal dieu ourartéen. Haldi et Hadad appartiendraient au même panthéon mannéen. Cette juxtaposition renforce l'idée d'un peuple ouvert aux cultures voisines.

L'expression «*Hadad qui demeure à Sikan*» est visible sur une stèle déterrée sur le site de Sikan à Tell Fekherye. On retrouve dans le texte de la stèle de Tapeh Qalaychi une tournure semblable : «*Haldi qui est dans [Izirtu]*». Des similitudes de contexte et de style des deux inscriptions, on déduit que la stèle de Tapeh Qalaychi est située sur l'emplacement de Izirtu, l'ancienne capitale mannéenne. Le site serait alors sur l'emplacement du temple dédié au culte de Haldi, dans la capitale du royaume des Mannéens.

Le peuple des Araméens et sa langue ont connu des destins différents. Alors que le premier disparaît après cinq siècles d'existence, l'araméen survit de peuple en peuple. Aujourd'hui même, il est encore parlé dans quelques villages syriens.

Un puissant sonar

Les chauves-souris repèrent leurs proies grâce à un sonar : elles émettent des ultrasons et l'écho, analysé par le cerveau, sert à les localiser. Des expériences



ont montré que les chauves-souris perçoivent des échos séparés de deux microsecondes. Ces animaux distinguent ainsi les échos émis par deux points distants de trois dixièmes de millimètres (l'épaisseur d'un trait manuscrit). Cette résolution est supérieure à celle des sonars construits par l'homme.

Des micro-aimants

Des physiciens israéliens ont créé de nouveaux aimants en forme de cages aux parois constituées de molécules inorganiques magnétiques. Certaines de ces molécules ont une forme de ballon de football et d'autres sont des nanotubes. Pour fabriquer ces aimants, les physiciens placent des atomes, qui s'assemblent en une couche sphérique d'une molécule d'épaisseur. Cette méthode de fabrication permet un contrôle précis de la taille et de la structure de l'aimant.

Virus variable

Chez certaines personnes contaminées par le virus du SIDA, les particules virales présentes dans le sang et dans le sperme diffèrent. De plus, l'équipe suisse qui a découvert ce phénomène a montré que la souche sanguine peut être résistante, *in vitro*, aux substances qui inhibent la protéase virale (une molécule indispensable à la production de nouvelles particules virales), tandis que la souche du sperme y est sensible. Ces deux «compartiments» sont séparés et, pour être efficace, un traitement devrait éliminer les deux types de virus.

Modèle d'autisme

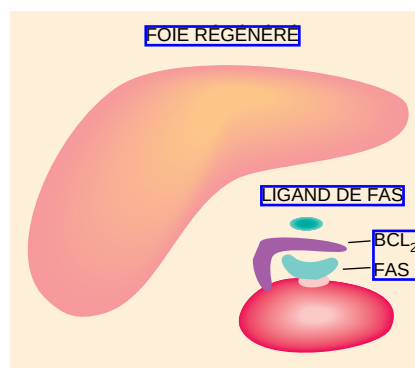
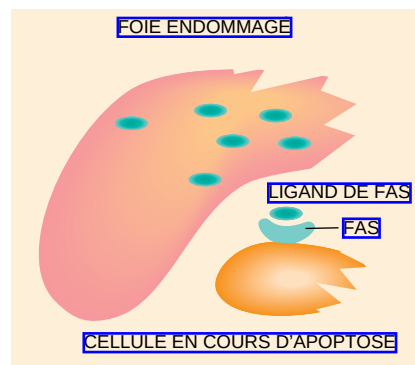
L'autisme résulte en partie d'anomalies (génétiques ou virales) qui perturbent le développement de certaines zones du cerveau. Or des cobayes ont des malformations localisées dans les mêmes aires du cerveau. L'étude de ces rongeurs, comparés à des témoins, a montré des comportements caractéristiques des enfants autistes (phobie de la nouveauté, faible exploration de l'environnement...). Ce modèle animal permettra de comprendre les causes de cette maladie, et de tester des traitements.

Régénération du foie

La greffe de cellules de foie pourrait remplacer celle de l'organe entier.

Prométhée déroba aux dieux le feu qu'il apporta aux hommes, caché dans un bâton creux. Cette action lui valut d'être enchaîné au sommet du Caucase et de subir les assauts d'un aigle qui lui dévorait le foie : cet organe se régénérant, Prométhée était condamné à un châtimement éternel. Il fut délivré par Héraclès.

Normalement les cellules du foie – les hépatocytes – sont quiescentes, c'est-à-dire qu'elles ne se multiplient pas, sauf pour remplacer celles qui meurent. En revanche, lorsqu'une partie du foie est détruite par une maladie ou lors d'une ablation chirurgicale, la vitesse de multiplication des cellules hépatiques augmente notablement. Toutefois, dans certaines maladies graves, la partie de foie qui reste fonctionnelle est insuffisante pour assurer la régénération. Pour sauver le malade, on doit lui transplanter l'organe d'un donneur. Hélas, en France,



Lors d'une hépatite fulminante, la molécule, nommée ligand de Fas, est synthétisée en excès. Elle se lie à son récepteur, Fas, déclenchant l'autodestruction (apoptose) des cellules hépatiques. Quand on greffe des cellules génétiquement modifiées produisant la molécule Bcl₂, bouclier contre l'apoptose, elles résistent au ligand de Fas et se multiplient.

près de 800 personnes sont en attente d'une greffe de foie. Cherchant à remédier à cette dramatique pénurie d'organes, Alexandre Mignon et ses collègues de l'unité INSERM U129, dirigée par Axel Kahn, à l'Hôpital Cochin, ont montré que des cellules hépatiques génétiquement modifiées, greffées sur des souris, se multiplient.

Le foie est un organe vital : il participe au métabolisme des glucides, des lipides et des protéines ; il assure des fonctions essentielles de purification, ou détoxification ; il intervient dans la synthèse des protéines plasmatiques, tel le fibrinogène, et constitue un lieu de stockage des vitamines, A et D notamment. Que faire lorsqu'une hépatite fulminante détruit une partie du foie si grosse que la vie du malade est menacée ? Il semble que, dans ces conditions, les cellules hépatiques meurent parce qu'elles subissent un phénomène trop intense d'apoptose, ou suicide cellulaire.

Pourrait-on envisager, si l'on ne dispose pas de foie entier, de greffer des cellules hépatiques résistant à l'apoptose ? C'est ce qu'a étudié l'équipe de l'Hôpital Cochin : des hépatocytes qui expriment le gène Bcl₂ ont été prélevés sur des souris génétiquement modifiées (dans les hépatocytes normaux, le gène Bcl₂ ne s'exprime pas). Ce gène protège les cellules où il s'exprime contre l'apoptose, laquelle est notamment déclenchée par une molécule nommée ligand de Fas : toutes les cellules de l'organisme expriment la molécule Fas et, lorsque son ligand spécifique s'y fixe, la chaîne des réactions qui aboutissent à l'autodestruction des cellules se déclenche. Or, les cellules génétiquement modifiées, si elles portent la molécule Fas, produisent la protéine Bcl₂, qui est un bouclier contre l'apoptose (voir la figure).

Pour étudier si les cellules génétiquement modifiées greffées sur une souris se multiplient, l'équipe de l'Institut de génétique a déclenché l'autodestruction des hépatocytes d'origine par un anticorps qui imite le ligand de Fas (le nombre total d'hépatocytes étant fixé, on doit détruire des hépatocytes pour «laisser la place» aux hépatocytes génétiquement modifiés dont on étudie la prolifération). Les hépatocytes d'origine sont détruits, et seuls subsistent les hépatocytes modifiés qui résistent à l'apoptose. Dans les expériences réalisées à l'Hôpital Cochin, le foie des animaux greffés contenait 16 pour cent d'hépatocytes modifiés fonctionnels, dans le meilleur des cas.

Cette méthode expérimentée sur l'animal sera-t-elle un jour applicable à l'homme ? On ne peut imaginer admi-

nistrer le ligand de Fas, au risque de déclencher l'apoptose de cellules saines dans tout l'organisme. Toutefois, le ligand de Fas est produit en grande quantité dans le foie des malades atteints d'hépatite fulminante : lors d'une infection touchant les hépatocytes, les lymphocytes T, qui affluent dans le foie pour détruire les cellules infectées, libèrent beaucoup de ligand de Fas. Cette molécule se fixe sur tous les hépatocytes, sains et infectés, qui portent tous la molécule Fas, et qui sont, alors, indistinctement engagés sur la voie de l'autodestruction. L'hépatite fulminante résulterait d'un dérèglement de l'apoptose.

Ainsi, dans les cas d'hépatites fulminantes, si l'on greffait des hépatocytes génétiquement modifiés exprimant la protéine BCL₂, ils résisteraient à l'apoptose, se multiplieraient et restaureraient la fonction hépatique. Il reste à montrer que l'introduction de ce gène dans les cellules hépatiques n'aurait pas de conséquences néfastes à long terme. De surcroît, plusieurs malades pourraient bénéficier d'une greffe d'hépatocytes prélevés sur le foie d'un seul donneur. On pourrait également prélever quelques cellules hépatiques du malade lui-même, les modifier *in vitro*, avant de les réimplanter, ce qui supprimerait les risques de rejet et les traitements immunosuppresseurs à long terme.

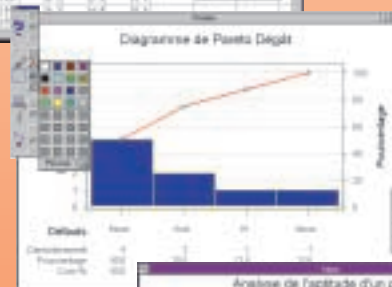
On pourrait aussi introduire d'autres gènes dans ces hépatocytes modifiés. Si les hépatites fulminantes, généralement fatales sans greffe, sont rares, les hépatites chroniques sont beaucoup plus communes. En France, les hépatites B devraient être maîtrisées, si les campagnes de vaccination reprennent rapidement, mais l'on ne dispose pas de vaccin contre l'hépatite C (500 000 personnes sont contaminées par le virus de l'hépatite C, en France). Or ces hépatites évoluent parfois vers une cirrhose, puis vers un cancer du foie. On pourrait introduire dans des hépatocytes génétiquement modifiés le gène d'une molécule (un ribozyme) qui découpe spécifiquement les ARN messagers, ici ce serait le ribozyme qui découpe les ARN messagers du virus de l'hépatite C, bloquant ainsi la synthèse de nouvelles particules virales.

Les produits d'autres gènes introduits dans des hépatocytes modifiés pourraient compenser un déficit génétique : des études sont en cours avec le gène du facteur VIII, dont l'absence est responsable de l'hémophilie, et avec le gène codant les récepteurs du cholestérol, dont l'absence entraîne une hypercholestérolémie.

MINITAB®

Logiciel de Statistiques

Analysez facilement vos données.



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

MINITAB SARL

L'analyse des données simplifiée

Minitab SARL, 1 Cité Paradis, 75010 Paris
Tél: 01 55 33 12 36 Fax: 01 55 33 12 39

Toutes les noms produits et les marques déposées sont de leurs compagnies respectives.
© Minitab Inc., 1996 MINITAB est une marque déposée de Minitab Inc.

Parasites et environnement

Certains parasites modifient le comportement des mollusques qu'ils colonisent, mais aussi celui d'autres organismes marins.

Les grandes bandes sablonneuses du littoral de Nouvelle-Zélande abritent une variété de coques quelquefois parasitées par un ver, le trématode *Curtuteria australis*. En l'absence de rochers, les coquilles de coques constituent l'unique substrat solide sur lequel s'ancrent deux espèces d'invertébrés : les anémones de mer et les patelles (mollusques à coquille conique) qui se disputent ce support vivant.

François Renaud et son équipe du Laboratoire de parasitologie comparée, à Montpellier, ont étudié l'influence de ce parasite sur les coques et ses conséquences sur l'écologie des anémones et des patelles associées. Sur des parcelles du littoral, ils ont observé des populations de coques retenues par des fils à des petits piquets plantés dans le sol. À marée basse, les coques s'enfoncent de quelques millimètres sous le sable.

Les larves du ver ressemblent à de petits têtards microscopiques : ce sont des «cercaires», qui se multiplient dans un escargot marin avant d'être aspirées par les siphons inhalants des coques où elles perdent leurs flagelles et se métamorphosent. Sous une autre forme larvaire, la métacercare, elles se regroupent en petits kystes et entravent le fonctionnement du muscle du pied de la coque. Elles empêchent les coques de s'enfouir, et les courants les entraînent à la surface. À marée basse, lorsque la mer se retire, les mollusques infectés restent à la surface où le prédateur des coques, l'hôte final du parasite, un huître-pie, les consomme sans difficulté. Ces oiseaux sont friands de coquillages, qu'ils cassent de leur bec. Le parasite se reproduit à l'état adulte dans le tube digestif de l'oiseau qui rejette les œufs dans la mer par ses déjections ; un nouveau cycle recommence.

Un parasite que l'on trouve en Camargue suit un cycle similaire. *Meiogympnophallus fossarum* infecte et perturbe le comportement des palourdes. Par un mécanisme encore inconnu, le coquillage colonisé tourne de 90 degrés, de sorte que son pied n'est plus en contact avec le sédiment. Le mollusque ne s'enfouit presque plus et reste béant, vulnérable à l'huître-pie local. La convergence évolutive entre le trématode néo-zélandais et son homologue camarguais est remarquable ; par des moyens différents, les deux parasites

obtiennent le même résultat. Ces parasites ne sont pas pathogènes pour l'hôte final, ils n'occasionnent aucune gêne chez l'huître-pie pour qui le bénéfice alimentaire est supérieur au coût de l'infection.

Curtuteria australis agit directement sur la population de coques néo-zélandaises, mais influe-t-il sur les populations d'anémones et de patelles ? En l'absence du parasite, l'anémone est avantagée car, carnivore, elle se nourrit des patelles ancrées sur la même coque. En présence du parasite, il existe en revanche deux catégories de coques. Les chercheurs ont déterminé si les coques parasitées à la surface étaient utilisées de la même manière par les deux types d'invertébrés associés.

Les patelles, dépourvues d'organes fouisseurs, ont plus de chance de rencontrer une coque infectée qu'une coque saine régulièrement enfouie : les patelles sont plus nombreuses sur les coques parasitées, que les anémones soient présentes ou non.

Au contraire, les anémones sont beaucoup plus sensibles à la déshydratation que les patelles lors de la marée basse. Selon un test effectué par l'équipe de Montpellier, après une exposition d'une heure au soleil, 50 pour cent des anémones meurent contre 10 pour cent seulement des patelles. Ces dernières plaquent hermétiquement leurs coquilles contre le substrat, résistant à la dessiccation grâce à l'eau emprisonnée. Ainsi, une majorité d'anémones survit sur les coques non infectées, celles qui s'enfouissent à chaque marée basse et restent en milieu humide.

La modification du comportement d'une partie des coques par la présence de *Curtuteria australis* bouleverse les populations des deux invertébrés. La compétition pour les coquilles substrats est supprimée : selon qu'elles sont infectées ou non, les coques favoriseront la fixation des patelles ou des anémones.

Les travaux de l'équipe de Montpellier indiquent pour la première fois que la relation parasite-hôte n'est plus séparable de son environnement naturel, et que l'influence d'un parasite dépasse dans certains cas le cadre restreint de son hôte.

Le qualificatif d'ingénieur de l'écosystème était jusqu'à présent réservé à des espèces animales macroscopiques comme les termites ou les castors, dont l'action sur l'environnement est patente. Elle concerne désormais les organismes microscopiques qui par leur seule présence, longtemps négligée par les écologistes, modifient les caractéristiques d'un environnement.



En l'absence de rochers, les anémones de mer *Anthopleura aureoradiata* (à gauche) et les patelles *Notoacmea helmsi* (à droite) se partagent les coquilles de coques.

Dracula, un enragé ?

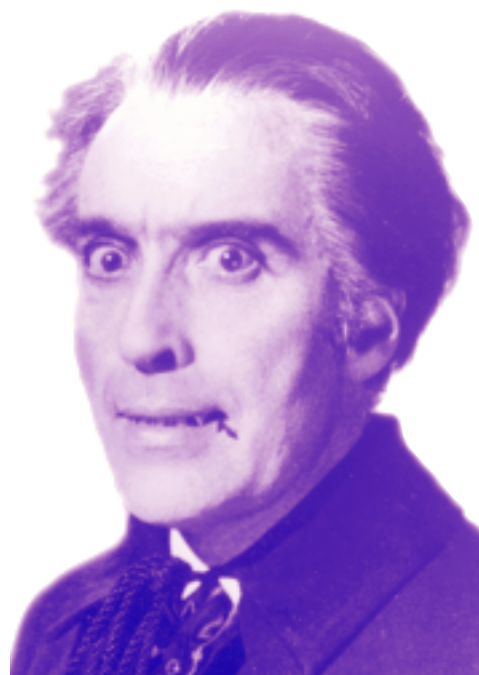
Les vampires seraient nés de l'observation de personnes infectées par le virus de la rage.

Selon Voltaire, les vampires étaient le seul sujet de conversation entre 1730 et 1735. En 1693, une gazette révèle l'existence de cadavres étranges dont le sang restait fluide. En peu de temps, la croyance selon laquelle ces cadavres étranges quittent leur tombe se propage dans les Balkans. Au cours de l'hiver 1731-1732, dans le village serbe de Medvedja, on rapporte que des paysans ont été tués par des vampires, et que plusieurs cadavres présentent les signes du vampirisme. Après plusieurs profanations de tombes, les autorités autrichiennes doivent intervenir, et l'événement fit grand bruit dans toute l'Europe.

Les vampires se nourrissent du sang des hommes, sont noctambules et grands séducteurs, ont une aversion pour l'ail, et les miroirs ne renvoient pas leur image ; ils sont souvent associés aux chauves-souris et aux loups. Le vampirisme se transmet par morsures. Or, d'après ces caractéristiques, le neurologue espagnol Juan Gomez-Alonso de l'Hôpital Xeral, à Vigo, a émis l'hypothèse, publiée dans la revue *Neurology*, que vampires et personnes atteintes de la rage ont de nombreux points communs. Les vampires ne seraient-ils que des enragés ?

La rage est une infection virale qui attaque le système nerveux central et peut entraîner la mort. Elle se transmet par la salive, lors d'une morsure par un animal infecté (la transmission d'homme à homme reste contestée). Le traitement doit commencer dès la morsure, avant l'apparition des premiers symptômes qui surviennent d'autant plus vite que la morsure a été proche du cerveau (au cou par exemple). Le virus de la rage s'attaque surtout au système limbique, qui contrôle les émotions et le comportement.

J. Gomez-Alonso a recensé les nombreuses similarités entre les caractéristiques des vampires et les symptômes des personnes enragées. Ainsi, les personnes enragées ont souvent des insomnies, pendant lesquelles elles errent. Les hommes enragés (car ils sont plus fréquemment atteints que les femmes) sont agités et excessivement sensibles, à l'eau, à la lumière et aux odeurs, peut-être celle de l'ail. Certains ont des spasmes, des contractions de la face, du larynx et du pharynx, qui provoquent l'émission de sons rauques, voire l'apparition d'une écume sanguinolente à la commissure des lèvres, car la salive ne peut plus être avalée. Les spasmes sont déclenchés par l'eau, la lumière ou les miroirs (une personne n'était pas considérée comme enragée si elle pouvait se regarder dans un miroir). Au cours de crises, les enragés ont un comportement agressif et tentent de mordre leurs proches. Leurs appétits sexuels sont parfois décuplés. Enfin, les personnes mortes de la rage ont parfois du sang qui s'échappe de leur bouche.



Christopher Lee, dans le rôle du comte Dracula.

Outre ces indices physiologiques, d'autres coïncidences étayent l'hypothèse du médecin espagnol. Ainsi, la chauve-souris et le loup, associés aux vampires, sont deux animaux qui transmettent la rage. Les légendes sur les vampires semblent être nées lors d'une épidémie particulièrement meurtrière de rage qui toucha surtout les chiens et les loups, en Hongrie, entre 1721 et 1728. L'observation du comportement étrange et violent des victimes de la rage a peut-être conduit quelque conteur à l'imagination fertile à inventer les vampires.

Accélération anormale

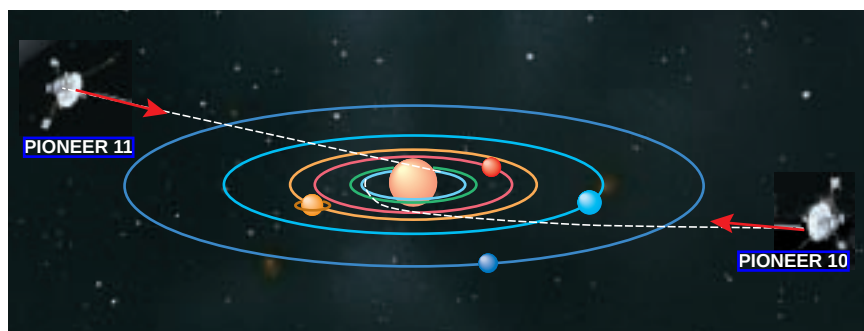
L'émission en provenance de sondes spatiales révèle une accélération inexpliquée.

Connaissant les forces qui s'exercent sur un objet, tout lycéen apprend à en déduire son accélération et sa vitesse. Inversement, en suivant la position d'un objet au cours du temps, on en déduit sa vitesse et son accélération. C'est en faisant ce travail qu'une équipe d'astronomes californiens a découvert une accélération des sondes *Pioneer 10*, *Pioneer 11* et *Ulysses*, dont l'origine demeure mystérieuse. Nouvelle force ou artefact ?

En 1972, la sonde *Pioneer 10* est lancée, suivie l'année suivante par *Pioneer 11*. Leur but : explorer les planètes géantes, aux confins du Système solaire.

Ces sondes sont aussi d'excellents instruments pour l'étude de la mécanique céleste. Depuis une quinzaine d'années, les astronomes mesurent en permanence la vitesse de ces sondes à l'aide de l'effet Doppler : ils émettent des

signaux radio vers la sonde qui les renvoie vers la Terre. La fréquence reçue est d'autant plus décalée vers les grandes longueurs d'onde que la sonde s'éloigne vite. Ils en déduisent l'accélération des sondes.



En 1972 et en 1973, les sondes *Pioneer 10* et *Pioneer 11* quittent la Terre et, depuis, elles explorent les planètes. Les mesures des signaux provenant de ces sondes ont révélé une accélération dont la cause échappe à l'interprétation (flèches rouges). Cette accélération pourrait être due à l'effet gravitationnel de la matière noire ou à des effets physiques inconnus.

Les astronomes ont aussi modélisé l'accélération en prenant en compte la gravitation des planètes, la pression de radiation solaire, le frottement dû au gaz milieu interstellaire et la relativité générale. La comparaison des accélérations mesurées et modélisées donna un résultat inattendu : les sondes sont soumises à une accélération résiduelle, dirigée vers le Soleil, d'une intensité voisine de 10^{-9} mètre par seconde au carré (dix milliards de fois inférieure à l'accélération de la pesanteur terrestre).

Le coupable de cette perturbation a d'abord été recherché dans des effets qui n'avaient pas été pris en compte, telles la gravitation des objets de la ceinture de Kuiper (des petits objets situés au-delà de l'orbite de Pluton), la gravitation de la Galaxie, des erreurs dans les éphémérides des planètes, des fuites de gaz sur les sondes. Tous ces effets étaient trois ordres de grandeur trop faibles. Ensuite, les effets «non gravitationnels» ont été examinés, comme des incertitudes sur la pression de radiation ou l'émission anisotrope de radiation thermique en provenance du générateur nucléaire, présent à bord des sondes. Comme le plutonium 238 qui se trouve à bord est radioactif, il émet un rayonnement dans l'espace. Cependant, si ce rayonnement avait une influence sur la vitesse de la sonde, on observerait une diminution de l'accélération résiduelle au cours du temps, à mesure que le plutonium se désintègre. Or, depuis 1980, aucune diminution de l'accélération résiduelle n'a été observée.

Restent deux explications plus «exotiques» : d'une part, l'influence gravitationnelle de la matière noire (de la matière «invisible» dont la présence est attestée par ses effets gravitationnels), et, d'autre part, une modification des lois physiques. Malheureusement, ces deux explications sont difficiles à concilier avec les autres observations. Les astronomes supposent que la matière noire est répartie de manière sphérique autour du Soleil et que sa densité décroît proportionnellement à la distance au Soleil. Il est alors difficile de comprendre comment cette matière peut produire une accélération constante dirigée vers le centre du Système solaire.

Si la gravité était modifiée, cette accélération résiduelle affecterait les planètes. Or, les mouvements de la Terre et de Mars ne montrent d'accélération résiduelle d'aucune sorte. Ainsi, si l'origine de cette accélération résiduelle est gravitationnelle, elle n'est pas universelle.

Quinze années de moissons de données ont convaincu les astronomes que l'effet observé est réel. Il constitue un défi : toute la physique est fondée sur le postulat que les forces observables sur Terre s'appliquent dans tout l'Univers.

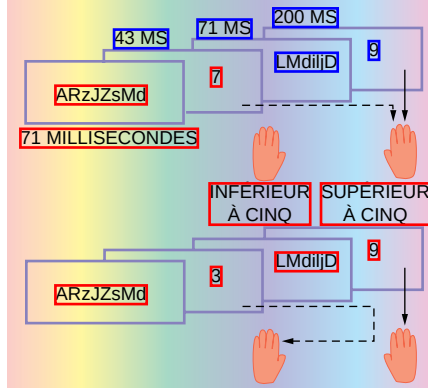
Images subliminales

Le cerveau est activé par des images qu'il ne «voit» pas.

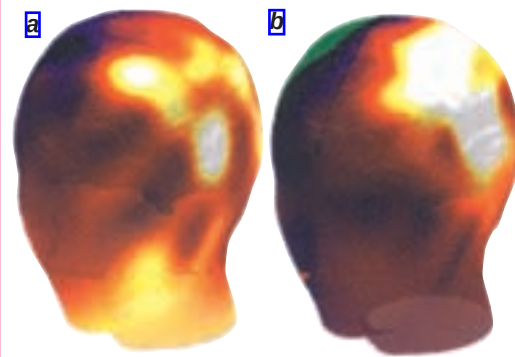
L'utilisation d'images projetées trop vite pour que l'on puisse en prendre conscience, c'est-à-dire les voir, a été controversée. Si l'on n'a pas conscience de voir ces images, dites subliminales, le cerveau les enregistre-t-il ? Est-on doué d'une perception inconsciente ? À ces questions, Stanislas Dehaene et ses collègues de l'unité INSERM 334, de l'École des hautes études en sciences sociales et de l'Hôpital F. Joliot, à Orsay, répondent par l'affirmative : les images subliminales sont perçues.

Ces neurobiologistes présentent à des volontaires des chiffres sur un écran d'ordinateur. Les chiffres sont compris entre un et neuf : la personne doit appuyer de la main gauche sur un bouton quand le chiffre est inférieur à cinq, de la main droite sur un autre bouton quand le chiffre est supérieur à cinq. Le chiffre est affiché sur l'écran d'ordinateur durant 200 millisecondes. À l'insu des personnes testées, on projette un autre chiffre pendant 43 millisecondes, c'est-à-dire trop rapidement pour que le sujet le voie. De plus, ce chiffre est brouillé par deux séries de lettres dépourvues de sens projetées avant et après le chiffre subliminal.

Lorsque le «chiffre-amorce» (présenté sans que le sujet n'en ait conscience) est, du même côté de cinq que le chiffre-cible (le chiffre que lit le sujet), le temps de réaction est inférieur au temps que met



Au cours d'une expérience, une personne doit dire si un chiffre présenté assez longtemps pour être vu (200 millisecondes) est inférieur ou supérieur à cinq (il appuie sur un bouton avec sa main gauche si le chiffre est inférieur à cinq et avec la droite dans l'autre cas). De plus on projette un chiffre (en haut, 7) que le sujet n'a pas le temps de voir consciemment (ce chiffre est présenté entre deux suites de lettres dépourvues de sens). Ce chiffre subliminal est traité inconsciemment : le cortex est activé (zone blanche sur l'image a). Quand le deuxième chiffre présenté (en haut, 9) est du même côté de cinq que le premier, la réaction motrice du sujet est rapide : le chiffre subliminal a préparé la réaction motrice correcte (la zone blanche sur la figure b indique l'activation du cortex moteur). Au contraire, quand le deuxième chiffre n'est pas du même côté de cinq que le chiffre subliminal, le sujet prépare inconsciemment une réaction erronée (en bas il s'apprête à appuyer sur la touche de gauche), alors que la bonne réponse est à droite : la réaction motrice est retardée.



le sujet à répondre quand les deux chiffres sont de part et d'autre de cinq. Tout se passe comme si le chiffre-amorce invisible préparait le sujet à répondre (inférieur ou supérieur à cinq) avant que le chiffre-cible ne soit visible : quand la réponse amorcée est correcte, le temps de réponse est raccourci. Au contraire, quand le chiffre-amorce invisible est d'un côté de cinq et que le chiffre-cible est de l'autre côté, le sujet prépare inconsciemment une réponse d'un côté, mais doit la corriger quand il prend conscience du chiffre-cible : les deux réponses sont en contradiction, et le sujet met plus de temps à répondre. Ainsi un chiffre, même invisible, prépare le sujet à répondre. Lorsque les chiffres sont écrits en toutes lettres, les réactions des personnes testées sont plus lentes, mais on retrouve le même effet d'amor-

çage par les chiffres subliminaux. Ces résultats ont été confirmés par l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau par électro-encéphalographie (la méthode indique l'activation des circuits moteurs) et celui du débit sanguin par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

On observe une activation du cortex moteur du côté où se prépare la réaction motrice déclenchée par le traitement inconscient du chiffre-amorce. L'imagerie par résonance magnétique indique la localisation de l'effet d'amorçage (dans le cortex moteur) et l'enregistrement de l'activité électrique indique le moment où se produit cet effet (avant l'activation déclenchée par le chiffre-cible).

Toute expérience qui éclaire le traitement inconscient des informations précise les bases cérébrales de la conscience.

Carrés hypermagiques

On sait enfin construire des carrés hypermagiques aussi grands que l'on veut.

Un carré est dit magique lorsque la somme des nombres de chaque ligne, celle de chaque colonne et celle des diagonales sont égales. On nomme cette somme la constante magique. En décomposant de toutes les différentes façons possibles la constante magique 15 en somme de trois chiffres (de 1 à 9), vous trouverez un carré magique de trois nombres de côté ; il est unique, aux symétries près. Peut-on ajouter des propriétés ?

Outre les propriétés magiques déjà mentionnées, ajoutons la condition que

la somme des nombres sur les diagonales brisées soit aussi égale à la constante magique. Par exemple, pour le carré de quatre nombres de côté (d'ordre quatre) de la figure 1, les diagonales brisées sont au nombre de six : ce sont toutes les séries de quatre nombres en diagonales que l'on peut former lorsque l'on duplique le carré initial et qu'on l'accorde à celui-ci (en bleu sur la figure). Ces carrés sont nommés pandiagonaux.

Restreignons encore les propriétés : cherchons les carrés magiques pandiagonaux dont la somme des quatre nombres de n'importe quel sous-carré de deux cases de côté (d'ordre deux) est constante (pour les carrés d'ordre quatre, cette constante est la constante magique). Ces nouveaux carrés sont hypermagiques. Si les carrés magiques d'ordre quatre sont nombreux – on en

dénombre 880 – seuls 48 d'entre eux ont toutes ces propriétés. Les 48 carrés hypermagiques d'ordre quatre sont connus depuis plus de trois siècles, mais aucune méthode n'existait pour construire des carrés hypermagiques d'ordre supérieur, ni même pour les dénombrer. Avoir trouvé cette méthode est l'exploit de Kathleen Ollerenshaw, une Britannique de 85 ans, férue de jeux mathématiques, en collaboration avec son compatriote David Brée.

En 1878, A. Frost, un pasteur britannique montra que l'ordre des carrés pandiagonaux pairs était un multiple de quatre. En utilisant ce résultat, nos mathématiciens britanniques ont montré que l'ordre d'un carré hypermagique était aussi un multiple de quatre. K. Ollerenshaw a alors établi une transformation univoque entre les carrés hypermagiques et des carrés «réversibles», des carrés dont les

0	14	3	13	0	14	3	13	0	14	3	13
7	9	4	10	7	9	4	10	7	9	4	10
12	2	15	1	12	2	15	1	12	2	15	1
11	5	8	6	11	5	8	6	11	5	8	6
0	14	3	13	0	14	3	13	0	14	3	13
7	9	4	10	7	9	4	10	7	9	4	10
12	2	15	1	12	2	15	1	12	2	15	1
11	5	8	6	11	5	8	6	11	5	8	6
0	14	3	13	0	14	3	13	0	14	3	13
7	9	4	10	7	9	4	10	7	9	4	10
12	2	15	1	12	2	15	1	12	2	15	1
11	5	8	6	11	5	8	6	11	5	8	6
0	14	3	13	0	14	3	13	0	14	3	13
7	9	4	10	7	9	4	10	7	9	4	10
12	2	15	1	12	2	15	1	12	2	15	1
11	5	8	6	11	5	8	6	11	5	8	6

1. Le carré de quatre cases de côté situé au centre (*en vert*) est hypermagique : non seulement les sommes de lignes, des colonnes et des diagonales sont égales à 30, mais également les sommes des diagonales brisées. Ces dernières sont les diagonales différentes de quatre nombres obtenues lorsque l'on reporte le carré central dans toutes les directions (*diagonales bleutées*). De surcroît, la somme des nombres de chaque sous-carré de deux cases de côté est également égal à 30 (*par exemple, les carrés jaunâtres, en bas à gauche*).

nombres sont dans l'ordre naturel. Autrement dit, il y a une correspondance unique entre les carrés réversibles et les carrés hypermagiques (*voir la figure 2*). Or, il est aisé de construire un carré réversible duquel on déduit le carré hypermagique correspondant par l'opération inverse. Pour construire tous les carrés hypermagiques d'ordre quatre, on construit tous les carrés réversibles, d'ordre quatre (ce qui est possible, car ils forment un ensemble de carrés connus) que l'on transforme en leurs carrés hypermagiques correspondants.

Par cette méthode, on retrouve les 48 carrés hypermagiques d'ordre quatre déjà connus, mais on peut construire les 368 000 carrés hypermagiques d'ordre huit ou les 6×10^{37} carrés hypermagiques d'ordre 32, ce dont même l'ordinateur le plus puissant était incapable. À 85 ans, K. Ollerenshaw est une vivante et dynamique illustration que : «Les joies de la découverte ne sont pas un privilège réservé aux jeunes».

0	1	2	3
4	5	6	7
8	9	10	11
12	13	14	15

↔

0	14	3	13
7	9	4	10
12	2	15	1
11	5	8	6

2. Pour passer du carré réversible (*à gauche*) au carré hypermagique équivalent (*à droite*), on inverse l'ordre des deux dernières lignes, puis l'ordre des deux dernières colonnes ; enfin, on déplace l'entier de la position (i, j) à la position ($i + 2j, 2i + 3j$), ces derniers étant pris modulo 4 (i et j désignent respectivement le numéro de la ligne et celui de la colonne, pris entre 0 et 3).

Hormones et ménopause

CRAIG JORDAN

Des composés nommés SERM semblent efficaces contre le cancer du sein, l'ostéoporose et divers troubles associés à la ménopause.

De nombreux endocrinologues s'intéressent aujourd'hui aux modulateurs sélectifs des récepteurs des estrogènes, ou SERM (d'après les initiales de leur nom anglais : *selective estrogen receptor modulators*). Dans certains tissus, ces molécules agissent comme les hormones féminines nommées estrogènes ; dans d'autres, elles bloquent l'action de ces hormones.

Au printemps 1998, une vaste étude a montré qu'un de ces composés, le tamoxifène, prévient le cancer du sein chez les femmes jeunes (35 ans) qui ont un risque élevé d'avoir ce type de cancer. C'est la première substance ayant un tel effet. Puis un autre essai a révélé qu'un composé de la même famille, le raloxifène, protégerait aussi contre le cancer du sein quand il est administré à des femmes ménopausées, sans facteur de risque particulier (hormis leur âge).

En outre, le raloxifène (aujourd'hui prescrit contre la dégradation des os, nommée ostéoporose, chez les femmes âgées) et d'autres SERM en cours d'étude semblent protéger les femmes contre diverses maladies qui surviennent après la ménopause, notamment le cancer du sein, l'ostéoporose, le cancer de l'endomètre (la paroi de l'utérus) ou les maladies des artères coronaires. Si les SERM tiennent leurs promesses, ils devraient notablement améliorer la santé des femmes du XXI^e siècle. L'histoire des SERM est remarquable. Elle commence il y a environ 40 ans et révèle que la médecine a encore beaucoup à apprendre sur l'action des hormones.

Les estrogènes, dont les SERM reproduisent certains effets, sont des molécules étonnantes, à la fois indispensables et nocives. Ils servent notamment à programmer le corps de la femme (les seins, l'utérus et le cerveau) pour la reproduction. Au cours des 20 dernières années, on a découvert qu'en agissant aussi sur d'autres organes, ces hormones

améliorent la santé des femmes. Ainsi, elles agissent sur les centres cérébraux de régulation de la température corporelle, et elles assurent l'intégrité et la lubrification de la muqueuse vaginale.

La régulation des estrogènes

Elles préservent également le cœur, limitant la formation des plaques d'athérome dans les artères coronaires, qu'elles protègent aussi en réglant la production de cholestérol dans le foie ; elles limitent la libération du cholestérol associé à des lipoprotéines de basse densité (nommées LDL), qui favorise l'athérosclérose, et augmentent la production du cholestérol associé aux lipoprotéines de haute densité (nommées HDL), qui combat les plaques d'athérome.

Les estrogènes préservent également les os, maintenant l'équilibre entre la formation et la dégradation du tissu osseux. Quelques résultats récents semblent indiquer que les estrogènes favorisent les mécanismes de la mémoire et retardent ou limitent les symptômes de la maladie d'Alzheimer.

Les femmes perçoivent bien l'intérêt des estrogènes quand leur organisme cesse d'en fabriquer, après la ménopause (une phase qui commence vers 50 ans, quand les ovaires ont épuisé leur stock d'œufs et cessent de synthétiser l'hormone). Les bouffées de chaleur et les sudations nocturnes qui apparaissent alors durent parfois plusieurs années. Simultanément, l'augmentation du cholestérol associé aux LDL et diverses modifications du système cardio-vasculaire accroissent les risques de maladies coronariennes et d'infarctus. La diminution de la masse osseuse, amorcée un peu avant la quarantaine, s'accélère : les os sont fragilisés et se déforment souvent chez les personnes âgées de plus de 70 ans.

Les estrogènes ont aussi des inconvénients qui s'accroissent après la ménopause : ils favorisent les cancers du sein ou de l'utérus. Ces hormones ne semblent pas être responsables des modifications cellulaires à l'origine des cancers, mais elles stimulent la prolifération des cellules déjà engagées sur la voie de la cancérisation. Les femmes exposées pendant plusieurs décennies à leurs propres estrogènes ont un risque accru de tumeurs du sein ou de l'utérus. Entre 60 et 79 ans, une femme sur 15 risque d'avoir un cancer du sein (le plus fréquent des deux).

À la ménopause, les femmes pallient souvent le manque d'estrogènes par des administrations d'hormones naturelles ou de synthèse. Ces traitements substitutifs augmentent la qualité de vie : ils réduisent les bouffées de chaleur et, administrés pendant longtemps, ils préviennent l'ostéoporose ; d'après diverses études épidémiologiques, ils semblent aussi réduire les risques d'infarctus. Toutefois, les estrogènes semblent favoriser les cancers du sein et de l'utérus et, chez certaines femmes, ils déclenchent la formation de caillots sanguins, potentiellement dangereux, dans les veines. Quand on ajoute à ces traitements de la progestérone ou des progestatifs de synthèse, on protège les femmes contre le cancer de l'utérus, car la progestérone déclenche des règles artificielles : la couche superficielle de la muqueuse utérine est éliminée et, avec elle, les éventuelles cellules cancéreuses. Toutefois, certaines femmes âgées rechignent à avoir de nouveau leurs règles ; de surcroît, la progestérone ne supprime pas les risques de cancer du sein, ni de formation de caillots sanguins.

Certains SERM sont intéressants parce qu'ils ont les mêmes effets bénéfiques que les estrogènes sur les os et sur le cœur, tout en agissant comme des antiestrogènes (ils empêchent

AVANTAGES DES ESTROGENES

CERVEAU

Contrôlent les aires cérébrales qui préparent l'organisme aux fonctions de la reproduction. Participent à la régulation de la température corporelle et évitent les bouffées de chaleur. Protégeraient la mémoire.

SEIN

Programment les glandes mammaires pour qu'elles produisent du lait.

FOIE ET CŒUR

Participent à la régulation de la production du cholestérol par le foie, évitant ainsi l'athérosclérose et les infarctus.

UTÉRUS

Programment l'utérus pour qu'un fœtus puisse s'y développer.

OS

Maintiennent la densité osseuse.

INCONVENIENTS DES ESTROGENES

SEIN

Favorisent le cancer du sein.

UTÉRUS

Favorisent le cancer de l'utérus.

1. LES ESTROGENES ont des effets variés sur l'organisme féminin. De nouveaux composés, nommés les SERM, devraient reproduire les effets bénéfiques des estrogènes sur le foie, le cœur et les os, et inhiber leurs effets négatifs sur le sein et l'utérus. Ils protégeraient ainsi la santé des femmes ménopausées qui ne synthétisent plus assez d'estrogènes.

les estrogènes d'agir) sur le sein et l'utérus, bloquant les effets délétères de ces hormones. Malheureusement, les SERM rendent les bouffées de chaleur encore plus désagréables, de sorte qu'ils ne sont pas utilisés en première intention. Notons que l'exercice physique, un régime alimentaire adapté et un apport régulier de calcium suffisent souvent à préserver le cœur et

les os sans traitement complémentaire. Selon certains médecins, les femmes respectant ces conseils ont même moins de risques d'avoir un cancer du sein ou de l'endomètre.

Bien que les SERM soient soudain en vedette en raison de leur potentiel préventif, le tamoxifène, découvert il y a une quarantaine d'années, est longtemps resté dans l'ombre.

Le premier antiestrogène

Personne n'avait observé qu'il agit comme les estrogènes dans certains tissus et qu'il agit comme un antiestrogène dans d'autres organes. De surcroît, le tamoxifène, dont on ne connaissait initialement que les propriétés antiestrogéniques, avait été conçu pour être un contraceptif. Or,

Comment fonctionnent les SERM

Dans certaines cellules, les SERM, tels le tamoxifène ou le raloxifène, agissent comme des antiestrogènes ; dans d'autres cellules, ils agissent comme des estrogènes. Les biologistes ont proposé plusieurs hypothèses, qui reposent sur le fonctionnement des estrogènes (*séquence a*), pour expliquer ce paradoxe apparent.

L'hormone n'agit que sur les cellules qui produisent des protéines nucléaires nommées récepteurs des estrogènes. Quand ces protéines rencontrent un estrogène (1), elles s'y fixent, changent de forme, et la paire se fixe sur un site d'ancrage, nommé élément de réponse aux estrogènes, présent sur certains gènes. Cette fixation déclenche à son tour la formation d'un complexe de transcription (2), un assemblage de «coactivateurs» et de protéines qui s'insèrent autour des récepteurs comme les pièces d'un puzzle. Le complexe active les gènes sur lesquels il est ancré. Une enzyme, l'ARN polymérase, transcrit les gènes activés en ARN messager, lequel sert à la construction des protéines codées par ces gènes. Ces protéines déclenchent alors la division cellulaire ou d'autres modifications (3).

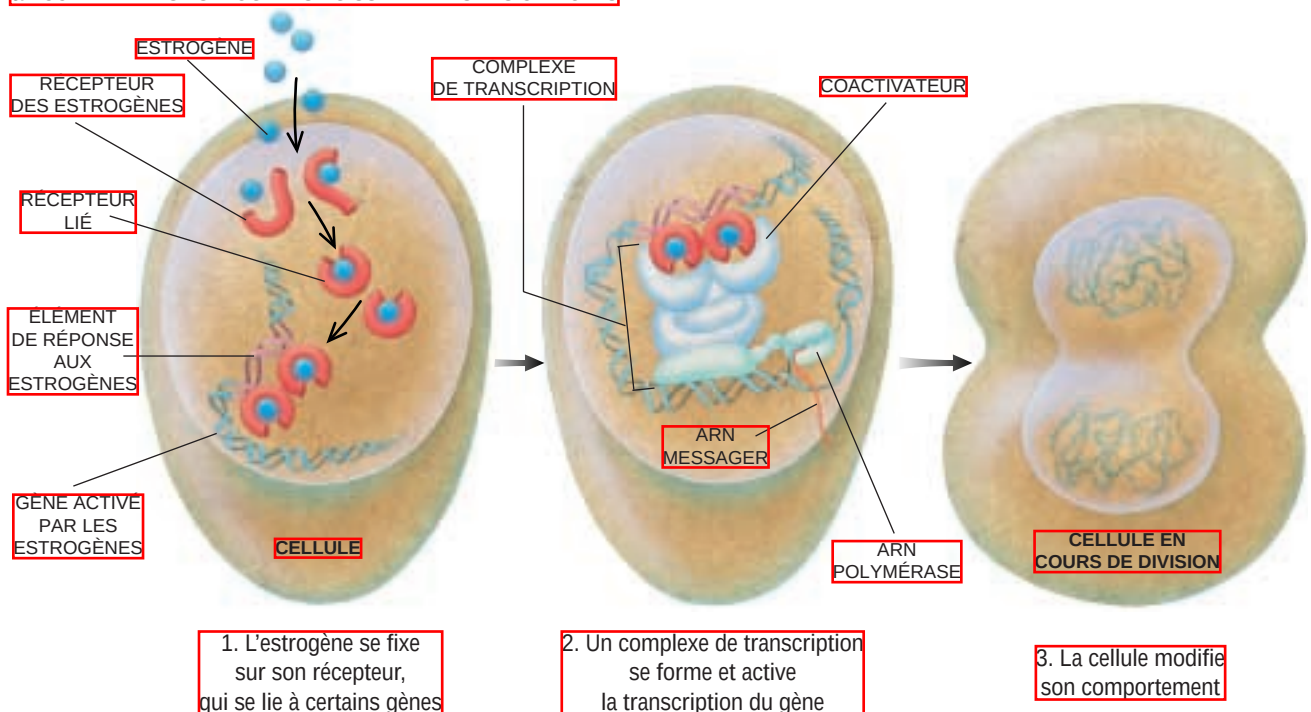
Quand un SERM bloque un estrogène, il prend la place de l'estrogène sur son récepteur (b). Il empêche l'estrogène de se fixer et le récepteur d'interagir avec les coactivateurs qui, normalement, forment avec le récepteur un complexe de transcription. En effet, lorsqu'un estrogène se fixe à son récepteur, la douzième hélice se

replie, comme une barre de sécurité se rabat sur les personnes qui prennent place dans une nacelle de grande roue. Cette rotation place certains des acides aminés qui constituent le récepteur dans une position telle qu'ils peuvent interagir avec des coactivateurs. Au contraire, quand c'est le raloxifène qui se fixe sur le récepteur, l'hélice ne se rabat pas dans une position qui autorise cette interaction. Le tamoxifène et le raloxifène perturbent le repliement en se liant à un acide aminé particulier (celui de la position 351) de la chaîne qui forme le récepteur.

Ce mécanisme explique quelques cas de résistance acquise au tamoxifène : certaines personnes sont d'abord traitées avec succès, puis le tamoxifène cesse d'agir. Dans ces cas-là, le récepteur finit par être modifié et l'acide aminé de la position 351 est remplacé par un autre. Lorsque le tamoxifène se fixe au récepteur muté, la rotation de la douzième hélice a lieu normalement. Le récepteur se comporte comme s'il était lié à un estrogène et non pas au tamoxifène : la tumeur se développe, car les estrogènes favorisent la multiplication des cellules tumorales.

Comment les SERM peuvent-ils agir comme des estrogènes dans d'autres cellules ? Ces substances agissent vraisemblablement sur le récepteur de la même façon dans toutes les cellules, de sorte qu'il faut chercher la réponse non pas dans le récepteur, mais dans les cellules elles-mêmes.

a COMMENT LES ESTROGÈNES AGISSENT DANS LES CELLULES



ce n'en est pas un. Ce fut une première désillusion qui, ironie du sort, révéla d'autres applications potentielles du tamoxifène et de ses dérivés.

L'histoire commença au début des années 1960, quand Dora Richardson, Michael Harper et Arthur Walpole, de la Société ICI, découvrirent que le tamoxifène empêchait les estrogènes de faire augmenter le volume de l'uté-

rus chez le rat : c'est un antiestrogène. L'ère de la contraception moderne venait de commencer, et l'équipe anglaise qui avait découvert la substance pensa qu'en inhibant les estrogènes dans l'utérus, le tamoxifène bloquerait les grossesses et servirait de pilule du lendemain. Toutefois, les expériences montrèrent qu'au lieu de bloquer les grossesses la substance aug-

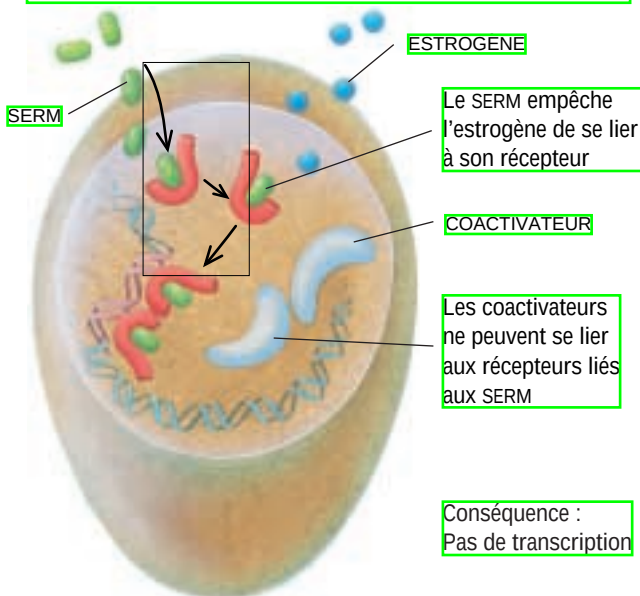
mentait les chances de maternité des femmes peu fertiles. Heureusement pour les femmes victimes d'un cancer du sein, A. Walpole supposa que ce faux contraceptif était un traitement potentiel du cancer du sein. Chargé des recherches en contraception, il ne put poursuivre l'étude de ce composé, mais encouragea d'autres biologistes à reprendre le flambeau. Ce que je fis.

Selon une des hypothèses (*c, en haut*), les cellules qui ne réagissent pas aux SERM de type estrogènes ne fabriquent sans doute pas de coactivateurs capables d'interagir avec les récepteurs liant les SERM ; au contraire, les cellules qui réagissent aux SERM produisent des coactivateurs qui déclenchent la synthèse d'un complexe de transcription fonctionnel, même quand la structure du récepteur est anormale.

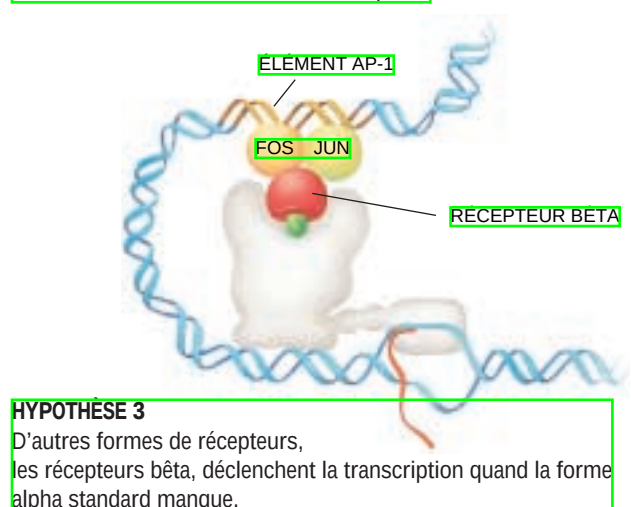
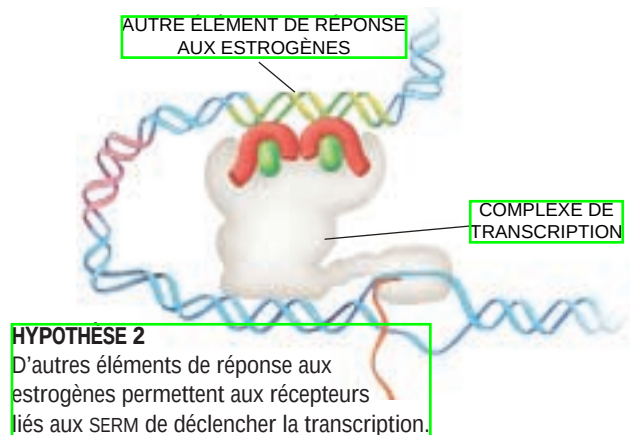
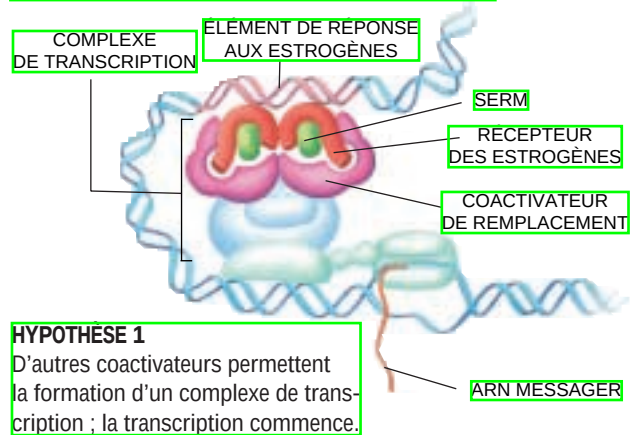
Selon une autre hypothèse, les récepteurs liés au SERM ne peuvent se fixer sur les éléments de réponse aux estrogènes des gènes. Toutefois, certains gènes offrent d'autres sites d'ancrage (*c, au milieu*). Quand les récepteurs liés à un SERM s'ancrent sur ces sites, les complexes de transcription se forment, et la production de protéines a lieu, comme si la synthèse était commandée par un estrogène.

Enfin, on a récemment découvert que le récepteur des estrogènes existe sous deux formes – au moins. On connaissait le récepteur alpha et l'on vient de découvrir le récepteur bêta. Dans les cellules qui fabriquent uniquement le récepteur alpha, les SERM empêchent les récepteurs des estrogènes de stimuler la transcription. Au contraire, dans les cellules qui fabriquent le récepteur bêta (*c, en bas*), la fixation des SERM active les récepteurs, lesquels déclenchent alors la transcription. Dans ce cas, les récepteurs formeraient un complexe de transcription en se liant non pas directement sur les gènes, mais sur des protéines nommées Fos et Jun qui, elles, se fixent sur l'ADN.

b COMMENT LES SERM EMPÊCHENT LES ESTROGÈNES D'AGIR



c COMMENT LES SERM IMITENT LES ESTROGÈNES



L'idée que le tamoxifène pourrait être une substance anticancéreuse résultait des découvertes que l'on venait de faire sur le rôle des estrogènes dans le déclenchement des cancers. On savait que les estrogènes favorisent la croissance des tumeurs du sein parce qu'au début du XX^e siècle, les médecins avaient découvert que l'ablation des ovaires, la principale source d'estrogènes chez les femmes, faisait régresser les tumeurs chez un tiers environ de celles qui avaient un cancer à un stade avancé (quand les ganglions lymphatiques, sous les bras, sont envahis).

Puis, en 1936, le radiologue français Antoine Lacassagne (1884-1971) supposa qu'une substance qui bloquerait les estrogènes préviendrait les cancers du sein, mais on ne disposait alors d'aucun antiestrogène. On ignorait les interactions moléculaires par lesquelles les estrogènes stimulent la croissance tumorale dans le sein ou déclenchent la maturation de l'appareil reproducteur féminin.

La cible des estrogènes fut découverte à la fin des années 1950, quand Elwood Jensen et Herbert Jacobson, de l'Université de Chicago, montrèrent que les estrogènes modifient le comportement des tissus cibles en se liant à leur récepteur, exclusivement produit dans ces tissus. Cinq ans plus tard,

ce récepteur fut isolé sur des cellules d'utérus de rat. Lorsque les estrogènes sont liés à leur récepteur, des gènes qui sont activés modifient le comportement des cellules. Ainsi, dans les seins ou dans l'endomètre, l'activation des gènes stimulés par les estrogènes aboutit à la division cellulaire.

E. Jensen fut également l'auteur du concept qui devait aboutir à la définition des indications thérapeutiques du tamoxifène : si l'état de certaines femmes s'améliorait après ablation des ovaires, pensa-t-il, c'est que leurs tumeurs contenaient de nombreux récepteurs des estrogènes. Les tumeurs se développent quand des estrogènes se lient à leurs récepteurs ; en l'absence de tels contacts, les tumeurs cessent d'augmenter et, parfois, disparaissent. Au contraire, les tumeurs qui ne réagissent pas à l'ablation des ovaires sont vraisemblablement dépourvues de récepteurs des estrogènes et se développent même en l'absence d'estrogènes. Ainsi, les traitements antiestrogènes administrés à des femmes dont les tumeurs contenaient de nombreux récepteurs devaient être bénéfiques ; au contraire, en présence de tumeurs contenant peu de récepteurs des estrogènes, un tel traitement devait être inefficace.

On a alors adapté les traitements à la présence ou à l'absence des récep-

teurs des estrogènes dans les tumeurs du sein. Le tamoxifène, en tant qu'antagoniste des estrogènes, devait bloquer la croissance des tumeurs portant des récepteurs des estrogènes, voire les faire disparaître, sans que les femmes aient à subir l'ablation chirurgicale des organes produisant ces hormones. On espérait que le tamoxifène se fixerait aux récepteurs des estrogènes dans les tumeurs du sein riches en récepteurs, empêchant ainsi les estrogènes de délivrer leurs signaux de prolifération cellulaire.

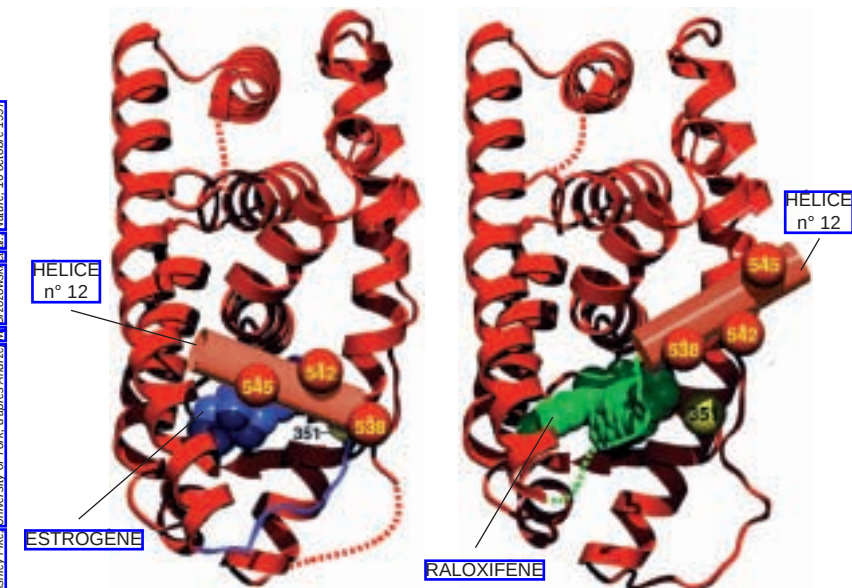
À l'époque, toutefois, de nombreux médecins étaient sceptiques. Ils mettaient alors tous leurs espoirs dans la chimiothérapie, c'est-à-dire l'administration de composés toxiques qui, véhiculés par le sang, détruisent les cellules cancéreuses (ainsi que de nombreuses cellules saines).

Malgré ce scepticisme, nous avons voulu savoir précisément si le tamoxifène freinerait la croissance des tumeurs du sein. En étudiant des cultures de cellules et des rats de laboratoire, nous avons montré que le tamoxifène empêche les estrogènes d'agir, parce qu'il occupe leurs récepteurs. Chez le rat, le tamoxifène fait diminuer la taille des tumeurs mammaires portant des récepteurs des estrogènes et empêche des agents cancérogènes de faire apparaître de nouvelles tumeurs.

Nous avons obtenu ces résultats en 1974, mais aucune évaluation du pouvoir préventif de la molécule ne fut entreprise alors. Nous avons continué nos expériences et montré que l'organisme dégrade le tamoxifène en plusieurs dérivés, ou métabolites. Des composés issus de ces dérivés sont aujourd'hui en cours d'essais cliniques ; le raloxifène en est un.

L'efficacité thérapeutique du tamoxifène

Simultanément, d'autres équipes faisaient des essais cliniques pour évaluer l'efficacité thérapeutique (mais non préventive) du tamoxifène chez des femmes ayant un cancer du sein. Au début des années 1970, deux petits essais avaient montré que la molécule faisait régresser les tumeurs chez un tiers des patientes qui souffraient d'un cancer métastasé. Les effets secondaires étaient moins graves que ceux de la chimiothérapie. Les Britanniques commencèrent à utiliser le tamoxifène en 1973, les Français en 1975.



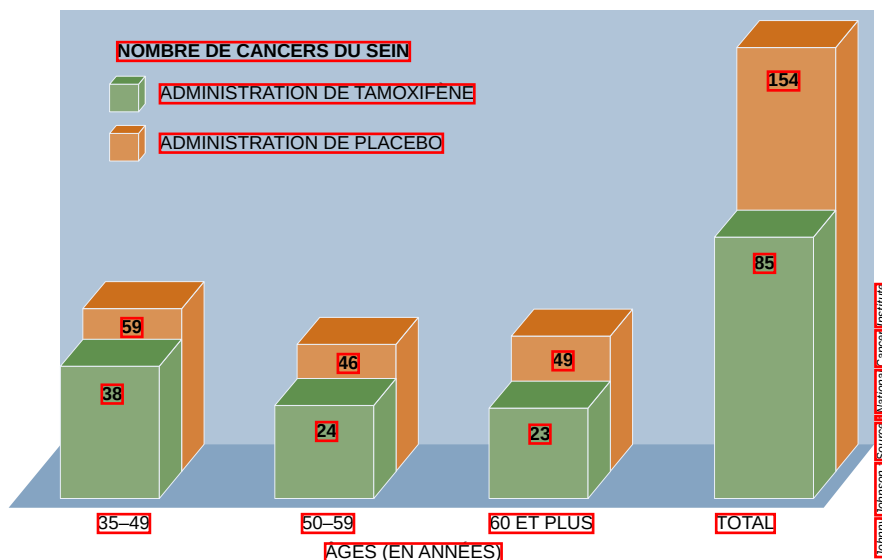
2. LA STRUCTURE du raloxifène explique son activité antiestrogène : quand un estrogène (molécule bleue, au centre) se lie à son récepteur (le ruban rouge), la douzième hélice du récepteur se replie en travers de la molécule d'estrogène (à gauche). Ce repliement met certains acides aminés en mesure d'interagir avec d'autres molécules, lesquelles déclenchent l'expression de certains gènes. En revanche, cette douzième hélice ne tourne pas quand c'est le raloxifène qui se fixe au récepteur (à droite). Cette configuration différente empêcherait le récepteur d'interagir correctement avec les molécules qui déclenchent l'expression des gènes sensibles aux estrogènes. Le raloxifène empêche la rotation de l'hélice en se liant à l'acide aminé 351 du récepteur.

On déduisit de ces premiers essais que le tamoxifène aurait un effet à plus long terme s'il était administré à des personnes dont le cancer était moins avancé. En outre, comme le tamoxifène avait un effet antiprolifératif, quelques équipes supposèrent que les femmes ayant un cancer peu étendu seraient peut-être guéries par le tamoxifène administré comme adjuvant après l'ablation des tumeurs identifiées : on espérait que le médicament détruirait les micrométastases, des amas de cellules tumorales indétectables, dispersés dans tout l'organisme et qui, sans traitement, finissent par engendrer des tumeurs fatales.

Des cancérologues ont commencé à tester cette idée en administrant du tamoxifène pendant une année, en plus du traitement classique. Simultanément, nous travaillions sur des animaux, déclenchant la formation de tumeurs microscopiques et testant l'effet thérapeutique du tamoxifène.

Dans ces deux types d'études, il apparut que les administrations trop brèves n'avaient pas d'effets. En revanche, chez les animaux traités sans interruption pendant un an (l'équivalent de plus de cinq ans de traitement chez l'homme), le tamoxifène bloque le développement des tumeurs. Au cours de la phase initiale du traitement, le tamoxifène est seulement palliatif : il inhibe la prolifération des cellules cancéreuses tant qu'il circule dans le sang. Lorsque l'administration se prolonge, il a des effets plus intéressants. Cette observation encouragea les cancérologues à faire des essais de longue durée.

On étudie ainsi le tamoxifène depuis plus de 20 ans : plus les traitements sont longs, plus ils sont efficaces. Des médecins d'Oxford ont ainsi montré que, sur 30 000 personnes ayant un cancer du sein qui n'avait pas disséminé au-delà des ganglions lymphatiques avant l'intervention chirurgicale ou la radiothérapie, 18 000 avaient des tumeurs riches en récepteurs des estrogènes ; pour les 12 000 autres, on ignore si leurs tumeurs portaient ou non ces récepteurs (8 000 les portaient sans doute). Un traitement poursuivi pendant cinq ans a réduit de moitié la réapparition d'une tumeur près du site d'origine ou sous forme de métastases, et l'effet bénéfique a continué à se manifester pendant plus de cinq ans après l'arrêt du traitement. Les femmes qui ont bénéficié du traitement par le tamoxifène pendant cinq ans ont eu moitié moins de tumeurs dans l'autre sein que les



3. UN ESSAI CLINIQUE SUR LE TAMOXIFÈNE a étudié 13 388 femmes à haut risque de cancer du sein. Les femmes qui ont participé à l'étude présentaient un contexte familial ou un passé médical indiquant une prédisposition pour la maladie ; d'autres avaient seulement leur âge (plus de 60 ans) comme facteur de risque. L'étude a duré quatre ans et s'est terminée au printemps 1998. Le médicament s'est révélé efficace quel que soit l'âge des personnes traitées : ces personnes ont eu près de deux fois moins de cancers que les femmes traitées par un placebo.

femmes qui n'ont pas reçu de tamoxifène, et l'effet préventif s'est aussi manifesté pendant plus de cinq ans.

Les premiers doutes

En 1986, le tamoxifène était largement prescrit comme traitement adjuvant à tous les stades d'un cancer du sein, et l'on envisageait de l'administrer à titre préventif. Mais l'utilisation à long terme du tamoxifène ne risquait-elle pas d'avoir des effets secondaires indésirables ? Nous avons alors entrepris d'étudier, sur l'animal, la toxicité à long terme du tamoxifène.

Nous craignions que le tamoxifène, antagoniste des estrogènes, n'inactive les estrogènes dans les tissus qui en ont besoin. Quel aurait été l'intérêt de diminuer le cancer du sein si l'on avait augmenté les risques d'ostéoporose ou d'infarctus ?

Nous avons d'abord évalué l'effet du tamoxifène et du raloxifène sur les os (le raloxifène des Laboratoires Eli Lilly était alors un composé en cours d'évaluation en tant que traitement antiestrogénique du cancer du sein) : nous avons constaté avec surprise que ces deux antiestrogènes assuraient une bonne conservation de la masse osseuse chez des rats privés d'estrogènes, comme l'auraient fait des estrogènes.

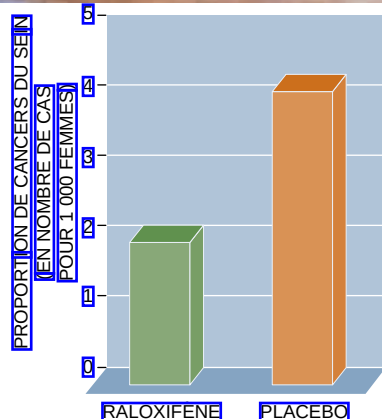
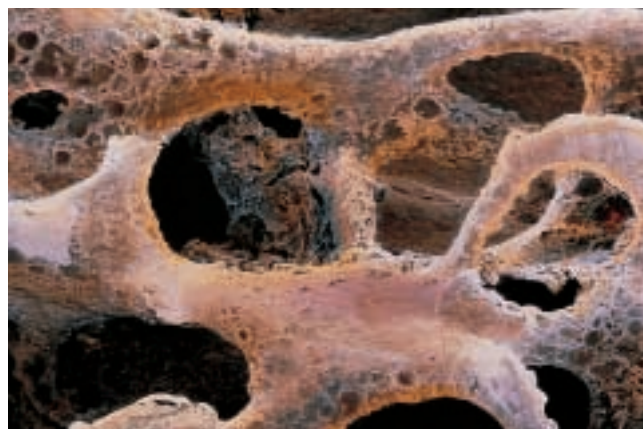
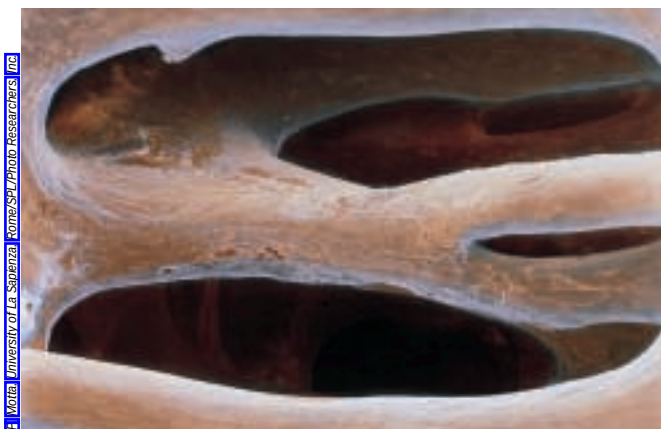
À l'évidence, leur action était ciblée. Ces substances se fixent toujours sur des récepteurs des estrogènes, à la place

des estrogènes eux-mêmes. Dans certains tissus, comme le sein, la fixation bloque les récepteurs ; en revanche, dans les cellules du tissu osseux, ces antiestrogènes activent les récepteurs, qui se comportent alors comme s'ils étaient liés à des estrogènes.

On découvrit ainsi que ces composés n'étaient pas des antiestrogènes purs, mais des modulateurs sélectifs des récepteurs des estrogènes. Si les mécanismes d'action étaient plus compliqués qu'on ne l'avait initialement prévu, un fait était établi : le tamoxifène n'accélère pas l'érosion des os.

Malheureusement, des effets secondaires délétères ne tardèrent pas à se révéler. Les études sur l'animal avaient montré que la molécule augmente le risque de cancer de l'utérus, parce qu'elle y agit comme les estrogènes. Mon collègue Marco Gottardis fit notamment une expérience devenue classique : il injecta du tamoxifène et des estrogènes à des souris à qui l'on avait implanté des tumeurs humaines du sein ou de l'utérus ; il constata que le tamoxifène bloque la croissance des tumeurs du sein, mais pas celle des tumeurs de l'utérus. De même, chez les femmes ménopausées qui ont eu un cancer du sein, le tamoxifène réduit les risques de cancer de l'autre sein, mais il augmente les risques de cancers de l'utérus.

Cet effet a beaucoup inquiété le public et les médecins, mais, si l'on doit rester vigilant, on ne doit pas céder à



la panique : les études de l'Organisation mondiale de la santé montrent que les femmes qui prennent du tamoxifène pour traiter un cancer du sein ne doivent pas arrêter leur traitement par peur d'un cancer de l'utérus ; les bénéfices sont bien supérieurs aux risques. Plus précisément, le tamoxifène sauve 30 fois plus de vies qu'il n'en condamne en raison de ses effets secondaires. De surcroît, une surveillance des femmes qui prennent du tamoxifène permet de dépister très tôt la plupart des cancers de l'utérus, à un stade où on peut les soigner.

Un des autres effets secondaires du tamoxifène est la production de caillots sanguins veineux. Ils apparaissent surtout chez les femmes âgées de plus de 50 ans.

À mesure que les recherches sur les effets secondaires du tamoxifène progressaient, les résultats sur sa valeur préventive s'accumulaient. L'essai le plus récent a été mené sur 13 388 femmes âgées de 35 ans ou plus et qui étaient prédisposées à la maladie en raison de leur histoire médicale familiale ou personnelle. La moitié a reçu du tamoxifène, l'autre moitié un placebo : le groupe traité par le tamoxifène a eu 45 pour cent de cancers du sein en moins. Le bénéfice était si évi-

4. L'OS d'une personne bien-portante (*ci-dessus à gauche*) est plus solide que celui d'une personne atteinte d'ostéoporose (*ci-dessus à droite*), un amincissement de l'os qui s'intensifie après la ménopause. Le raloxifène, une substance de la famille des SERM, prévient la diminution de la masse osseuse chez les femmes ménopausées. Il semble également diminuer les risques de cancers du sein (*le graphe, à gauche*) et de l'utérus, ainsi que les risques d'infarctus ; des essais qui visent à confirmer ces résultats préliminaires sont en cours. Les données sur le cancer du sein résultent d'une étude menée sur plus de 10 000 femmes, suivies pendant près de trois ans.

dent que l'essai a été arrêté au bout de quatre ans (il avait été prévu pour cinq ans) et que le groupe témoin a alors été traité par le tamoxifène.

Aux Etats-Unis, les médecins commencent à prescrire le tamoxifène à des femmes dont les risques sont proches de ceux que présentaient les femmes suivies pendant l'essai clinique. Elles ont généralement un risque de cancer du sein quatre fois supérieur à celui de la population générale, au même âge. En France, on ne prescrit pas de tamoxifène chez les femmes à risque de cancer du sein.

Toutefois, comme le tamoxifène augmente les risques de cancers de l'utérus, on ne peut pas l'utiliser comme un traitement préventif du cancer du sein chez les femmes qui n'ont pas de prédisposition particulière à cette maladie (sauf, peut-être chez celles à qui l'on a retiré l'utérus pour d'autres raisons). On ne peut accepter un risque, même minime, de déclencher un cancer de l'utérus sous prétexte de protéger contre le cancer du sein (on sait pourtant que certaines des femmes qui ne seront pas traitées préventivement auront un cancer du sein).

Existe-t-il un composé plus sûr pour une utilisation à grande échelle? En 1990, M. Gottardis avait montré que le raloxifène, dont on savait déjà qu'il préserve la masse osseuse chez le rat, prévient les cancers du sein et de l'utérus chez les rongeurs. Simultanément, des essais cliniques avaient montré que le tamoxifène, qui semblait se comporter comme le raloxifène, abaisse le cholestérol associé aux LDL chez la

femme. Tous ces résultats montraient que le raloxifène, ou d'autres SERM, présentaient les avantages à long terme des traitements hormonaux substitutifs (protection des os et du cœur), sans présenter les risques cancérogènes.

La santé après la ménopause

Nous avons alors proposé à des laboratoires pharmaceutiques de mettre au point des médicaments susceptibles de prévenir l'ostéoporose et les infarctus chez les femmes ménopausées et qui auraient comme effets bénéfiques supplémentaires de prévenir les cancers du sein et de l'utérus. Un tel médicament, tel un cheval de Troie, pénétrerait dans l'organisme pour y accomplir une tâche particulière, par exemple préserver la masse osseuse, et aurait subrepticement d'autres effets bénéfiques.

Ces efforts ont abouti, il y a moins d'un an, à l'autorisation de mise sur le marché (aux États-Unis) du raloxifène, qui évite l'ostéoporose en maintenant la masse osseuse chez les femmes ménopausées. En France, le raloxifène a récemment obtenu l'autorisation de mise sur le marché pour le traitement et la prévention de l'ostéoporose, et il devrait être prochainement commercialisé.

De surcroît, le raloxifène abaisse le «mauvais» cholestérol (le cholestérol associé aux LDL), sans diminuer le bon cholestérol, associé aux HDL, chez les femmes ménopausées. Peut-être réduira-t-il le nombre des infarctus. Les premiers résultats des essais cliniques

en cours sur l'intérêt du raloxifène dans la prévention de l'ostéoporose indiquent que la substance réduirait de moitié les risques de cancers du sein.

Toutefois, le raloxifène n'est pas parfait. Comme le tamoxifène et les traitements hormonaux substitutifs, il favorise la formation de caillots sanguins dans les veines. On ignore encore si le raloxifène sera durablement efficace, s'il ne présentera pas quelque risque à longue échéance, s'il préviendra l'ostéoporose aussi bien que les estrogènes, et s'il ne risque pas, au même titre que le tamoxifène, de provoquer des troubles de la mémoire en agissant comme un antiestrogène dans les aires cérébrales de la mémoire (bien que rien ne l'indique).

De surcroît, bien que le raloxifène semble réduire les risques d'infarctus et de cancer de l'utérus chez les femmes ménopausées, on ignore ses effets à long terme. L'évaluation du rôle du raloxifène dans la prévention des infarctus est en cours avec l'essai américain RUTH (*Raloxifen Use for the Heart*, c'est-à-dire «utilisation du raloxifène pour la prévention des maladies cardiaques») : sur 10 000 femmes à haut risque de maladies coronariennes qui participent à l'essai, la moitié reçoit du raloxifène et l'autre moitié un placebo. Les premiers résultats, attendus pour 2004, devraient aussi renseigner les médecins sur l'intérêt du médicament dans la prévention du cancer du sein.

Le raloxifène est-il aussi efficace, mais plus sûr que le tamoxifène pour prévenir le cancer du sein chez les femmes prédisposées à cette maladie ? Le raloxifène a presque les mêmes effets que le tamoxifène, sauf qu'il ne semble pas avoir d'effets négatifs sur la paroi utérine. L'essai américain STAR, qui vient de commencer, étudie 22 000 femmes ménopausées à haut risque de cancer du sein ; il durera dix ans et comparera l'effet du raloxifène et celui du tamoxifène.

D'autres SERM sont en cours d'élaboration. Un jour, chaque femme choisira peut-être, avec son médecin, le traitement hormonal de substitution et de prévention des cancers qui sera le mieux adapté à ses propres risques.

On cherche à disposer de nouvelles molécules et à les utiliser au mieux. Les tumeurs du sein deviennent parfois résistantes au tamoxifène qui, alors, cesse d'agir. Les cancérologues essaient de comprendre, pour la vaincre, comment naît cette résistance. Ainsi, nous avons découvert un mécanisme rare de résistance : la substitution, dans le récepteur des estrogènes, d'un minuscule composant (un acide aminé) par un autre. Les récepteurs ainsi modifiés se comportent, dans les cellules tumorales de sein, comme s'ils étaient toujours liés à un estrogène stimulant, même si c'est le tamoxifène inhibiteur qui y est lié.

Dans certains cas, les tumeurs qui résistent au tamoxifène réagissent aux antiestrogènes purs, des molécules qui n'ont aucune activité estrogénique. Ces dernières sont utilisées en dernier ressort, car elles bloquent les estrogènes partout, y compris dans des tissus où ils sont utiles, tels les os et le foie. Les antiestrogènes purs sont en cours d'évaluation en tant que nouvelles substances anticancéreuses.

Depuis 20 ans, le tamoxifène, le premier des SERM connus, a prolongé la vie de millions de femmes en agissant comme un antiestrogène dans les cellules tumorales du sein. Après avoir été étudiés uniquement pour leurs effets antiestrogéniques, les SERM le sont pour leurs effets antiestrogéniques dans certains tissus et estrogéniques dans d'autres. Leur évaluation, notamment celle du raloxifène, laisse les médecins supposer que les SERM préservent les femmes de l'ostéoporose, de l'infarctus et des cancers du sein et de l'utérus. Espérons que ces suppositions deviendront réalité.

Craig JORDAN coordonne les programmes de recherche sur le cancer du sein à l'Université Northwestern de Chicago.

M.M. GOTTARDIS, S.P. ROBINSON, P.G. SATYASWAROOP et V. Craig JORDAN, *Contrasting Actions of Tamoxifen on Endometrial and Breast Tumor Growth in the Athymic Mouse*, in *Cancer Research*, vol. 48, n° 4, pp. 812-815, 15 février 1988.

V. Craig JORDAN, *Tamoxifen : A Guide for Clinicians and Patients*, PRR, Huntington, N.Y., 1996.

V. Craig JORDAN, *Tamoxifen : The Herald of a New Era of Preventive Therapeutics*, in *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 89, n° 11, pp. 747-749, 4 juin 1997.

Jennifer I. MACGREGOR et V. Craig JORDAN, *Basic Guide to the Mechanisms of Anti-estrogen Action*, in *Pharmacological Reviews*, vol. 50, n° 2, pp. 151-196, juin 1998.

Le corps humain en apesanteur

RONALD WHITE

Les séjours prolongés dans l'espace perturbent la physiologie humaine. La médecine progresse par l'étude des astronautes en orbite.

Le 22 mars 1995, le cosmonaute Valeri Polyakov quitte la capsule *Soyouz* après un séjour de plus de 14 mois dans la station spatiale *Mir*. Son apparente bonne santé montre pour la première fois que l'être humain supporte bien de longues périodes dans l'espace.

Pourtant, on avait craint une adaptation difficile. Ainsi, en janvier 1951, plus de dix ans avant le bref vol de Iouri Gagarine (108 minutes), le médecin américain Heinz Haber avait prédit de nombreux troubles chez les personnes qui resteraient longtemps en apesanteur. Ses prévisions n'ont pas toutes été confirmées, mais celle du mal de l'espace était exacte.

Même aujourd'hui, les réactions du corps humain soumis à des conditions inédites telles qu'un voyage spatial sont difficilement prévisibles. L'homme a souvent prouvé qu'il possède de remarquables capacités d'adaptation, mais elles sont restées longtemps mystérieuses. Lentement, les médecins ont accumulé les observations afin de comprendre les réactions du corps humain à l'apesanteur. Aujourd'hui, l'étude de 400 spationautes qui ont passé l'équivalent de 45 ans dans l'espace donne une meilleure compréhension du mode de fonctionnement du corps humain aussi bien en apesanteur que dans son environnement naturel terrestre.

Lors d'un vol spatial, l'apesanteur est le principal phénomène qui perturbe la physiologie. Elle touche d'abord les récepteurs de la gravité, dans l'oreille, les liquides du corps et les structures de soutien, puis, finalement, l'ensemble du corps, des reins jusqu'au cerveau.

L'adaptation sensorielle à l'apesanteur

Lorsque les spationautes s'agrippent aux parois des véhicules spatiaux et qu'ils se tirent vers l'avant ou se reposent vers l'arrière, ils se sentent immobiles et ont l'impression que c'est le véhicule spatial qui se déplace. Ils perçoivent difficilement les mouvements, car leur organisme n'a plus la gravité comme référence.

En permanence soumis à la gravité, nous n'en avons plus conscience, mais notre corps, lui, ne l'oublie jamais. Nous sommes adaptés aux contraintes d'une vie en champ gravitationnel constant. Nous ne la percevons consciemment que par ses variations ou bien, indirectement, par les varices ou les vertiges qu'elle cause.

Notre système nerveux analyse sans cesse les informations sensorielles externes et internes. Il reçoit ces informations des capteurs sensoriels, tels que ceux de l'ouïe, de la vue ou du toucher. Ainsi, des capteurs situés dans les organes vestibulaires de l'oreille interne, dans les muscles et dans les articulations nous renseignent sur la position de notre centre de gravité, sur les positions relatives des parties de notre corps. Nombre de ces signaux dépendent de l'intensité et de la direction de la gravité terrestre.

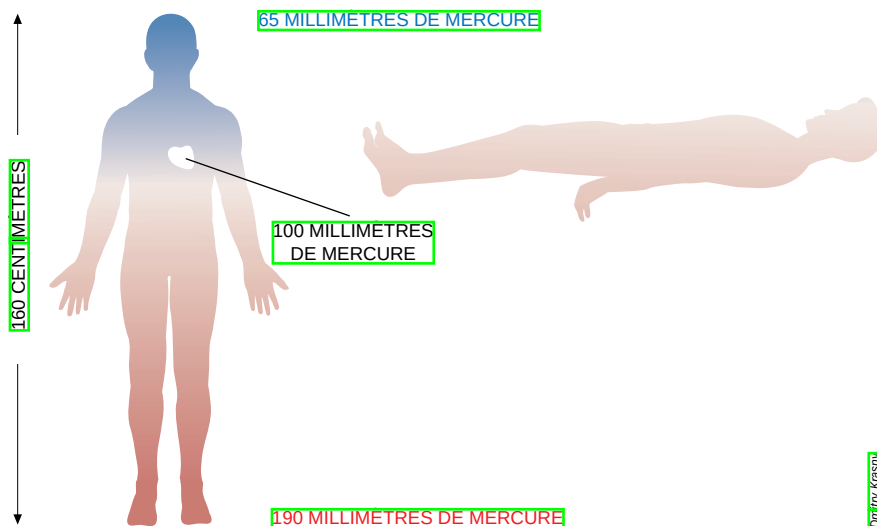
L'appareil vestibulaire de l'oreille interne détecte les accélérations par deux structures : les canaux semi-circulaires (trois tubes remplis de liquide et tapissés de cellules ciliées reliées à des fibres nerveuses) et les otolithes (des cristaux de carbonate

de calcium posés sur des cellules nerveuses). Les premiers sont sensibles à l'accélération angulaire de la tête, c'est-à-dire aux mouvements de rotation de la tête ou du corps ; les seconds réagissent à l'accélération linéaire, donc aux mouvements de translation de la tête et à son inclinaison par rapport à la gravité. Comme les otolithes détectent des accélérations linéaires et que la gravité est une force, c'est-à-dire une accélération linéaire, on a nommé les otolithes les récepteurs de la gravité. Ils ne sont pas les seuls à donner cette information : des récepteurs mécaniques dans les muscles, dans les tendons et dans les articulations, ainsi que des capteurs de pression dans la peau (surtout sous la plante des pieds) sont sensibles à l'attraction terrestre : ils réagissent au poids des membres et des autres parties du corps.

En l'absence de gravité, les otolithes ne perçoivent plus les inclinaisons de la tête. Les membres étant dépourvus de poids, les muscles n'ont plus à se contracter pour maintenir le corps et le mettre en mouvement. Les récepteurs du toucher et de la pression des pieds et des chevilles n'indiquent plus l'orientation vers le bas. Ces changements provoquent des illusions d'orientation

1. L'APESANTEUR, malgré le sentiment de liberté qu'elle procure, a des effets secondaires gênants : les spationautes souffrent du mal de l'espace, de congestion du visage et de perte osseuse. Sur cette photographie, on voit Bruce McCandless lors d'une sortie dans l'espace, en 1984. B. McCandless essayait le nouveau système de propulsion par fusée de la NASA. Il a effectué la première sortie dans l'espace sans lien avec le véhicule spatial.





2. LA PRESSION DU SANG dans les vaisseaux sanguins varie selon la position. Chez une personne de taille moyenne, debout, elle atteint, dans les parties inférieures du corps, jusqu'à deux fois la pression mesurée au cœur ; elle est inférieure au-dessus du cœur. Les liquides descendent vers le bas du corps, et le débit sanguin diminue. En position allongée (ou en apesanteur), les pressions s'équilibrent dans l'ensemble de l'organisme et les fluides se répartissent également dans l'ensemble du corps.

visuelle et des sensations d'auto-inversion, comme l'impression que le corps ou le véhicule spatial change subitement d'orientation. En 1961, durant son vol spatial d'une journée seulement, le spationaute Gherman Titov a eu la vive sensation d'un voyage la tête en bas. L'année dernière, l'Américain Byron Lichtenberg a eu la même sensation lors de l'arrêt des moteurs principaux : il a aussitôt eu l'impression que son corps avait basculé de 180 degrés. De telles illusions réapparaissent quelquefois, même après un certain temps passé dans l'espace.

Contrairement aux prédictions de H. Haber et de son collègue Otto Gauer en 1950, les spationautes ne ressentent pas les effets d'une chute libre, bien qu'un vol orbital corresponde à une telle chute (le vaisseau spatial tombe vers la Terre sans s'en rapprocher, parce qu'il a une vitesse perpendiculaire à la direction de la gravité). Des signaux visuels, la perception d'un courant d'air et des informations perçues par les récepteurs de la gravité sont probablement nécessaires à la perception d'une chute.

Chez plus de la moitié des spationautes, l'ensemble des modifications sensorielles provoque le mal de l'espace, caractérisé par des maux de tête, une déconcentration, une perte d'appétit, des nausées et des vomissements. Le mal de l'espace dure rarement plus de trois jours, mais des spationautes ont fait état d'une sensation équivalente à la fin de vols prolongés.

Les physiologistes attribuaient le mal de l'espace à une activité inhabituelle du système vestibulaire, qui déroutait le cerveau accoutumé à un certain type de signaux. Cette explication était simpliste. Le mal de l'espace résulte notamment de la modification de l'ensemble des informations motrices requises pour le contrôle de la tête. On peut déclencher un mal similaire en plaçant un individu dans un environnement virtuel, calculé par ordinateur, où les forces et les stimuli sont différents de ceux d'un mouvement réel.

Progressivement, le cerveau s'adapte au nouvel environnement et, pour certains spationautes, le bas devient l'endroit où se trouvent les pieds. Des adaptations des récepteurs et des cellules nerveuses favorisent probablement cette accoutumance. Des modifications similaires se produisent sur la Terre lors de notre croissance et pendant les périodes de fortes variations pondérales. Les mécanismes de contrôle de l'équilibre restent toutefois mal connus. Après un vol spatial, la plupart des spationautes, par ailleurs en bonne santé, présentent des troubles temporaires de l'équilibre. L'étude de ces cas aidera ceux qui présentent naturellement les mêmes difficultés sur la Terre. Bernard Cohen, de la Faculté de médecine du Mont-Sinaï, à New York, et Gilles Clément, directeur de recherche au Centre de recherche Cerveau et Cognition, à Toulouse, ont entrepris une telle étude lors

de la mission *Neurolab* de la navette américaine, au printemps 1998. Sur la base de leurs résultats, Barry Peterson et ses collègues de l'Université du Nord-Ouest, de la NASA et de l'Institut américain de la santé (NIH) ont mis au point le premier modèle informatique des postures du corps humain et du contrôle de l'équilibre.

Le rhume de l'espace

L'absence de gravité perturbe également la répartition des liquides dans le corps humain. Au bout de quelques minutes, dans un environnement sans gravité, les veines du cou d'un spationaute enflent et son visage se boursouffle. La montée de sang vers la poitrine et vers la tête provoque une congestion des poumons, des sinus et du nez ; le spationaute présente les mêmes symptômes qu'un rhume terrestre. Cette gêne persiste durant tout le vol, sauf quand la pression sanguine varie, comme au cours d'efforts physiques intenses. Le goût et l'odorat sont également affaiblis ; les spationautes ont besoin de plats épicés. Au temps des premiers vols spatiaux, les médecins craignaient que la congestion des poumons ait les mêmes conséquences que les œdèmes pulmonaires chez les cardiaques ; heureusement, cette inquiétude semble infondée.

Toutes ces modifications surviennent parce que l'eau constitue environ 60 pour cent de la masse du corps. Elle se répartit dans les cellules (liquide intracellulaire), dans les artères et les veines (plasma sanguin), et dans les espaces entre les vaisseaux et les cellules (lymphe interstitielle). Chez un individu debout, sur la Terre, cette eau pèse sur l'ensemble de l'organisme. Dans le système vasculaire, composé de tous les vaisseaux sanguins connectés, la pression augmente de la tête aux pieds, tout comme la pression de l'eau augmente avec la profondeur dans l'océan. Chez une personne debout et immobile, l'effet de la pression hydrostatique est considérable ; les soldats au garde-à-vous perdent parfois connaissance. La pression varie en effet selon l'endroit du corps : équivalente à 100 millimètres de mercure au niveau du cœur, elle diminue dans les vaisseaux situés au-dessus et augmente vers le bas. Dans les jambes, les pressions artérielle et veineuse atteignent jusqu'à 190 millimètres de mercure (voir la figure 2).

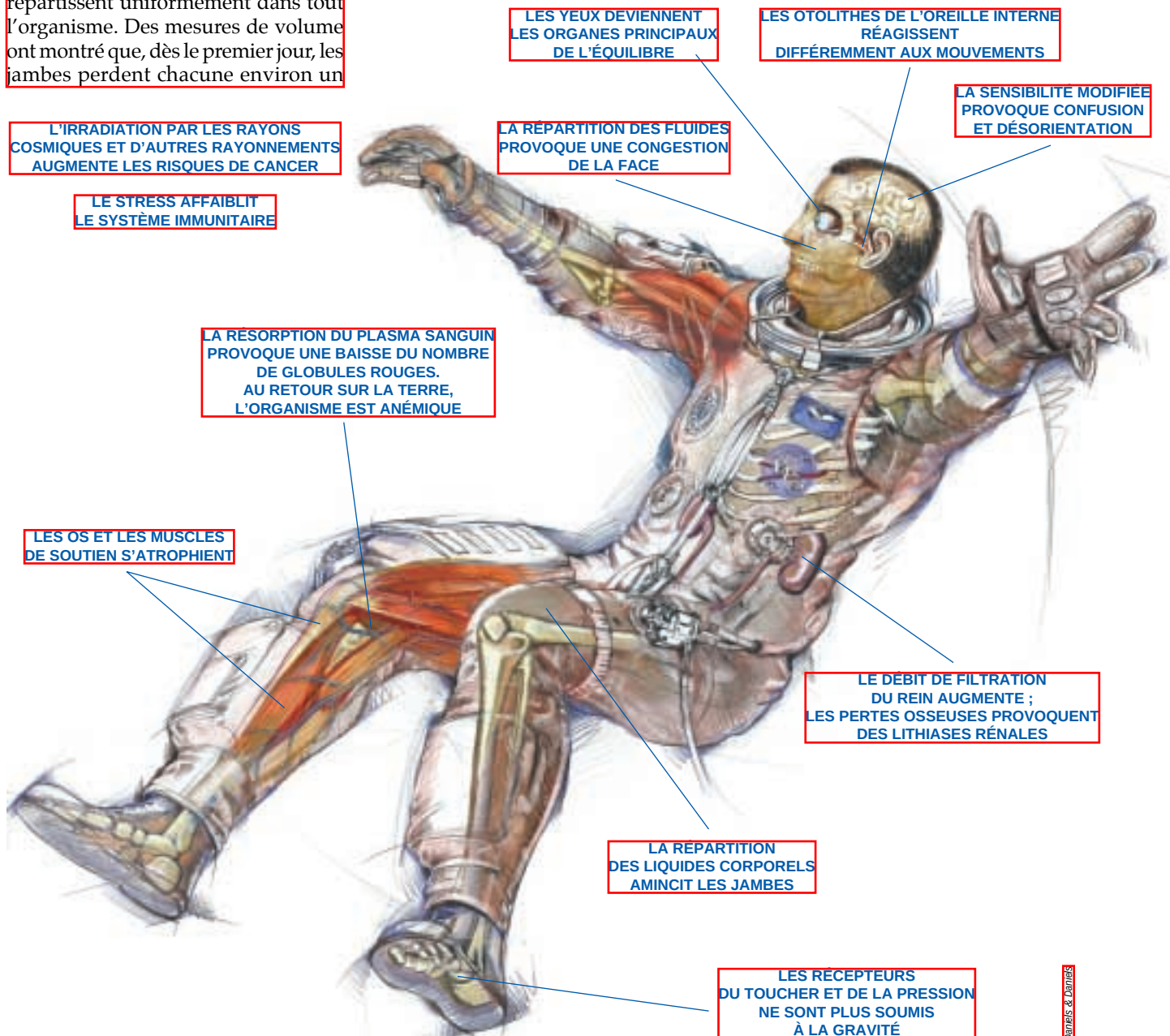
L'effet hydrostatique gêne peu l'écoulement du sang dans les tissus et dans les organes, parce que la pression veineuse est égale à la pression artérielle. En revanche, il modifie la répartition des liquides dans l'organisme en augmentant le passage du plasma des capillaires vers l'espace interstitiel. Lorsqu'on se lève, le liquide afflue dans les parties inférieures du corps, le retour du sang vers le cœur diminue. Les veines en permanence dilatées par un excès de liquide forment des varices. Après de longues périodes en position assise (par exemple, après un vol aérien de longue durée), les pieds enflent.

Dans l'espace, en l'absence de pression hydrostatique, les liquides se répartissent uniformément dans tout l'organisme. Des mesures de volume ont montré que, dès le premier jour, les jambes perdent chacune environ un

litre de liquide (soit près de dix pour cent de leur volume) ; elles conservent ce volume réduit pendant toute la durée du séjour dans l'espace (les liquides remontent vers la tête alors que les spationautes sont encore sur la rampe de lancement, car ils restent pendant plusieurs heures sur des couchettes avec les pieds surélevés). L'organisme s'adapte en répartissant l'eau dans les divers compartiments. Environ 20 pour cent du plasma sort des capillaires sanguins et rejoint la lymphe interstitielle.

Ces déplacements de liquides déclenchent une série de réactions rénales, hormonales et mécaniques qui règlent les concentrations en eau et en sels minéraux. Par exemple, la vitesse de filtration rénale augmente d'environ 20 pour cent pendant toute la première semaine passée dans l'espace. En outre, les spationautes présentent une forme spéciale d'anémie quand ils reviennent sur la Terre, même après des vols courts. Au Collège de médecine Baylor, Clarence Alfrey a montré que la perte de plasma et la

Les effets d'un vol spatial sur le corps humain



réduction du volume vasculaire qui s'ensuit provoquent une surabondance de globules rouges. Le corps, en réaction, arrête la production de globules rouges et détruit ceux qui sont en excès.

Les muscles et les os sont parfois gravement perturbés par les effets de l'apesanteur : quelle que soit la durée du séjour dans l'espace, les spationautes reviennent toujours avec une masse

musculaire et une masse osseuse réduites. Pourquoi cet effet ? Parce que les forces qui s'exercent sur les éléments structuraux de l'organisme diminuent considérablement. L'absence

Orientation spatiale en apesanteur

La gravité est omniprésente sur la Terre. Elle est une accélération dirigée vers le centre de la Terre qui détermine notre posture, notre équilibre et la plupart de nos mouvements. On estime qu'environ 60 pour cent des muscles de notre corps s'opposent à la gravité. Leur commande nécessite que le système nerveux connaisse à tout moment l'inclinaison du corps par rapport à la gravité.

L'appareil vestibulaire de l'oreille interne contient des récepteurs sensoriels, les otolithes, sensibles aux accélérations linéaires, telles que la gravité. Les otolithes sont de petits cristaux de carbonate de calcium qui reposent sur des cellules sensorielles reliées au cerveau. Quand la tête est inclinée par rapport à l'axe vertical, le glissement de ces cristaux stimule les cellules sensorielles, et le système nerveux central en déduit l'angle d'inclinaison de la tête.



Dans le Spacelab de la navette spatiale, un spationaute assis au bout du bras d'une centrifugeuse tourne à 42 tours par minute. La force centrifuge, équivalente à 1 g, qui le plaque sur le côté gauche, est perçue comme une gravité artificielle et lui donne l'illusion d'être couché sur le côté. Devant son visage, un écran d'ordinateur et des caméras vidéo enregistrent les mouvements de ses yeux.

Cependant, les otolithes se déplacent également sur les cellules sensorielles lorsque nous effectuons un mouvement de translation horizontal ou vertical. Dans ce cas, les otolithes glissent, en raison de leur inertie, dans la direction opposée à celle du mouvement. L'information délivrée au cerveau par les cellules sensorielles est donc ambiguë : le déplacement des otolithes est dû soit à une inclinaison, soit à une translation.

Comment, dans l'obscurité, sans références visuelles, le cerveau distingue-t-il une inclinaison de la tête d'un mouvement de translation ? En apesanteur, seules les translations de la tête mettent les otolithes en mouvement. Si l'on communique une accélération linéaire à la tête des spationautes, cette accélération sera-t-elle interprétée par le cerveau comme la conséquence d'une inclinaison ou d'une translation de la tête ?

Cette question était à l'origine des expériences effectuées à bord de la navette spatiale, lors de la mission NEUROLAB STS-90, en avril 1998. L'accélération linéaire était produite par une centrifugeuse. Ce système, mis au point par l'Agence spatiale européenne et par la Société *Aérospatiale*, comprend un siège situé au bout d'un bras de 50 centimètres, qui tourne à environ 42 tours par minute, engendrant une accélération centrifuge de 1 g équivalente à la gravité terrestre, mais cette fois-ci horizontale. Les sujets sont placés dans l'obscurité, de sorte que le cerveau dépende uniquement des informations de l'oreille interne pour détecter le mouvement.

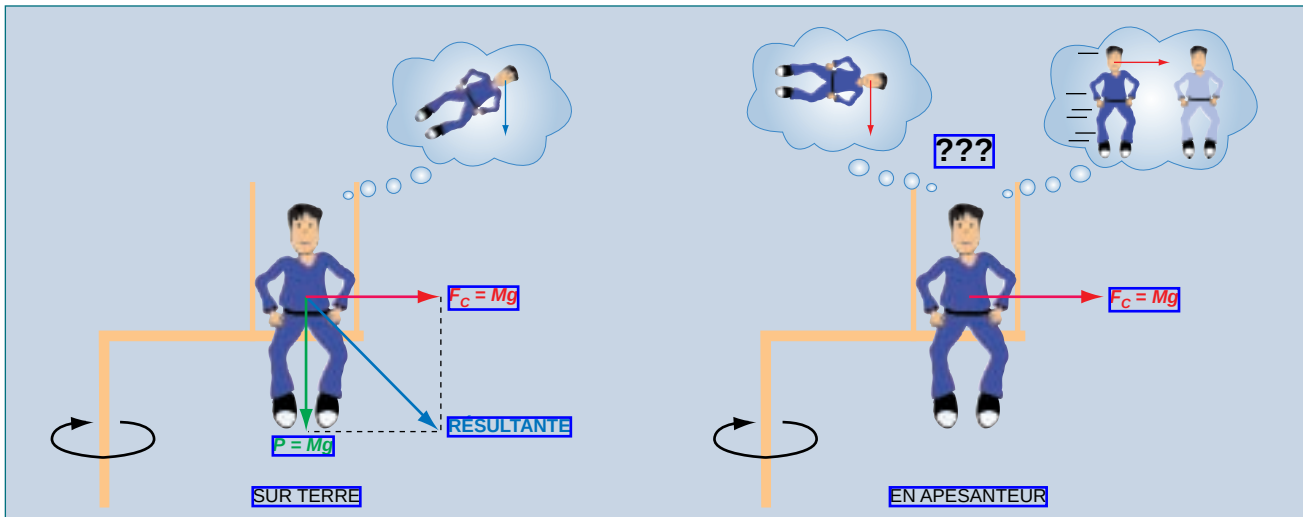
Sur la Terre, à la mise en route de la centrifugeuse, les sujets ont généralement la sensation d'un mouvement de rotation pendant à peine une minute. Cette sensation est due à la stimulation d'un autre type de récepteurs situés dans l'oreille interne, les canaux semi-circulaires. Ces canaux ne sont plus stimulés lorsque la rotation atteint une vitesse constante. Au contraire, les otolithes sont stimulés en permanence lors de la centrifugation, à la fois par la force gravitationnelle, verticale, et par la force centrifuge, horizontale. La somme de ces forces est oblique ; le cerveau interprète faussement qu'il s'agit de la gravité. Comme la gravité est naturellement alignée avec la verticale, le cerveau déduit des signaux reçus de l'oreille interne que le corps est incliné de 45 degrés par rapport à la gravité (voir la figure de la page ci-contre, à gauche). Quand on mesure les mouvements oculaires pendant la centrifugation, on constate une rotation des globes oculaires dans la direction opposée à l'inclinaison perçue, comme si le cerveau tentait de compenser la rotation de l'image visuelle sur la rétine suite à une inclinaison.

La trajectoire orbitale de la navette est physiquement comparable à une chute libre. Par conséquent, la force gravitationnelle n'est pas détectée par les récepteurs

de compression sur la colonne vertébrale augmente la taille des individus d'environ cinq centimètres. La plupart des organes n'ont plus de poids. La cage thoracique se relâche et se dilate. Les

organes abdominaux semblent flotter ; les spationautes contractent parfois leur abdomen, afin de les remettre en place. Les muscles squelettiques, qui commandent les mouvements des dif-

férentes parties de notre corps, constituent le tissu le plus abondant de l'organisme. Ils sont adaptés à la position verticale, mais, dans l'espace, ils n'ont plus d'utilité. Par conséquent, certains



La rotation à vitesse angulaire constante engendre une force centrifuge (F_c), égale à la force gravitationnelle terrestre, au bout du bras de la centrifugeuse. Sur la Terre, le cerveau interprète la résultante de cette force centrifuge et de la force gravitationnelle

(P) comme étant verticale et le sujet a la sensation d'être incliné à 45 degrés sur sa gauche. En apesanteur, la force centrifuge peut être perçue comme une inclinaison à 90 degrés sur le côté gauche ou comme une translation continue vers la droite.

otolithiques. En apesanteur, dans la navette, sur la centrifugeuse en rotation, les otolithes des spationautes ne sont stimulés que par la force centrifuge. Comment cette grandeur physique sera-t-elle interprétée par le cerveau : une inclinaison du corps sur le côté gauche ou une translation horizontale du corps sur la droite ?

référence utilisée sur la Terre est la gravité, omniprésente. Cependant, la gravité n'est plus détectée en apesanteur, et le cerveau doit extraire de l'environnement une nouvelle grandeur pertinente qui servira de référence.

Au cours de l'expérience effectuée lors de la mission NEUROLAB, on a demandé à quatre spationautes de décrire l'orientation et le mouvement perçus lors de la centrifugation dans l'obscurité. Les mouvements de leurs yeux étaient enregistrés par des caméras vidéo en lumière infrarouge. Le deuxième jour du vol, les astronautes ont eu la sensation d'être inclinés à 45 degrés sur le côté pendant la centrifugation, comme sur la Terre. Cependant, dès le cinquième jour du vol spatial et jusqu'à la fin de la mission de 16 jours, ils se sont sentis inclinés à 90 degrés sur le côté. Jamais ils n'ont eu la sensation d'un mouvement de translation. L'enregistrement des mouvements oculaires pendant la centrifugation a montré que, comme sur la Terre, leurs yeux effectuaient un mouvement de rotation pour tenter de compenser cette inclinaison perçue. Tout se passe donc comme si, en apesanteur, le cerveau interprétait l'accélération, linéaire et continue engendrée par la centrifugeuse, comme une gravité artificielle.

Ces résultats indiquent que le cerveau a besoin d'une référence constante, liée à l'environnement du corps. La vision de l'environnement, lorsqu'elle est disponible, est prépondérante dans la détermination de la position du corps dans l'espace. Elle l'est plus encore en apesanteur, où le «haut» et le «bas» n'existent plus. En complément des repères visuels extérieurs, et à plus forte raison en leur absence, la

Ces résultats qui éclairent les mécanismes fondamentaux de l'orientation spatiale devraient permettre un meilleur traitement des troubles de l'équilibre, lors de la locomotion, par exemple ; ils offrent des perspectives intéressantes pour les vols habités de très longue durée. Quand des astronautes iront sur Mars, la mission spatiale durera plusieurs mois, voire plusieurs années. Or l'absence du stress imposé par la gravité sur les os et sur les muscles s'accompagne d'une décalcification osseuse et d'une fonte de la masse musculaire, comme cela est le cas chez les spationautes lors de leurs séjours prolongés à bord de la station *Mir*. Ces modifications physiologiques compromettront sans doute l'efficacité des équipages sur la surface de Mars, puis leur réadaptation à la gravité terrestre. Contre ces phénomènes, des agences spatiales ont proposé l'utilisation de la centrifugation à bord des véhicules spatiaux. Elles ont abandonné l'idée de véhicules spatiaux en rotation sur eux-mêmes, comme la station spatiale de 2001, *l'Odysée de l'espace*. Cependant, l'exposition régulière des spationautes à une accélération linéaire continue, grâce à une centrifugeuse embarquée de petit diamètre, semble plus réaliste. Dans cette perspective, nos résultats sont encourageants : ils montrent que l'accélération linéaire produite par une centrifugeuse est bien interprétée en apesanteur comme une gravité artificielle.

Gilles CLÉMENT
Centre de recherche Cerveau et Cognition, Toulouse

d'entre eux s'atrophient rapidement. Simultanément, la nature des muscles évolue ; certaines fibres à contraction lente, nécessaires face à la gravité, se transforment en fibres à contraction rapide. Les spationautes ne sont pas gênés tant que les travaux restent légers. Toutefois, de nombreuses expérimentations sont en cours sur l'atrophie des muscles requis pour des travaux pénibles au cours des sorties dans l'espace, et leur préservation pour un retour en bonne forme sur terre.

Le métabolisme osseux évolue également. L'os, l'un des matériaux biologiques le plus résistants connus, est un tissu dynamique : certaines cellules, les ostéoblastes, produisent l'os, tandis que les ostéoclastes le détruisent. Les deux types cellulaires, sensibles à différentes hormones et vitamines présentes dans le sang et aux contraintes mécaniques qui s'exercent sur l'os, assurent normalement l'équilibre des os.

Les matières organiques confèrent à l'os résistance et stabilité, tandis que les matières inorganiques le rigidifient. Le squelette est une réserve de calcium pour l'organisme : il contient 99 pour cent du calcium présent, et sa mise en solution, puis sa répartition dans l'organisme, maintiennent des concentrations stables en calcium, nécessaires au bon fonctionnement des cellules.

Des équipes russes et américaines ont étudié les variations de masses des os dans l'espace. Les pertes concernent surtout les vertèbres inférieures, les talons, les hanches et la partie supérieure des fémurs. Elles sont d'environ un pour cent par mois pendant toute la durée des missions. Le calcium ainsi libéré dans le corps cristallise et provoque parfois des lithiases rénales et une calcification des tissus mous.

De retour sur la Terre, le squelette retrouve son poids initial au bout de quelques mois, mais les médecins ne

savent pas encore si l'os se reconstitue correctement. Cette question est importante, car si la perte osseuse était irréversible, les anciens spationautes auraient toujours un risque de fractures élevé. L'étude d'animaux envoyés dans l'espace indique également que la production d'os diminue pendant le temps du vol.



3. L'ALITEMENT produit des effets physiologiques analogues à ceux de l'apesanteur. Au Centre de recherche Ames de la NASA, des volontaires restent couchés, sur des lits inclinés de six degrés, la tête plus basse que les pieds. Après quelque temps dans cette position, les liquides de l'organisme s'accumulent dans la poitrine et dans la tête, les muscles s'atrophient et les os s'affaiblissent. Les médecins testent divers exercices, régimes et traitements médicamenteux contre ces perturbations physiologiques.



4. JOHN GLENN, spationaute devenu sénateur de l'Ohio, sort d'une maquette d'entraînement de la navette américaine, en 1989. Il voyagera de nouveau dans l'espace à bord de la navette Discovery à la fin du mois d'octobre. Le vol spatial exerce sur le corps humain des effets comparables à ceux du vieillissement. J. Glenn, âgé de 77 ans, sera la première personne qui subira les effets des deux facteurs en même temps.

La physiologie osseuse dans l'espace est mal connue parce que, sur la Terre, elle l'est aussi. On ne sait notamment pas encore bien lutter contre l'ostéoporose des femmes après la ménopause. De nombreux facteurs (activité, nutrition, vitamines, hormones) interviennent dans cette perte osseuse, mais on en ignore toujours l'action et les interactions. Cette ignorance retarde la mise au point d'une prévention efficace de l'ostéoporose des femmes ménopausées comme des spationautes. Jusqu'ici, divers types d'exercices ont été testés, mais sans réel succès.

Respiration et collectivité

Les pneumologues ont également bénéficié des études du poumon dans l'espace. Sur la Terre, les débits d'air et de sang diffèrent dans les parties inférieures et supérieures du poumon. Ces différences sont-elles dues à la gravité ou à la nature même du poumon ? John West et ses collègues de l'Université de San Diego, et Manuel Paiva, de l'Université libre de Bruxelles, ont montré que la gravité n'est pas en cause : même en apesanteur, les différentes parties du poumon sont parcourues par des débits différents d'air et de sang.

L'apesanteur n'est pas responsable de toutes les modifications de l'organisme qui apparaissent pendant les vols spatiaux. Ainsi, l'immunodéficience dont souffrent les spationautes est probablement due aux divers stress provoqués par le vol. La quantité et la qualité du sommeil sont également modifiées, parce que les éclairages et les horaires de travail perturbent les rythmes naturels du corps. Un regard par le hublot juste avant le coucher (la beauté du spectacle est une tentation irrésistible) stimule la rétine au point de provoquer une réaction physiologique

qui perturbe le sommeil. Les nuits sont raccourcies et la fatigue s'accumule.

Les spationautes vivent isolés, dans un espace réduit, sans sortie possible. Durant toute leur mission, ils côtoient un groupe restreint de compagnons qui ont souvent une culture différente de la leur. Cet isolement est parfois cause d'anxiété, d'insomnie, de dépression ou de tension entre les divers membres de l'équipage. Le stress peut perturber les spationautes autant que l'apesanteur, voire davantage. Quelle est la responsabilité respective du stress et de l'apesanteur dans les modifications physiologiques observées par les médecins ? La question est à l'étude.

Enfin, le vol spatial expose les spationautes à des rayonnements ionisants. En orbite terrestre basse et modérément inclinée, un spationaute reçoit dix fois plus de rayonnements qu'à la surface de la Terre. Un séjour d'un an sur la Lune exposerait à une dose encore sept fois supérieure. Les expulsions soudaines de particules par le Soleil, comme celles d'août 1972, libèrent en moins d'une journée une dose jusqu'à 1 000 fois supérieure à la dose annuelle reçue sur la Terre. De tels événements sont heureusement rares, et les véhicules spatiaux sont équipés de chambres protégées contre les rayonnements. Les spationautes s'y réfugient en cas d'alerte.

Le risque de cancer qui découle de l'irradiation par les rayons cosmiques est difficilement quantifiable. Les radiologistes estiment néanmoins qu'avec des protections appropriées et des médications préventives les risques peuvent être ramenés dans des limites acceptables.

Le retour sur la Terre

Lorsque les spationautes retrouvent la Terre et sa gravité, leur corps s'adapte et subit de nouveaux changements. L'organisme retrouve ses capacités initiales après un certain temps : nous savons aujourd'hui que la plupart des systèmes du corps humain s'adaptent de façon réversible, du moins pour les intervalles de temps pour lesquels nous disposons de données.

Une fois au sol, mais aussi pendant la descente, les spationautes ressentent fortement la gravité. C'est un choc : au début, ils ont le sentiment d'être écrasés par trois fois leur poids.



5. CHAQUE JOUR, les spationautes font plusieurs heures d'exercices physiques. On voit ici Terence Henricks s'entraînant à bord de la navette spatiale Atlantis, en 1991. Mario Runco, équipé de capteurs médicaux, attend son tour. Même si ces exercices ralentissent quelquefois l'atrophie des muscles qui, sur la Terre, assurent la station debout, leur efficacité n'est pas encore clairement démontrée.

Lorsqu'ils bougent la tête, les objets environnants semblent être en mouvement, et ils se maintiennent debout avec difficulté, que leurs yeux soient ouverts ou non.

Rien n'indique qu'une personne ayant vécu et travaillé dans l'espace pendant des périodes prolongées ne puisse ensuite retrouver une vie normale sur la Terre : les futurs occupants de la Station spatiale internationale et ceux qui partiront pour des missions interplanétaires peuvent être tranquilles. La Station spatiale internationale, dont l'assemblage commencera en 1999, permettra la poursuite des études de médecine spatiale. Une fois achevée, dans cinq ans, la station disposera d'un espace de travail de près de 1 300 mètres cubes (cinq fois plus que les stations Mir ou Skylab) et embarquera des équipements d'étude de la physiologie humaine. L'Institut américain de recherches biomédicales spatiales

est chargé d'étudier les risques des vols prolongés dans l'espace.

Nombre des changements qui se produisent chez des spationautes pendant les vols dans l'espace ou à leur retour ressemblent à des modifications observées chez des personnes malades sur la Terre. Par exemple, après l'atterrissage, la plupart des spationautes ne supportent plus de rester dix minutes en position debout et immobile ; ils se sentent mal et sont proches de l'évanouissement. Certaines personnes âgées et les malades alités pendant une durée prolongée ressentent ce malaise orthostatique. Comme l'alitement est également accompagné d'une perte musculaire et osseuse, on l'utilise pour simuler les effets du vol spatial lors de l'entraînement des spationautes.

D'autres modifications dues au vieillissement ressemblent à celles qui sont produites par un séjour dans l'espace. Nous avons vu que la perte osseuse au cours d'un vol est analogue à l'ostéoporose. L'immunodéficience, les troubles du sommeil et les troubles de coordination motrice atteignent aussi bien les spationautes que les personnes âgées. Les causes ne sont peut-être pas identiques, mais les similarités sont si frappantes que les centres de recherches spatiales collaborent aujourd'hui avec les laboratoires d'étude du vieillissement. En octobre 1999, ils étudieront les réactions physiologiques de John Glenn, qui fut l'un des premiers spationautes américains, qui repartira pour l'espace.

Ronald WHITE est codirecteur de l'Institut américain de recherches biomédicales et spatiales.

Proceedings of a Conference on Correlations of Aging and Space Effects on Biosystems, sous la direction de R.L. Sprott et C.A. Combs, in *Experimental Gerontology*, vol. 26, n° 2-3, pp. 121-309, 1991.

James R. LACKNER, *Orientation and Movement in Unusual Force Environments*, in *Psychological Science*, vol. 4, n° 3, pp. 134-142, mai 1993.

A.E. NICOGLOSSIAN, C.L. HUNTOON et S.L. POOL, *Space Physiology and Medicine*, troisième édition, Lea & Febiger, 1993.

Applied Physiology in Space, numéro spécial du *Journal of Applied Physiology*, vol. 81, n° 1, pp. 3-207, juillet 1996.

Son et musique au Paléolithique

MICHEL DAUVOIS • XAVIER BOUTILLON • BENOÎT FABRE • MARC-PIERRE VERGE

L'étude de quelques instruments sonores fabriqués par les hommes du Paléolithique et l'exploration acoustique de leurs grottes ornées montrent qu'ils utilisaient des phénomènes acoustiques et jouaient de la musique.

La naissance de l'art est attestée au Paléolithique par les grottes ornées, les gravures et les statuettes de plus de 30 000 ans qui nous sont parvenues. Ces peintres, graveurs et sculpteurs étaient-ils aussi musiciens ?

Malgré le caractère éphémère des productions sonores, quelques témoignages matériels en ont été conservés. Dans les lieux qu'ils ont habités, les hommes du Paléolithique ont laissé des instruments émetteurs de signal, telles les phalanges sifflantes, ou de musique, comme la flûte. Nous avons « joué » ces instruments, ou des répliques à l'identique, et nous avons réalisé des simulations numériques afin de retrouver les sons produits par nos ancêtres et de comprendre leurs choix acoustiques.

L'intensité, la dynamique et le rythme, constituant en grande partie la musique, ne peuvent être abordés qu'au travers d'observations ethnographiques ou d'expérimentations. Ainsi, la connaissance, la pratique du chant, d'un instrument comme la flûte permettent de se rapprocher des moyens de nos ancêtres : la voix, l'oreille, le souffle, le doigté, le mouvement. Nos mesures physiques, limitées à la description objective de la fréquence et, parfois, du timbre, suffisent toutefois à prouver que les hommes du Paléolithique possédaient déjà certaines connaissances acoustiques.

Par ailleurs, les hommes de Cro-Magnon ont remarqué des particularités sonores des grottes qu'ils ont ornées. Certaines sont indiquées par des signes picturaux ou coïncident avec des œuvres pariétales, qui prennent un sens grâce à nos mesures acoustiques.

Les phalanges de renne sifflantes

Parmi les nombreux ossements, reliefs alimentaires des hommes du Paléolithique, Néandertaliens ou Cro-Magnons, on trouve quelques phalanges de renne percées qui font d'excellents sifflets, produisant un son clair et puissant. Ces phalanges portent toujours l'empreinte de morsures animales, que recoupent des traces de boucherie. Les plus anciennes ont environ 100 000 ans, et la tradition a perduré jusqu'à l'aube du XX^e siècle, par exemple chez les Indiens du Mackenzie, au Nord-Ouest du Canada.

Les phalanges sifflantes du Paléolithique témoignent de relations étroites entre l'homme et des carnassiers, notamment le loup. Cet animal paraît avoir été le commensal de l'homme bien avant de devenir son compagnon.

Quand un groupe de loups chasse à courre un cervidé, l'animal de tête tente de mordre les pattes arrière, le flanc et, d'un bond, de heurter brutalement de l'épaule l'animal poursuivi pour le faire trébucher. La mise à mort se fait alors en évitant les redoutables sabots aux bords tranchants. Quand une meute a tué une proie, elle s'acharne volontiers, afin d'en consommer jusqu'au moindre lambeau de chair. De la sorte, les os portent de graves lésions et sont éventuellement troués.

Les Néandertaliens et les Cro-Magnons, dépeçant des carcasses de rennes ainsi tués et plus ou moins dévorés par des loups, ont récupéré des phalanges mordues et trouées par les carnassiers. Après désarticulation et décarnisation, le trou est régularisé, éventuellement agrandi, la moelle occupant la cavité est extraite : le sifflet est prêt.

Une telle transformation requiert que le trou occupe une position précise, sur la face postérieure de la première phalange, proche de l'épiphyse supérieure (l'extrémité renflée de l'os). Quand cette zone est mordue par un loup, l'os peut y être troué alors qu'il ne porte autour que des traces profondes de morsures, à cause de la morphologie dentaire spécifique à cet animal et de la structure des phalanges de renne : elles sont naturellement creuses, et la paroi osseuse est moins épaisse à cet endroit. Quelques rares secondes phalanges de renne, possédant les mêmes caractéristiques,



1. LES PHALANGES DE RENNE SIFFLANTES sont les plus anciens instruments sonores. Ces instruments, dont le trou était percé par des carnivores (à gauche, on observe des traces de morsures sur une phalange aurignacienne, d'environ 30 000 ans avant notre ère, trouvée à la Croze à Gondran, en Dordogne), ne sifflent fortement que lorsque le trou est agrandi et régularisé par l'homme (à droite, phalange solutréenne, de 18 000 ans avant notre ère, de Laugerie-Haute, en Dordogne).

ont, de la même façon, été transformées en sifflets.

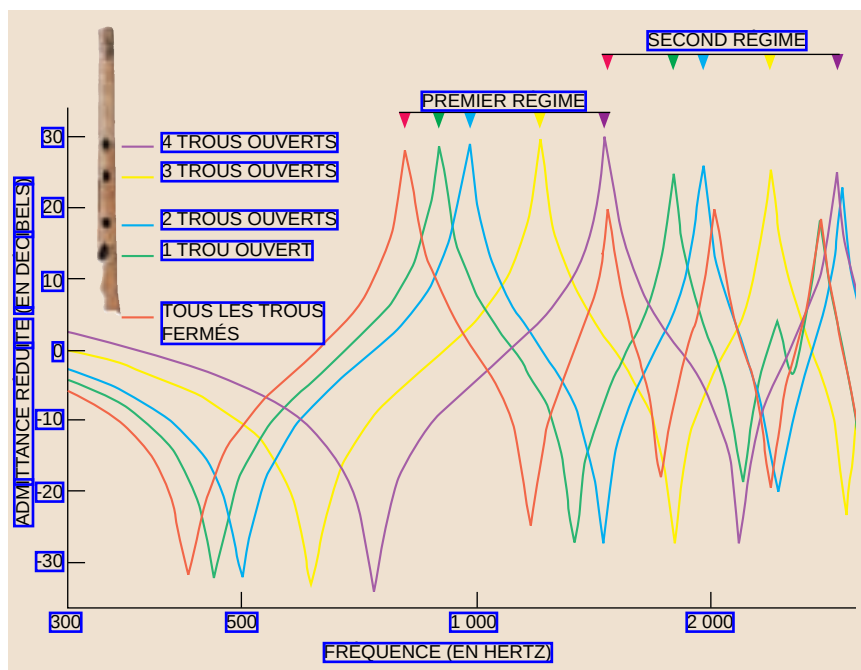
Cet «instrument à vent», pour primitif qu'il soit, présente un bon compromis entre les impératifs anatomiques et physiologiques de l'instrumentiste et un jeu potentiellement varié. La surface de l'épiphyse supérieure de la première phalange est en effet divisée par une dépression centrale dont le prolongement sur la face supérieure forme un canal qui facilite le positionnement correct des lèvres de l'instrumentiste et donne un confort de jeu en favorisant l'orientation du jet d'air vers l'arête du trou (l'air contenu dans la phalange est excité par l'insufflation d'un filet d'air qui oscille sur le bord du trou servant de biseau).

La plus basse fréquence de résonance d'un volume ouvert sur l'extérieur par un trou résulte de la compression périodique de l'air qui y est contenu : cette résonance ne faisant pas intervenir de propagation d'onde interne est connue sous le nom de résonance de Helmholtz. Des résonances associées à la propagation

d'ondes longitudinales dans la cavité allongée apparaissent à des fréquences plus élevées : ce sont les modes de résonance de l'embryon de tuyau que constitue la phalange. À fréquence encore plus élevée, une résonance transversale apparaît. La position des lèvres et la pression du souffle déterminent quelle résonance est excitée préférentiellement et permettent d'en moduler la fréquence : par exemple, celle-ci diminue lorsque l'on approche les lèvres du trou. On peut aussi souffler latéralement à la phalange, comme dans une flûte traversière, ou par le nez.

En soufflant dans des phalanges archéologiques ou dans des répliques, on produit des sons variés en hauteur, en intensité et en modes de jeu : sifflement continu, roulements, modulations... L'écart entre les sons obtenus avoisinent parfois l'octave.

L'analyse des sons fait apparaître deux composantes principales : la composante purement harmonique et le bruit de souffle, associé à la turbulence. Ce bruit à large bande est modulé par les diverses résonances



2. CETTE FLÛTE EN OS (à droite, vue sous trois côtés ; la longueur réelle est de 21 centimètres), découverte à Isturitz, dans les Pyrénées-Atlantiques, a été fabriquée par Cro-Magnon au Périgordien, environ 25 000 ans avant notre ère, dans un os de vautour. Quatre trous ovalaires ont été percés par raclage de l'os à l'outil de silex. Leurs bords sont polis par un long usage. L'instrument porte aussi un décor finement incisé. L'os n'a pas été utilisé sur toute sa longueur (en pointillés). Le calcul de l'admittance d'entrée (rapport entre le débit et la pression, qui montre les résonances et les antirésonances successives de l'instrument) pour les différents doigtés révèle que la longueur de la flûte a été ajustée pour que le premier régime tous trous ouverts (premier pic de la courbe violette) corresponde à la même note que le second régime tous trous fermés (second pic de la courbe rouge). Cette continuité mélodique, que l'on retrouve sur les instruments actuels, témoigne d'une tradition élaborée de facture des instruments de musique au Paléolithique.



Les rhombes

Au cours du Solutréen, environ 19 000 ans avant notre ère en Europe occidentale et un peu plus tôt en Europe centrale, apparaît un instrument à air, à son de sillage : le rhombe. Il est connu en Australie, en Afrique noire ou chez les Indiens d'Amérique du Sud, où il est un instrument sacré et secret exprimant la voix des esprits et des ancêtres.

Un rhombe est un objet allongé et à silhouette de feuille, mince et relativement léger, percé d'un trou. Au Paléolithique, il est en bois de renne ou en ivoire de mammouth. On passe un lien dans le trou, et on imprime à l'objet un double mouvement de rotation, sur lui-même et autour de l'expérimentateur. De cette double rotation naît le vrombissement caractéristique. Une épaisseur qui dépasserait environ le quart de la largeur empêcherait la rotation de l'objet autour de son axe longitudinal.

Le mouvement de giration autour de l'homme ne peut être uniforme, en raison du moment d'inertie du bras lors du geste : l'accélération est plus forte quand le rhombe est à gauche, puis derrière l'opérateur si celui-ci est droitier. Cela



se traduit, à chaque tour, par une montée en fréquence suivie d'une descente correspondant à la décélération. Les grands rhombes ont une voix plus grave que les petits ; si la vitesse de rotation augmente, la fréquence croît.

Une des pièces les plus significatives est le rhombe d'environ 10 000 ans avant notre ère, de la grotte de la Roche, à Lalinde, en Dordogne (voir la figure). Trop fragile pour être utilisée, la pièce originale a été reproduite en bois de renne par l'un d'entre nous (M. Dauvois), y compris la décoration géométrique gravée et l'ocrage. Expérimenté en plein air et en grotte, ce rhombe donne un son de sillage dont l'analyse en fréquence, en amplitude et en temps est proche de celle des sons produits par les instruments étudiés par les ethnologues.

La fréquence fondamentale du son évolue de 35 à 205 hertz lors d'un tour complet, tandis que le bruit de sillage est compris entre 1 600 et 25 000 hertz. En outre, chaque rotation du rhombe sur lui-même s'accompagne d'un bref claquement sur tout le spectre.

acoustiques de la phalange ; ainsi, à une fréquence légèrement inférieure à celle du premier mode longitudinal apparaît une antirésonance de la phalange sifflante : aucun son n'est émis à cette fréquence. En raison des dimensions des phalanges de renne, les sons fondamentaux émis se situent toujours entre 1 800 et 3 600 hertz, dans la bande de plus grande sensibilité de l'oreille (les secondes phalanges, environ un tiers plus courtes que les premières, émettent les sons les plus aigus).

Quelles sont les possibilités de cet instrument ? Les sons très élevés qu'il produit émergent violemment sur l'ensemble des sons naturels et humains. Ils peuvent constituer des signaux de communication lors de chasses en groupe. William Pruitt, de l'Université de Manitoba, a par ailleurs observé l'étrange réaction de hardes de rennes au signal sonore émis avec une phalange moderne ou avec une phalange indienne du début

du siècle, au bord d'un lac en forêt finlandaise. À la curiosité a succédé un comportement de confiance : les rennes se sont couchés sur la neige ou sur la glace à la suite de coups de sifflet prolongés et espacés les uns des autres de plusieurs minutes.

Les flûtes en os

Après avoir utilisé les propriétés des phalanges sifflantes, les hommes préhistoriques ont fabriqué des flûtes. Les premières furent peut-être des tubes de roseau ou d'autres végétaux, mais seules les flûtes en os ont été conservées dans les sites archéologiques. L'os le plus rectiligne, le plus régulièrement creux, de section quasi circulaire, est le cubitus des grands rapaces diurnes adultes, du vautour en particulier. En Europe occidentale, Cro-Magnon a donc le plus souvent choisi cet os pour ses flûtes, le sectionnant et y perceant des trous, et ce dès le début du Paléolithique supérieur (il y a environ 35 000 ans).

Le gisement de la grotte d'Isturitz, dans les Pyrénées-Atlantiques, a fourni la plus grande concentration connue de flûtes, dans une succession de couches stratigraphiques s'étendant de l'Aurignacien ancien au Magdalénien, soit environ de 35 000 à 10 000 ans avant notre ère. Les seules couches du Périgordien (de 27 000 à 20 000 ans avant notre ère) en ont livré plus des deux tiers. Avec des pièces de ce gisement, conservées au Musée des Antiquités nationales, Dominique Buisson a remonté une flûte droite presque complète.

Nous nous sommes intéressés à la facture de cet instrument. D'abord, l'élargissement tronconique de l'extrémité proche de l'articulation avec l'humérus forme une sorte de pavillon qui participe au rayonnement acoustique du son à la sortie de l'instrument ; l'embouchure se situe de l'autre côté, dans la partie la plus circulaire de l'os. Par ailleurs, le cubitus n'a pas été utilisé sur toute sa longueur. Quels critères ont guidé le choix de la position de l'embouchure et de celles des trous ? L'instrument original étant trop fragile pour être joué, nous avons procédé à une simulation numérique, en calculant la propagation du son, les pertes acoustiques internes, le rayonnement à partir des trous et de l'embouchure, et la couverture de cette dernière par les lèvres de l'instrumentiste, estimée expérimentalement avec un instrument de dimensions voisines.

Lorsque l'on souffle dans une flûte, la fréquence de la note produite est la fréquence fondamentale de résonance de la colonne d'air contenue dans le tube, ouvert aux deux extrémités. En soufflant plus fort, ou en embouchant différemment l'instrument, on peut émettre une note à une fréquence voisine du double de la fréquence fondamentale : on joue l'instrument sur son second régime, environ une octave au-dessus du premier. Dans le cas présent, un troisième régime ne peut être atteint qu'occasionnellement. Quand on perce un trou dont le diamètre est du même ordre que la section du tube, tout se passe comme si l'on coupait la flûte à l'endroit du trou. Ainsi, en débouchant successivement les trous, on obtient des notes de plus en plus aiguës (correspondant aux fréquences de résonance d'un tube de plus en plus court).

La simulation numérique révèle que la hauteur du son obtenu lorsque tous les trous de l'instrument ont été débouchés est proche de celle obtenue tous trous bouchés lorsque l'on joue sur le second régime (donc environ une octave au-dessus de la note la plus grave). Ainsi, du point de vue des hauteurs, le second régime prend directement la suite du premier, comme pour les instruments modernes (voir la figure 2).

Une seconde simulation, effectuée en prenant en compte la totalité du cubitus *a priori* utilisable, prouve que, dans ce cas, les tessitures des deux régimes ne se rejoignent plus. Le facteur de cette flûte a donc délibérément coupé l'os pour obtenir la continuité mélodique de l'instrument. Pourquoi l'aurait-il fait, sinon pour faciliter le jeu de mélodies? La facture des flûtes est déjà bien maîtrisée dans cette région pyrénéenne durant le Paléolithique supérieur : les flûtes droites ont peu changé depuis.

Une autre flûte d'Isturitz, à laquelle manque l'embouchure, présente aussi quatre trous. La distance entre le premier trou et la sorte de pavillon correspondant à l'élargissement naturel plus ou moins tronconique de la partie proximale du cubitus est plus grande que sur l'exemplaire quasi complet. La partie tubulaire utilisable entre le dernier trou et l'extrémité du côté de l'embouchure était *a priori* d'une dizaine de centimètres de long. La simulation numérique nous révèle que, pour que les deux régimes s'enchaînent parfaitement, l'os a été probablement tronqué à 6,2 centimètres du centre du dernier trou.

À Isturitz, Cro-Magnon a ajusté la longueur de ses flûtes et la position des trous. Il a aussi adapté la perce des trous aux irrégularités internes du tube osseux. Sur la flûte la plus complète, les trous sont plus ou moins ovales : ils ont été obtenus par un raclage à l'outil de silex, qui engendre des bords aigus. La cuvette qui en résulte permet à l'instrumentiste de varier l'obturation des trous en glissant les doigts, et donc de moduler les fréquences produites.

D'autres fragments de flûtes présentent des trous plus petits et dont l'espacement est très différent de ce que montre l'exemplaire le plus complet. Ces trous, régularisés par rotation d'un outil en pierre, sont de courtes cheminées coniques ou à section arrondie. À partir du Périgordien, certains fragments présentent des trous arrière parfois très éloignés des autres : s'agit-il de trous de registre, dont l'ouverture favorise l'émission du registre supérieur? Cette variété indique une facture très diversifiée. On trouve enfin, par exemple dans le Magdalénien du Roc de Marcamps, en Gironde, des tubes osseux très courts et munis d'une fenêtre et d'une embouchure rappelant celle des flûtes à bec : ce seraient des embouchures adaptables à un instrument végétal ou, pour certains, plus courts, de simples sifflets.

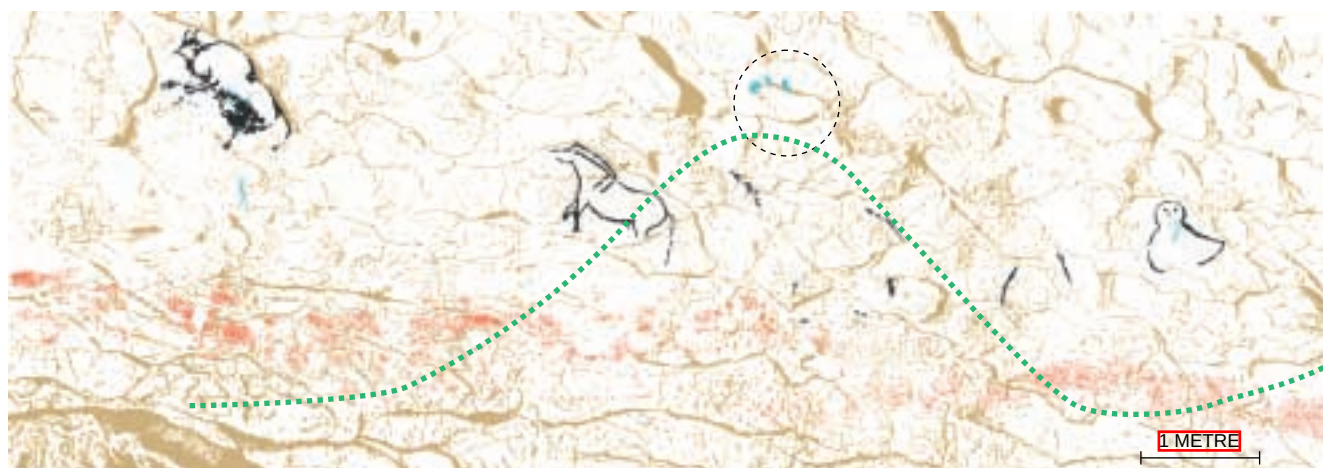
Le son dans les grottes

Nos ancêtres du Paléolithique ont laissé de nombreuses traces de leur passage dans des grottes, lieux naturellement résonnants et qui abritent

des structures de calcite sonores à la percussion. La coïncidence de résonances, caractérisées par nos mesures, avec des marques préhistoriques témoignent qu'ils ont aussi remarqué et utilisé l'acoustique particulière de ces lieux : ils ont en quelque sorte usé des grottes comme d'instruments sonores.

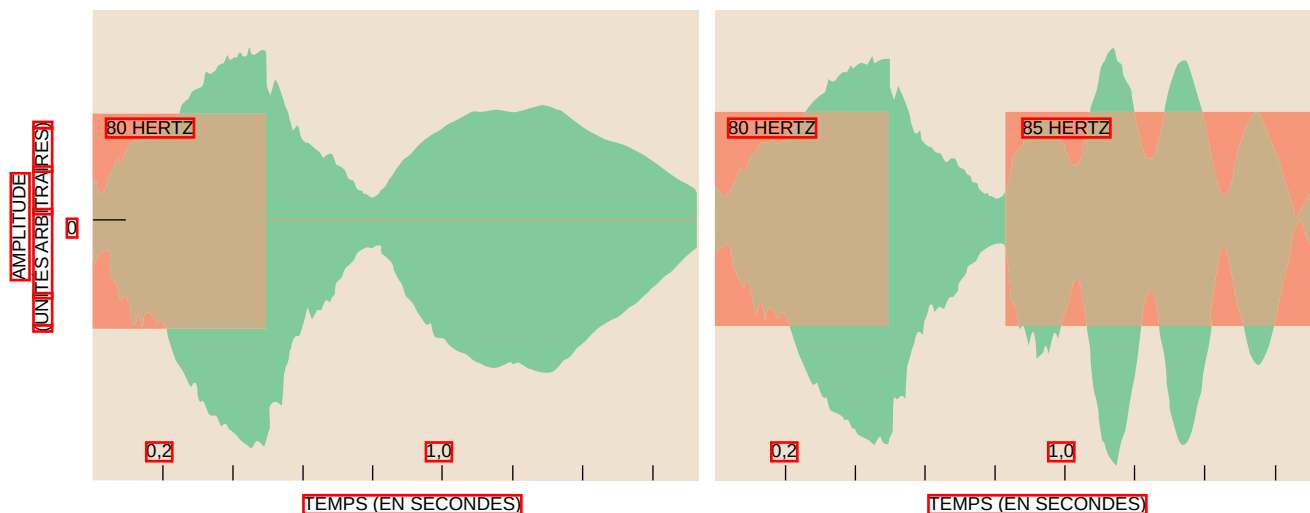
En grotte, où le bruit de fond est extrêmement faible, on perçoit aisément le moindre son. À partir d'emplacements particuliers, la voix chantée ou la simple parole engendrent des phénomènes de résonance, font «sonner la galerie». Afin de caractériser objectivement ces phénomènes acoustiques, nous avons mesuré systématiquement les réponses aux émissions d'une source sonore de spectre uniforme entre 50 et 300 hertz, couvrant les fréquences fondamentales de la voix masculine et le domaine de résonance des galeries.

La mesure du son reçu au point d'émission caractérise en partie ce qu'un locuteur ou un chanteur entend de sa propre voix. Nous avons aussi cartographié le transfert acoustique entre deux points, en séparant l'émetteur du récepteur. Ce faisant, nous avons placé le haut-parleur et le microphone en tenant compte de la position imposée à l'homme par la morphologie du lieu : ici debout, là baissé, ailleurs accroupi. Nos mesures n'ont bien entendu de sens que si le volume de la galerie est resté inchangé depuis sa fréquentation par Cro-Magnon et si elles sont référencées rigoureusement au plan de la grotte. Ces études paléoa-



3. LA PAROI NORD DE LA GALERIE JEANNEL, dans la grotte du Portel, en Ariège, est ornée de plusieurs dessins noirs et de traits gravés (en bleu). Un maximum de résonance à 95 hertz (courbe verte) correspond au centre de la zone décorée, juste devant une excroissance rocheuse qui forme une tête de félin naturelle (dans le cercle

en pointillés) et qui est rehaussée de pseudo-griffures gravées. En face, sur la paroi Sud, ce maximum de résonance coïncide avec le centre d'un balcon ocre dominant d'un mètre le panneau décoré. Les traces rouges sur le bas de la paroi ont probablement été laissées par le frottement d'individus adossés enduits d'ocre.



4. LA SIMULATION ACOUSTIQUE explique le phénomène de «dialogue» perçu sous deux fortes ponctuations rouges, dans la galerie Régnault de la grotte du Portel, en Ariège. Lorsqu'on émet brièvement un signal à 80 hertz (en rouge, signal envoyé par le haut-parleur), deux résonances aux fréquences proches de cette valeur sont excitées dans la galerie et un battement lent est pro-

duit (à gauche, en vert, signal reçu par le microphone). Lorsqu'on superpose à ce battement lent une nouvelle émission à une fréquence de 85 hertz, le son perçu est alors modulé beaucoup plus rapidement (à droite) : la «réponse» de la galerie est déformée par le nouveau signal et en fonction de celui-ci. Cette légère variation de fréquence est produite naturellement par la voix humaine.

coustiques requièrent donc une sauvegarde absolue de l'espace des cavernes. Les grottes Cosquer et Chauvet, dernièrement découvertes, entrent désormais dans cette perspective.

Les grottes sont constituées de galeries, de salles plus ou moins vastes, d'étroits boyaux, de niches. Comme tout lieu fermé, la galerie d'une grotte présente des caractéristiques acoustiques communes à tout son volume (durée d'extinction des sons, fréquence de résonance) et d'autres spécifiques de l'endroit où l'on se place (amplitude de la résonance). Si une niche possède une fréquence de résonance propre, on détecte cette fréquence dans toute la galerie, mais avec une amplitude plus grande dans ou près de la niche. Lorsqu'une galerie a des parois parallèles, verticales ou non, une résonance apparaît, plus ou moins marquée suivant la configuration de la paroi, à une longueur d'onde double de la largeur du couloir.

Comment savoir si les hommes préhistoriques qui sont venus en ces lieux ont perçu ou utilisé les phénomènes acoustiques que nous détectons ? La correspondance entre des lieux de plus forte résonance acoustique naturelle et des emplacements choisis par les préhistoriques pour peindre, dessiner ou graver figures et signes en est un indice.

De nombreuses peintures ou gravures occupent, bien sûr, des lieux parfaitement muets et, à l'inverse, des lieux

résonnants n'offrent aucune figure. Les singularités de paroi servent souvent de cadre à l'intégration de la figure : un dessin devient relief grâce à l'arrondi d'une fissure ou à une excroissance rocheuse. Nous avons toutefois repéré des associations entre résonances et parois ornées qui ne semblent pas fortuites. Ainsi, dans la grotte du Portel, en Ariège, l'extrémité Ouest de la galerie Jeannel offre un panneau comprenant de droite à gauche une chouette, divers signes, un félin, un cheval, un bison (voir la figure 3). Le maximum de résonance, à 95 hertz, se situe au centre du panneau, juste devant la tête du félin naturel. À droite comme à gauche, c'est-à-dire face à la chouette et au bison, l'amplitude de la résonance maximale, à la même fréquence, est nettement plus faible.

La galerie qui répond

La partie étroite de la galerie Régnault de la même grotte est le siège d'une autre correspondance, entre un phénomène acoustique remarquable et deux ponctuations rouges situées au plafond. Lorsque, placé à croupetons sous ces points, en raison de l'exiguïté des lieux, on y parle (la voix se calant sur la résonance de la galerie), on a l'impression d'engager un curieux dialogue avec la galerie : le son semble revenir, mais transformé.

Nos mesures acoustiques expliquent le phénomène, que nous avons reproduit (voir la figure 4). En cet

endroit, on observe quatre fréquences de résonance très voisines (80, 81, 83, 84 hertz). En envoyant un premier son d'une demi-seconde centré sur 80 hertz, on excite les résonances à 80 et 81 hertz. Le son résultant à la fréquence moyenne des résonances excitées et s'atténue en battant très lentement : son amplitude enfle, puis décroît, puis augmente à nouveau au bout d'une seconde environ, donnant l'impression d'un écho qui serait à la fois très intense et très distant. Puis, pendant la réception de ce pseudo-écho, on émet un son centré sur la fréquence de 85 hertz : les deux sons se mélangent. La différence de fréquence provoque un autre battement, plus rapide (cinq fois par seconde).

Une émission vocale, chantée ou parlée, à une fréquence proche de 80 hertz possède un spectre large de quelques hertz et excite donc plusieurs résonances de la galerie. Si la voix continue à émettre à une hauteur légèrement différente pendant la réception du pseudo-écho, sur le plan perceptif, tout se passe comme si celui-ci était transformé par le nouveau son, d'où la sensation impressionnante de «dialogue», de «réponse variable» de la galerie. La légère variation de la fréquence d'émission, dont le locuteur n'a pas forcément conscience en raison de la fluctuation naturelle de la hauteur de la voix, est à l'origine du phénomène.

Une autre galerie de la même grotte, le Boyau, offre un autre exemple d'association entre des ponctuations sur

ses parois et un phénomène acoustique. Une résonance à la fréquence de 88 hertz est plus ou moins présente dans tout le Boyau. De plus, on observe un transfert acoustique remarquable entre deux niches (nommons-les A et B), séparées par un passage assez bas et invisibles l'une de l'autre (voir la figure 5). Lorsque l'on émet, dans la niche A, une fréquence de 88 hertz, la résonance est maximale au fond de la niche B, jusqu'à une limite horizontale et verticale marquée par de petites ponctuations rouges faites par Cro-Magnon sur les parois, environ à mi-hauteur, ce qui coïncide avec le geste naturel d'étendre le bras dans la station accroupie obligatoire dans cette niche. Réciproquement, la résonance dans la niche A, lorsque l'on émet de la niche B, est maximale entre le fond et une limite marquée à l'entrée par des ponctuations rouges plus étendues et presque au ras du plafond. Ces points, de taille modeste, ont au moins ici une signification précise. Peut-être n'ont-ils jamais eu que celle-là.

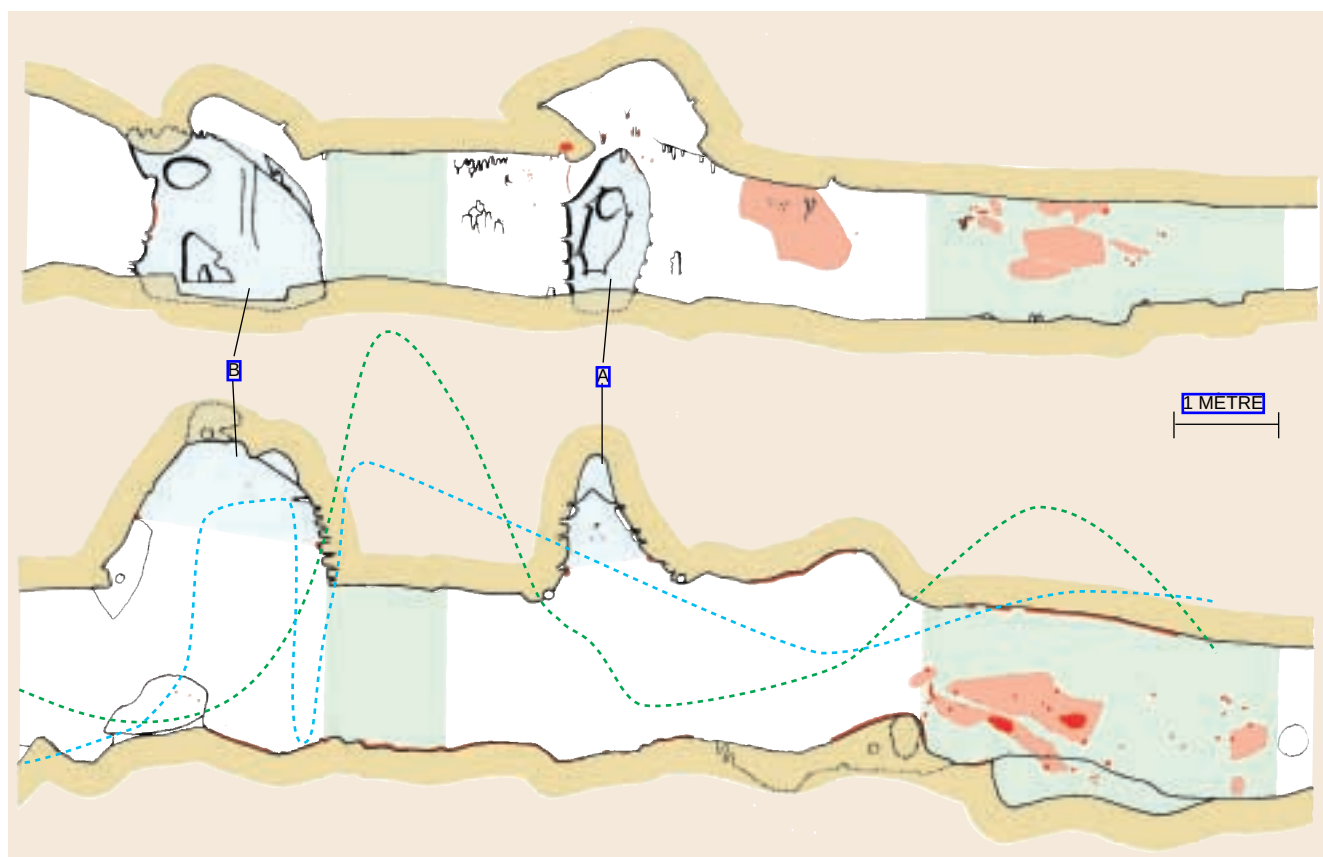
Des instruments naturels

Outre leurs qualités de résonateurs, les grottes abritent des instruments de musique naturels : les formations de calcite qui recouvrent certaines parois ont parfois des formes de colonnes et de draperies, dont certaines émettent du son lorsqu'on les frappe. Ce sont des lithophones naturels, dont la sonorité, suivant la nature de la calcite, est curieusement proche de celle des xylophones, des marimbas ou, quand elle est plus cristalline, rappelle celle des instruments composés de lames de pierres sonores que l'on trouve au Néolithique au Vietnam ou au XIX^e siècle en Grande-Bretagne.

Des lithophones que nous avons enregistrés dans diverses grottes françaises présentent de belles qualités acoustiques (hauteur sonore nettement définie, longue durée de résonance), qui les distinguent nettement des autres bruits d'origine naturelle ou humaine. Les caractéristiques

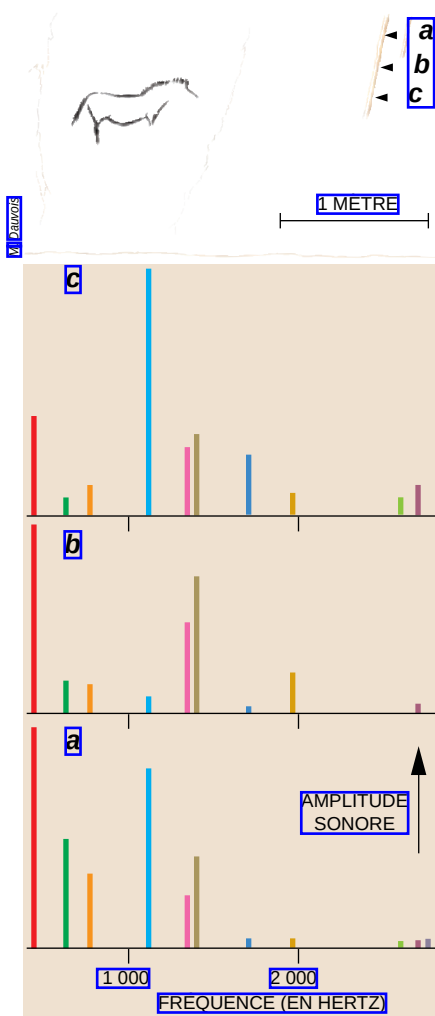
acoustiques d'un lithophone sont les mêmes que celles des instruments à percussion en général : une superposition de plusieurs partiels (sons élémentaires ne comprenant qu'une seule fréquence) de fréquences plus ou moins espacées et ayant chacun sa propre durée d'extinction. Lorsqu'un partiel sonne longtemps et domine les autres, l'auditeur perçoit une hauteur correspondant à la fréquence de ce partiel. Deux partiels forts peuvent sonner comme un accord musical. Lorsque tous les partiels sont très brefs, indistincts, une «hauteur brute» est néanmoins perçue : différente de la hauteur d'une note, cette sensation est définissable sur une échelle plus grossière, comprenant approximativement trois échelons par octave.

Selon l'endroit où l'on frappe un lithophone, le son émis peut varier notablement : tel ou tel partiel est privilégié, donnant ainsi la possibilité d'émettre deux hauteurs bien différentes sur la même structure. C'est ce



5. DES ZONES DE RÉSONANCE ACOUSTIQUE sont indiquées par des marques à l'ocre (en rouge) laissées par Cro-Magnon dans le Boyau de la grotte du Portel, en Ariège (en haut, vue en élévation ; en bas, vue en plan). Dans les niches A et B, les zones de transfert acoustique maximal (en bleu ; la courbe bleue montre l'intensité perçue d'un son émis de la niche A à la fréquence de 88

hertz) sont limités par des ponctuations rouges. Dans la galerie, des ponctuations marquent parfois aussi la limite des zones de résonance maximale (en vert ; la courbe en vert indique l'amplitude du son perçu à la fréquence de résonance maximale). Les plages rouges plus claires correspondent à des traces d'ocre laissées par frottement des corps sur les parois et sur le plafond.



que l'on entend dans la Salle des peintures du réseau Clastres, en Ariège, et que l'analyse spectrale met particulièrement bien en évidence (voir la figure 6).

Dans la grotte du Portel, on pourrait qualifier les concrétions d'«instrument lithophonique», composé de plusieurs ensembles de draperies et de colonnes. Certaines draperies sont entaillées dans leur partie la plus sonore par des chocs répétés, et certaines de ces cassures ont reçu un discret marquage ocré, dont l'ancienneté est attestée par le fin voile de calcite qui les recouvre. Il en est de même à la grotte de Cougnac, dans le Lot.

Des traits gravés peuvent également marquer les draperies sonores, comme par exemple dans la galerie latérale de la grotte de Font-de-Gaume, en Dordogne. Enfin, ces instruments naturels sont presque toujours associés à des figures. C'est au réseau Clastres que cette association est la plus singulière : un cheval et un mustélide sont dessinés dans le



6. DES DRAPERIES DE CALCITE forment des lithophones naturels dans les grottes : elles résonnent quand on les frappe. celui de la Salle des peintures du réseau Clastres, en Ariège, près duquel Cro-Magnon a dessiné un cheval (à gauche, en haut), comprend deux draperies de calcite qui émettent des sons différents selon le point de frappe. L'émission des mêmes fréquences avec des intensités différentes (graphe pour la draperie de gauche) fait fortement varier la note perçue. Il permet donc de jouer des mélodies. Dans la grotte du Portel, en Ariège (à droite), des draperies sont entaillées dans leurs parties les plus sonores par les coups portés par Cro-Magnon (flèches vertes). La finesse du voile de calcite qui recouvre ces entailles et la griffade d'ours (flèche blanche) prouve que la morphologie du lieu n'a pas varié depuis plus de 100 000 ans, époque à laquelle ont disparu les ours des cavernes (ou de Deniger) qui ont laissé cette empreinte.

voisinage immédiat de deux petites draperies particulièrement sonores, sur une paroi gigantesque où il n'y a par ailleurs aucun autre témoin paléolithique. Une association de même ordre existe à la grotte des Fieux, dans le Lot, où le lithophone est proche d'un bloc gravé de bouquetins et d'abondantes cupules.

Notre appareil auditif est identique à celui de Cro-Magnon, mais la manière dont nous identifions et interprétons les sons, dont nous leur

donnons ou non une importance, un caractère remarquable, est avant tout liée à nos traditions et à nos apprentissages : nous ne rejouerons jamais la musique des peintres de Lascaux. Mais nous avons fait un grand pas dans la connaissance de cette période : comme ce fut le cas plus tard dans d'autres cultures, leurs compétences acoustiques, tant en grotte que dans la facture des flûtes, se sont certainement développées à partir de la pratique musicale.

Michel DAUVOIS est préhistorien à l'Institut de paléontologie humaine, MNHN, CNRS. Xavier BOUTILLON, Benoît FABRE, Marc-Pierre VERGE sont acousticiens au Laboratoire d'acoustique musicale de l'Université Paris 6 et du CNRS.

I. REZNIKOFF et M. DAUVOIS, *La dimension sonore des grottes ornées*, in *Bulletin de la Société préhistorique française*, 1988.

M. DAUVOIS, *Son et musique paléolithiques*, in *Les dossiers d'archéologie*, n° 142, 1989.

M. DAUVOIS et X. BOUTILLON, *Études acoustiques au réseau Clastres, Salle des peintures et lithophones naturels*, in *Préhistoire ariégeoise*, t. XLV, 1990.

D. BUISSON, *Les flûtes paléolithiques d'Isurutz (Pyrénées-Atlantiques)*, in *Bulletin de la Société préhistorique française*, 1990.

M. DAUVOIS, *Les témoins sonores paléolithiques, extérieur et souterrain*. «Sons originels», *préhistoire de la musique*, in *Études et recherches archéologiques de l'Université de Liège*, n° 61, 1994.

M. DAUVOIS et X. BOUTILLON, *Caractérisation acoustique des grottes ornées paléolithiques et de leurs lithophones naturels*, La pluridisciplinarité en archéologie musicale, 4^e Rencontre internationale d'archéologie musicale de l'ICTM, Saint-Germain-en-Laye, 1990, éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, vol. 1, 1994.

Le nuage de Oort

PAUL WEISSMAN

Aux confins du Système solaire, des comètes formant un vaste nuage sont attirées presque autant par le Soleil que par les autres étoiles. Les astronomes étudient la dynamique de ce nuage afin de comprendre l'origine du Système solaire.

Le Système solaire ne s'arrête pas à l'orbite de Pluton : l'influence gravitationnelle du Soleil s'exerce aussi sur des corps 3 000 fois plus éloignés, à mi-chemin des étoiles les plus proches. Là, un gigantesque réservoir de comètes a échappé au regroupement qui constitua le Système solaire : c'est le nuage de Oort.

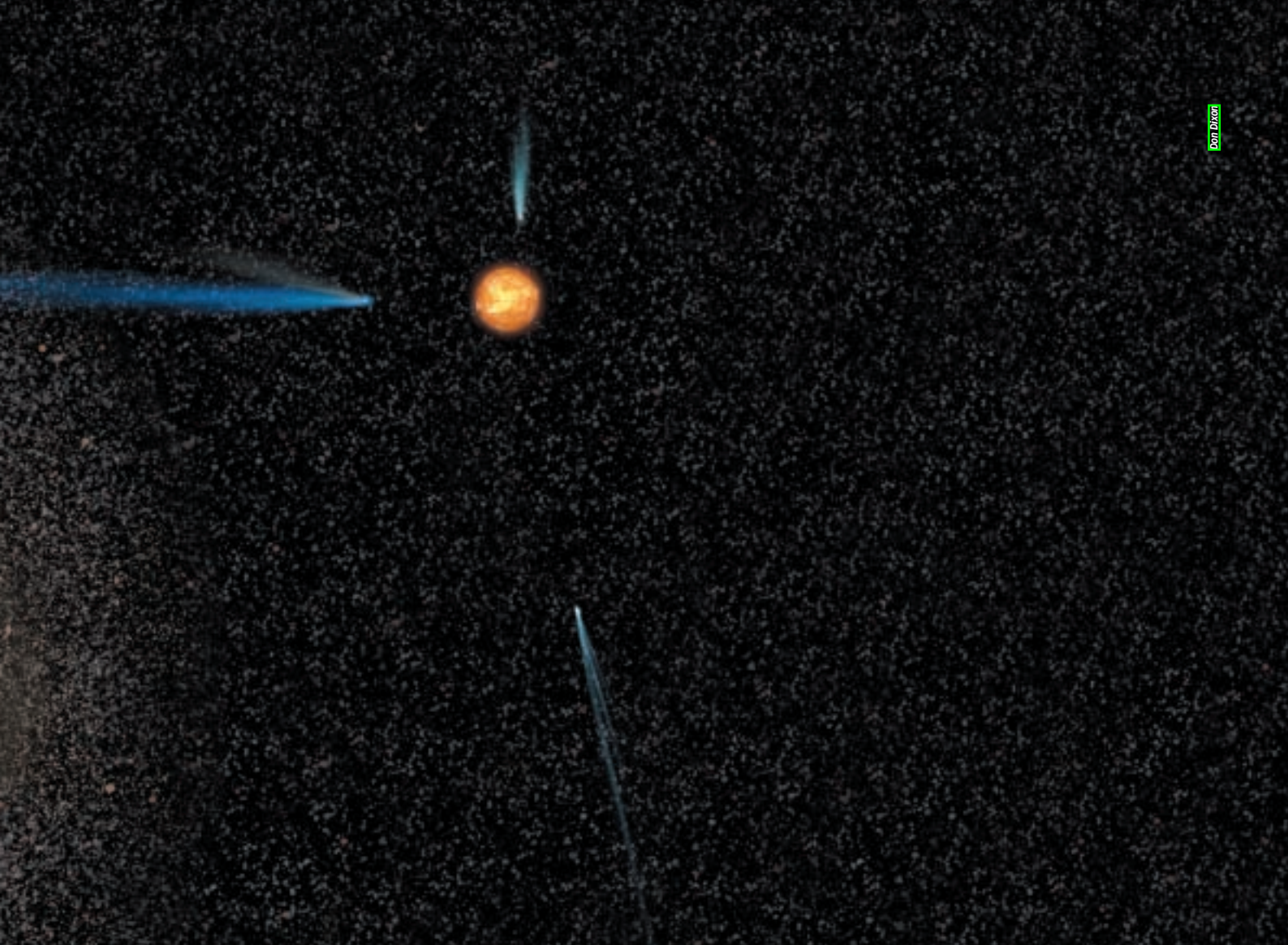
Ce nuage est la « Sibérie du Système solaire », une vaste région frontalière froide, peuplée par les exilées de l'em-

pire solaire du milieu et marginalement sous la domination de l'autorité centrale. Les températures diurnes atteignent à peine quatre kelvins (-269°C), et plusieurs dizaines de millions de kilomètres séparent les comètes les unes des autres. Dans ces régions, le Soleil, bien qu'il reste l'étoile la plus brillante du ciel, n'illumine guère plus que Vénus dans notre ciel nocturne.

Les astronomes n'ont jamais « vu » le nuage de Oort, pas plus que les phy-

siciens n'ont vu un électron : on déduit l'existence et les propriétés du nuage de Oort tout comme on détermine les propriétés de l'électron, d'après leurs effets physiques. Dans le cas du nuage de Oort, ces effets sont un train constant de comètes à période longue, qui traversent le système planétaire.

Au IV^e siècle avant notre ère, Aristote considérait les comètes comme des nuages de gaz lumineux, dans la haute atmosphère terrestre. Puis, au



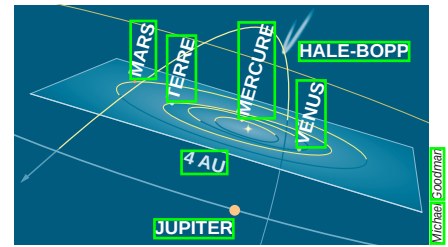
1. L'ÉTOILE GLIESE 710 (à droite) traversera le nuage de Oort dans 1,4 million d'années. Elle déviara alors des comètes qui dorment à grande distance du Soleil, réveillant certaines d'entre elles et les catapultant vers les planètes du Système solaire. De tels événements, résultant de petits mouvements stellaires dans notre Galaxie, se produisent en moyenne tous les millions d'années. Dans cette vue d'artiste, l'étoile paraît plus grosse que le Soleil, car elle est située plus près de l'observateur ; les comètes lointaines ne sont pas à l'échelle.

1^{er} siècle de notre ère, le philosophe romain Sénèque supposa que les comètes étaient des corps célestes qui se déplacent sur leurs propres trajectoires dans le firmament. Quinze siècles s'écoulèrent avant que son hypothèse ne soit confirmée par l'astronome danois Tycho Brahe, qui compara les observations de la comète de 1577 effectuées en plusieurs points de l'Europe. Si la comète avait été très proche de nous, sa position aurait

légèrement varié par rapport aux étoiles, selon le lieu d'observation. Tycho Brahe ne détecta aucune variation de la position de la comète et il en conclut que la comète se trouvait au-delà de la Lune.

La distance réelle des comètes ne fut établie que lorsqu'on connut leurs orbites. En 1705, l'astronome anglais Edmond Halley dressa le premier catalogue de 24 comètes. En se fondant sur les observations imprécises de son

temps, Halley ne put ajuster que des paraboles approximatives à chaque trajectoire de comète. Néanmoins, il remarqua que les orbites pouvaient être des ellipses très allongées autour du Soleil : «Ainsi leur nombre serait limité et, peut-être, pas très élevé. De surcroît, l'espace entre le Soleil et les étoiles fixes est si considérable qu'une comète aurait assez de place pour tourner autour du Soleil, avec une très longue période de révolution.»



2. LA COMÈTE HALE-BOPP (à gauche), qui passa près de la Terre en mars 1997, est une comète à longue période. Sa visite précédente dans le Système solaire interne date de 4 200 ans ; en raison de l'influence gravitationnelle de Jupiter, elle réapparaîtra dans 2 600 ans. Entre-temps, elle partira jusqu'à 370 fois la distance de la Terre au Soleil. Comme la plupart des comètes à longue période, la comète Hale-Bopp a une orbite très inclinée par rapport à l'orbite terrestre (ci-dessus).

Cette description de comètes circulant sur des orbites qui s'étendent entre les étoiles anticipait la découverte du nuage de Oort, deux siècles et demi plus tard. Halley observa également que les comètes de 1531, 1607 et 1682 avaient des orbites très semblables et des passages espacés d'environ 76 ans : ces comètes, apparemment différentes, n'étaient-elles pas une seule et même comète qui revenait à intervalles réguliers ? L'objet en question est effectivement unique : c'est la comète de Halley, qui a visité la région des planètes intérieures en 1986.

Depuis l'époque de Halley, les astronomes ont divisé les comètes en deux catégories selon leur période de révolution autour du Soleil (ou, ce qui revient au même, selon leur distance moyenne par rapport au Soleil). Les comètes à longue période, comme les comètes brillantes récentes Hyakutake et Hale-Bopp, ont des périodes orbitales supérieures à 200 ans ; les comètes à courte période sont celles dont les périodes sont inférieures à 200 ans. Au cours de la dernière décennie, les astronomes ont encore subdivisé les comètes à courte période en deux sous-groupes : les comètes de la famille de Jupiter, telles que les comètes Encke et Tempel 2, dont les périodes sont inférieures à 20 ans, et les comètes à période intermédiaire, comme celle de Halley, dont les périodes sont comprises entre 20 et 200 ans.

Ces définitions semblent arbitraires, mais elles traduisent des différences réelles : les comètes à longue période et à période intermédiaire arrivent dans la région planétaire aléatoirement de toutes les directions, tandis que les

comètes joviennes (de la famille de Jupiter) ont des orbites dont le plan est proche de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre, qui est aussi celui des autres planètes, à quelques degrés près). Les comètes à périodes longue et intermédiaire émaneraient du nuage de Oort, tandis que les comètes joviennes proviendraient de la ceinture de Kuiper, une région de l'écliptique au-delà de l'orbite de Neptune (voir *La ceinture de Kuiper*, par Jane Luu et David Jewitt, *Pour la Science*, juillet 1996).

Les régions infernales au-delà de Pluton

À l'aube du XX^e siècle, on connaissait suffisamment d'orbites de comètes à période longue pour en étudier la distribution statistique (voir la figure 6). Un problème surgit. Un tiers de toutes les orbites « osculatrices » – c'est-à-dire les orbites qu'elles suivraient si elles étaient soumises uniquement à l'attraction du Soleil – semblent hyperboliques. Or, les orbites hyperboliques ne sont pas périodiques : elles viennent de l'espace interstellaire et y repartent, contrairement aux orbites elliptiques, qui sont fermées et périodiques. Cette observation fit penser à certains astronomes que les comètes étaient soustraites à l'espace interstellaire par des rencontres avec les planètes du Système solaire.

Afin de tester cette hypothèse, les astronomes remontèrent le temps : ils extrapolèrent les orbites des comètes à longue période vers le passé et trouvèrent qu'en raison de l'influence gravitationnelle des planètes les orbites osculatrices n'étaient pas les orbites originelles des comètes (voir la figure 3).

Quand on prend en compte les effets des planètes suffisamment loin dans le passé et en considérant que le foyer des orbites est le centre de gravité du Système solaire (légèrement décalé par rapport au Soleil), presque toutes les orbites deviennent elliptiques. Les comètes, loin d'être des vagabonds interstellaires, sont liées au Système solaire.

De surcroît, même si l'énergie de deux tiers des orbites semblait distribuée uniformément, l'énergie orbitale d'un tiers des orbites était étroitement concentrée (l'énergie orbitale est inversement proportionnelle au demi-grand axe de l'orbite). Cette accumulation correspond à des orbites qui s'étendent très loin du Soleil, jusqu'à au moins 20 000 unités astronomiques (l'unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres environ). Les périodes de ces orbites sont supérieures à un million d'années.

Pourquoi tant de comètes provenaient-elles de si loin ? Vers la fin des années 1940, l'astronome hollandais Adrianus van Woerkom montra que la répartition uniforme de leurs orbites s'expliquait par des perturbations planétaires qui dispersent aléatoirement les comètes sur des orbites plus grandes et plus petites. Comment expliquer alors la proportion supérieure de comètes ayant une période voisine de un million d'années ?

En 1950, ce problème intéressa l'astronome hollandais Jan Oort, déjà célèbre pour avoir détecté, 30 ans plus tôt, la rotation de notre Galaxie. Il remarqua que les comètes à longue période sont initialement les comètes de périodes voisines de un million d'années ; elles

forment un nuage sphérique, autour du système planétaire, qui s'étend à mi-chemin des étoiles les plus proches.

Oort montra que les comètes de ce nuage sont si faiblement liées au Soleil que des étoiles qui passent à proximité modifient aléatoirement leurs orbites. Une dizaine d'étoiles passent à moins de quatre années-lumière du Soleil tous les millions d'années (l'année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an, soit 63 240 unités astronomiques). Ces approches sont suffisantes pour perturber les orbites cométaires, pour modifier aléatoirement leur inclinaison par rapport à l'écliptique et pour envoyer un flot constant de comètes dans le Système solaire interne sur des orbites très elliptiques (voir la figure 1). En entrant dans le système planétaire pour la première fois, les comètes sont déviées par les planètes, de sorte qu'elles gagnent ou perdent de l'énergie orbitale. Certaines s'échappent du Système solaire, d'autres deviennent des comètes périodiques qui composent la distribution uniforme. Pour Oort, le nuage qui porte aujourd'hui son nom est «un jardin doucement ratissé par les perturbations stellaires.»

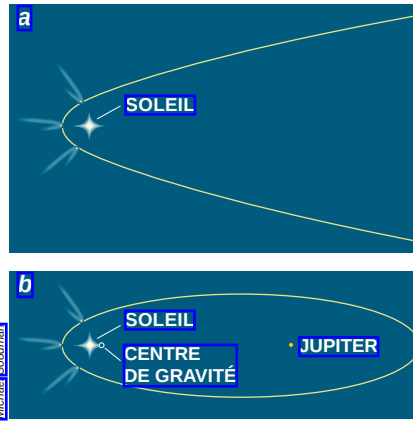
À l'issue de ses calculs, Oort observa que quelques comètes pouvaient provenir de l'espace interstellaire, mais il supposa que ces exceptions n'en étaient pas réellement : leurs orbites différaient, parce qu'elles étaient trop imprécisément connues ou que leur mouvement était perturbé par l'éjection de gaz et de poussières, quand les comètes approchaient du Soleil. Ces forces non gravitationnelles peuvent donner l'impression que les orbites sont hyperboliques, alors qu'elles sont en réalité elliptiques.

Secouées, pas remuées

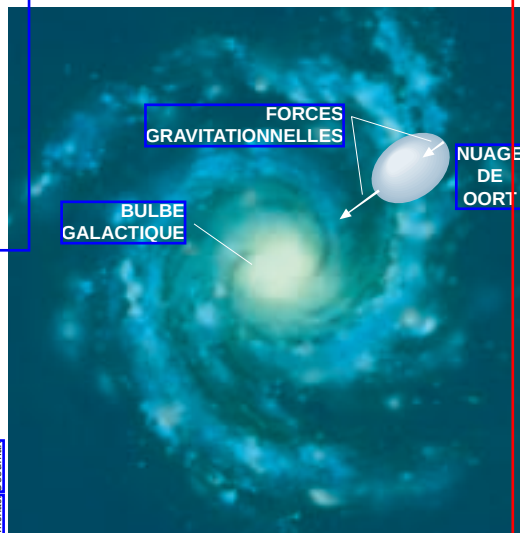
La perspicacité de Oort était remarquable : non seulement ces idées étaient exactes, mais il les obtint alors qu'il ne disposait que de 19 orbites bien mesurées. Aujourd'hui, les astronomes ont 15 fois plus de données. Ils savent que les comètes à longue période qui arrivent dans la région planétaire pour la première fois proviennent d'une distance moyenne de 44 000 unités astronomiques. Ces orbites ont une période moyenne de 3,3 millions d'années.

Les astronomes ont également compris que les perturbations stel-

lares sont parfois très vigoureuses : certaines étoiles passent si près du Soleil qu'elles traversent le nuage de Oort, perturbant violemment les orbites cométaires. En moyenne, une étoile passe à moins de 10 000 unités astronomiques du Soleil tous les 36 millions d'années, et à moins de 3 000 unités



3. LES COMÈTES À LONGUE PÉRIODE sont si faiblement liées au Soleil que les planètes perturbent considérablement leur mouvement. En général, les astronomes ne voient les comètes que lorsqu'elles passent près du Soleil. Lorsqu'ils calculent leur trajectoire, ils ont souvent l'impression que les comètes décrivent une trajectoire hyperbolique, ouverte (a). Un calcul plus précis, qui tient compte des planètes (en particulier de Jupiter, la planète la plus massive), montre que les orbites sont en réalité elliptiques (b). L'orbite change de forme à chaque passage dans le Système solaire interne.



4. DES FORCES DE MARÉE déforment le nuage de Oort. Ces forces résultent d'une décroissance de la force de gravitation avec la distance. Le bulbe central de notre Galaxie – une concentration d'étoiles au centre de la structure spirale de la Voie lactée – tire plus sur le côté proche du nuage de Oort (il n'est pas à l'échelle sur ce schéma) que sur le côté éloigné. Le plan galactique exerce une force similaire dans une direction différente. Les marées galactiques sont analogues aux marées océaniques, dues à la Lune, qui attire plus le côté de la Terre le plus proche d'elle que le côté opposé.

astronomiques tous les 400 millions d'années. Les comètes proches de la trajectoire de l'étoile sont éjectées dans l'espace interstellaire, et les comètes qui restent dans le nuage sont puissamment perturbées.

Bien que les rencontres avec des étoiles n'aient pas d'effets directs sur les planètes – la distance la plus proche entre le Soleil et une étoile, au cours de toute l'histoire du Système solaire, est estimée à 900 unités astronomiques –, elles pourraient avoir des conséquences indirectes dévastatrices. En 1981, Jack Hills, du Laboratoire de Los Alamos, a calculé que le passage d'une étoile à proximité du Système solaire aurait pu causer des extinctions d'espèces sur la Terre, en déclenchant une «pluie» de comètes. En 1985, j'ai repris ce problème avec mon collègue Piet Hut. Selon nos simulations numériques, la fréquence des passages cométaires, durant une pluie cométaire, serait 300 fois supérieure à la normale. Les pluies cométaires dureraient deux à trois millions d'années.

Récemment Kenneth Farley et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont retrouvé des indices d'une telle pluie cométaire. En utilisant l'hélium 3 comme traceur de la matière extraterrestre, ils ont analysé l'accumulation de poussières interplanétaires dans les sédiments océaniques au cours

du temps. Cette accumulation reflète le nombre de comètes qui traversent la région planétaire, car chaque comète perd de la poussière sur son chemin. K. Farley a découvert que la fréquence des passages cométaires s'est brusquement accrue à la fin de l'Éocène, il y a 36 millions d'années, et a diminué lentement pendant deux ou trois millions d'années, conformément aux prédictions des modèles de pluies cométaires. La fin de l'Éocène correspond à une extinction biologique modérée, et plusieurs cratères d'impact ont été datés de cette époque. Les géologues ont également trouvé d'autres traces d'impacts dans les sédiments terrestres, comme des couches d'iridium et des microtectites (des roches terrestres fondues et dispersées par l'impact des comètes).

La Terre est-elle menacée par une averse de comètes ? Apparemment, non. Avec des collègues, nous avons utilisé les positions et les vitesses des étoiles, mesurées

par le satellite *Hipparcos* pour déterminer les trajectoires des étoiles dans le voisinage du Système solaire. Nous avons ainsi calculé qu'une étoile est passée près du Soleil au cours du dernier million d'années. Le prochain passage proche d'une étoile se produira dans 1,4 million d'années : la petite

étoile Gliese 710 traversera le nuage de Oort, à environ 70 000 unités astronomiques du Soleil. À cette distance, Gliese 710 pourrait augmenter de 50 pour cent la fréquence des passages cométaires dans le Système solaire interne : il y aura quelques gouttes de pluie, mais pas une averse.

Toutefois, les passages d'étoiles à proximité du Soleil ne sont pas les seules perturbations du nuage de Oort. D'une part, le nuage est suffisamment grand pour qu'il ressente les forces de marée engendrées par le disque de la Voie Lactée et, dans une moindre mesure, par le bulbe galactique. Ces

Comètes et nébuleuse solaire

Les comètes, composées à 80 pour cent d'eau, contiennent des molécules très volatiles comme le monoxyde de carbone (CO) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S). Elles n'ont pu se condenser qu'à des températures très basses, au plus quelques dizaines de degrés au-dessus du zéro absolu ($-273,15^\circ C$). Les astronomes se demandent si elles ont piégé intacts les grains du nuage protosolaire ou si leur matière a perdu la mémoire de ses origines interstellaires en subissant des transformations profondes dans la nébuleuse solaire, suite à son échauffement. Ces deux hypothèses extrêmes prédisent des compositions différentes et se réfèrent à des schémas de formation du Système solaire différents.

La proportion du deutérium (D), l'un des isotopes de l'hydrogène, fournit des indices sur l'origine des glaces cométaires. L'eau deutérée (HDO) a été découverte pour la première fois dans la comète de Halley, à l'aide de la sonde *Giotto*. Elle a été directement détectée à partir du sol dans les deux comètes brillantes qui ont illuminé notre ciel en 1996 et 1997 : la comète Hyakutake, qui est passé à seulement 15 millions de kilomètres de la Terre en mars 1996, et l'exceptionnelle comète Hale-Bopp, dont l'activité fut dix fois supérieure à celle de la comète de Halley, en mars et en avril 1997. La quantité de deutérium par rapport à l'hydrogène dans l'eau cométaire est dix fois supérieure à celle de l'hydrogène moléculaire (H_2) de la nébuleuse solaire. Un tel enrichissement s'explique par une chimie interstellaire à basse température. Des enrichissements similaires sont d'ailleurs observés dans le milieu interstellaire. Les modèles chimiques prédisent alors des enrichissements supérieurs dans l'acide cyanhydrique HCN. C'est ce qui est effectivement observé dans Hale-Bopp : des observations dans le domaine radio ont permis la détection de l'acide cyanhydrique deutéré DCN.

Les analogies entre la composition des glaces cométaires et celle des glaces interstellaires plaident également pour la première hypothèse. Les grains interstellaires dans les régions de formation d'étoiles sont constitués d'un cœur de silicates recouvert d'un manteau de glaces et de composés organiques plus ou moins volatils. Le télescope spatial infrarouge ISO, de l'Agence spatiale européenne, identifie une dizaine de composés simples dans les glaces interstellaires, comme l'eau, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthane et le méthanol, dont les proportions par rapport à l'eau sont analogues aux proportions mesurées dans les comètes.

Par ailleurs, plus d'une dizaine de nouvelles molécules, la plupart organiques, ont été découvertes dans

les atmosphères cométaires par des observations dans le domaine radio et infrarouge et, au total, une vingtaine de molécules sont maintenant identifiées dans les comètes. À cette liste, il convient d'ajouter une trentaine d'atomes, de radicaux ou d'ions. La plupart des molécules proviennent des glaces du noyau cométaire chauffé par le Soleil.

La proportion de ces molécules par rapport à l'eau, le composant majoritaire des comètes, varie entre quelques dix millièmes et quelques pour cent. Ces molécules, dont certaines comprennent jusqu'à huit atomes, sont observées en quantité dans la phase gazeuse de certaines régions chaudes du milieu interstellaire à proximité des étoiles jeunes ou en formation, où les glaces présentes dans les grains ont été relâchées dans le milieu ambiant. À l'exception de quelques molécules soufrées, qui sont sujettes à une chimie complexe dans le milieu interstellaire, la composition gazeuse des comètes et celle des régions chaudes du milieu interstellaire sont très similaires.

La composition des grains de poussières des atmosphères cométaires, la phase réfractaire du noyau (dont la température de sublimation est bien supérieure à celle de la phase volatile), est moins bien connue. Les mesures *in situ* des sondes *Giotto* et *Vega* ont révélé deux grandes catégories de grains dans la comète de Halley : des grains organiques, dénommés CHON, très riches en carbone, hydrogène, oxygène et azote, et des grains minéraux constitués de silicates et de métaux. Cette double structure s'apparente à celle des grains interstellaires.

Les grains CHON contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques, abondants dans le milieu interstellaire. Toutefois, la nature des silicates cométaires, révélée récemment par le satellite ISO dans la comète Hale-Bopp, soulève des interrogations. Une fraction de ces silicates est constituée d'olivine cristalline, riche en magnésium, que l'on rencontre dans les volcans terrestres. Des silicates de même nature sont aussi observés dans les disques circumstellaires de certains systèmes planétaires en formation. Or, les silicates cristallins se forment à des températures supérieures à $1\ 000^\circ C$. Ainsi, les comètes auraient incorporé à la fois des matériaux synthétisés dans le milieu interstellaire froid, et d'autres provenant de la nébuleuse interne, plus chaude. Comment? Le mystère demeure.

Dominique BOCKELEE-MORVAN
Observatoire de Paris, Section de Meudon

marées se produisent, parce que le Soleil et une comète du nuage sont à des distances légèrement différentes du plan médian du disque ou du centre galactique. L'attraction gravitationnelle sur ces deux corps diffère donc légèrement, d'où l'effet de marée (voir la figure 4). Les marées contribuent à alimenter la région planétaire en nouvelles comètes à longue période.

D'autre part, des nuages moléculaires géants, dans la Galaxie, peuvent perturber le nuage de Oort. Ces nuages massifs d'hydrogène froid, les lieux de naissance des étoiles et des systèmes planétaires, sont 100 000 fois à un million de fois plus massifs que le Soleil. Lorsque le Système solaire s'approche d'un de ces nuages, les perturbations gravitationnelles arrachent des comètes à leurs orbites et les catapultent dans l'espace interstellaire. Ces rencontres sont peu fréquentes : environ une fois tous les 300 à 500 millions d'années. Au cours de l'histoire du Système solaire, l'effet cumulé des nuages moléculaires est équivalent à l'effet de tous les passages proches d'étoiles.

Un cœur dense

Trois grandes questions préoccupent aujourd'hui les astronomes qui étudient le nuage de Oort. D'abord, quelle est la structure du nuage ? En 1987, Scott Tremaine, à Princeton, Martin Duncan, à l'Ontario, et Thomas Quinn, à Washington, ont étudié comment des perturbations stellaires et des nuages moléculaires répartissent les comètes dans le nuage de Oort. En raison des perturbations, les comètes périphériques du nuage sont rapidement perdues, soit dans l'espace interstellaire, soit dans le Système solaire interne. Cependant, un cœur dense de comètes, au plus profond du nuage de Oort, semble alimenter lentement la zone périphérique du nuage.

Les astronomes ont également montré que, lorsque les comètes tombent du nuage de Oort dans le Système solaire interne, leurs inclinaisons orbitales sont conservées. C'est pourquoi les astronomes pensent aujourd'hui que c'est de la ceinture de Kuiper, et non du nuage de Oort, qu'émanent les comètes joviennes de faible inclinaison. Le nuage de Oort, lui, est la source la plus probable de comètes d'incli-

naison supérieure et de période intermédiaire, comme celles de Halley et de Swift-Tuttle. Elles furent sans doute jadis des comètes à longue période, que les planètes ont ramenées sur des orbites de période plus courte.

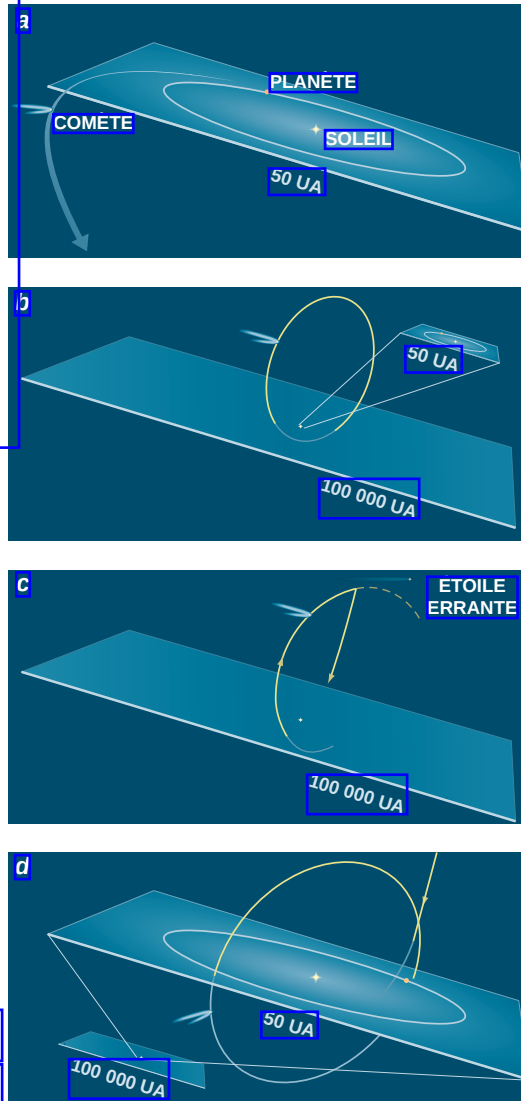
Deuxièmement, combien le nuage de Oort comprend-il de comètes ? Les astronomes fondent leurs estimations sur la fréquence à laquelle les comètes s'échappent vers le Système solaire interne. Pour expliquer le nombre observé de comètes à longue période,

ils supposent que le nuage contient six mille milliards de comètes, qui sont sans doute les corps célestes les plus nombreux du Système solaire. Seul un sixième de ces comètes est dans le nuage externe, dynamiquement actif, décrit initialement par Oort. Le reste occupe le cœur dense de ce nuage. Ainsi, en estimant la masse moyenne d'une comète à 40 milliards de tonnes, la masse totale de la matière cométaire dans le nuage de Oort serait 40 fois la masse de la Terre.

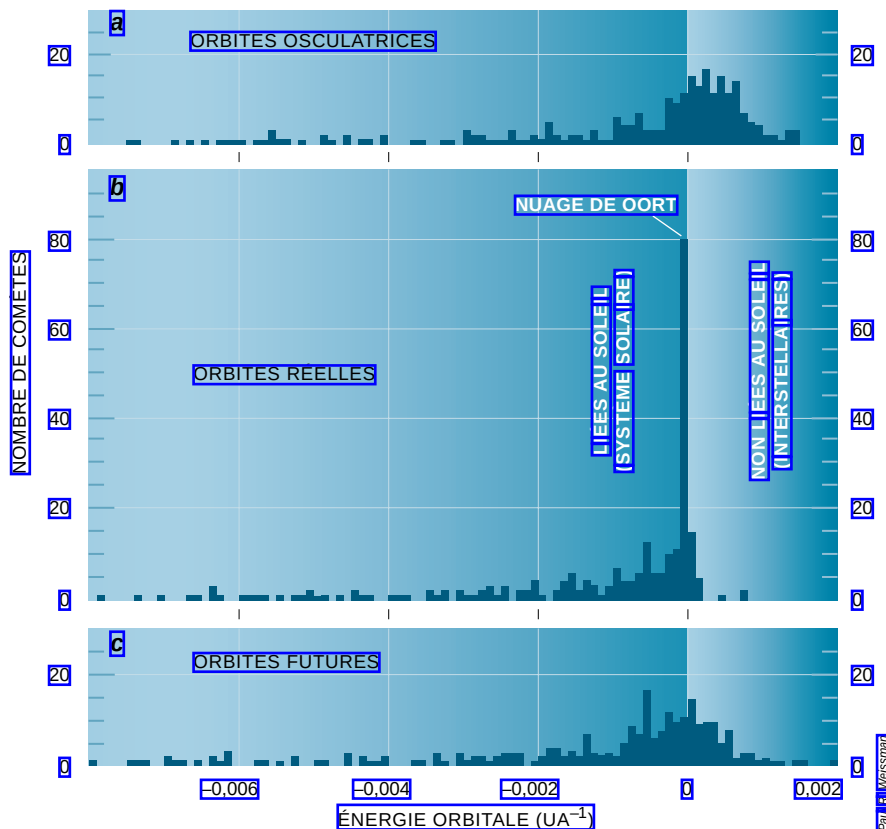
Troisièmement, d'où viennent les comètes du nuage de Oort ? Elles n'ont pas pu se former là où elles résident aujourd'hui, car, à ces distances, la matière est trop éparse pour se condenser. La capture de comètes par le Soleil n'étant pas un mécanisme très efficace, elles n'ont pu naître dans l'espace interstellaire. Le seul lieu de gestation possible est le système planétaire. Selon Oort, les comètes furent créées dans la ceinture des astéroïdes (entre les orbites de Mars et de Jupiter) et éjectées par les planètes géantes pendant la formation du Système solaire. Toutefois, les comètes sont des corps glacés, comme de grosses boules de neige sale, et la ceinture des astéroïdes était trop chaude pour que des glaces puissent se condenser.

En 1951, un an après la publication de l'article de Oort, Gerard Kuiper proposa que les comètes se condensent plus loin du Soleil, parmi les planètes géantes (la ceinture de Kuiper, située dans le plan de l'écliptique au-delà des planètes géantes, porte son nom, car il suggéra que certaines comètes se forment au-delà des orbites planétaires les plus lointaines). Les comètes naquirent probablement à travers toute la zone des planètes géantes, mais les astronomes supposèrent d'abord que les comètes proches de Jupiter et de Saturne, les deux planètes les plus massives, auraient été éjectées dans l'espace interstellaire plutôt que dans le nuage de Oort ; Uranus et Neptune, moins massives, auraient plus difficilement éjecté des comètes sur des trajectoires d'échappement.

Des études dynamiques plus récentes font douter de cette théorie : Jupiter et, surtout, Saturne



5. L'HISTOIRE D'UNE COMÈTE À LONGUE PÉRIODE commence avec sa formation près des planètes et son éjection par les planètes sur une orbite plus longue (a). Là, la comète est soumise aux forces gravitationnelles d'étoiles errantes et de nuages moléculaires géants, ainsi qu'aux forces de marée du disque et du bulbe galactiques. Ces forces inclinent aléatoirement le plan orbital de la comète et allongent progressivement son orbite (b). À une distance supérieure à 20 000 unités astronomiques (20 000 fois la distance Terre-Soleil), diverses influences extérieures renvoient parfois la comète vers les planètes (c). Dès que la comète revient dans le Système solaire interne, les planètes peuvent la guider sur une nouvelle orbite, de sorte qu'elle apparaît régulièrement (d).



6. L'ÉNERGIE ORBITALE des comètes à longue période connus révèle le nuage de Oort. Les astronomes calculent d'abord les orbites osculatrices des comètes, c'est-à-dire les orbites qu'elles suivraient si leurs mouvements étaient entièrement déterminés par l'attraction gravitationnelle du Soleil (l'énergie orbitale est inversement proportionnelle au demi-grand axe de l'orbite et s'exprime en inverse de l'unité astronomique, UA⁻¹). Un tiers de ces orbites a une énergie positive, associée à une orbite hyperbolique : les objets correspondants semblent avoir une origine interstellaire (a). Toutefois, quand on prend en compte l'influence des planètes, on calcule que l'énergie de la plupart des comètes est légèrement négative : les comètes ont une orbite elliptique et elles semblent provenir des confins du Système solaire (b). Quelques comètes conservent une énergie positive, après ces corrections, mais leur origine interstellaire apparente résulte probablement d'erreurs d'observation. Sous l'action conjointe des planètes et du Soleil, certaines comètes retournent vers le nuage de Oort, d'autres quittent le Système solaire et d'autres encore reviendront visiter le Système solaire interne (c).

envoient une proportion notable de leurs comètes dans le nuage de Oort. Bien que cette proportion soit peut-être inférieure à celle qui a été envoyée par Uranus et par Neptune, elle peut avoir été compensée par la quantité de matière supérieure initialement présente dans les zones des planètes plus massives.

Si les comètes du nuage de Oort ont été formées à des distances variées du Soleil, les températures de leur formation ont différé. Ainsi s'expliquerait en partie la diversité de composition observée parmi les comètes. En effet, des travaux récents ont indiqué que le nuage de Oort contient même des astéroïdes de la région des planètes intérieures. Ces objets, constitués de roches plutôt que de glaces, représenteraient deux à trois pour cent de la population totale du nuage de Oort.

Ces idées sont toutes fondées sur la présence des planètes géantes, qui catapultent les comètes vers l'extérieur et modifient leurs orbites lorsqu'elles reviennent dans la région planétaire. Si d'autres étoiles possèdent des planètes géantes, comme le suggèrent les observations de ces dernières années, elles ont peut-être également des nuages de Oort. Si ces étoiles et leur cortège de comètes passent près du Soleil, les nuages pourraient s'interpénétrer. Même ainsi, les collisions entre comètes seront rares, parce que la distance moyenne entre comètes est d'au moins une unité astronomique.

Les nuages de Oort autour des étoiles autres que le Soleil laissent peut-être échapper des comètes dans le milieu interstellaire. Des comètes interstellaires qui passeraient près du Soleil seraient facilement reconnaissables en

raison de leur vitesse bien supérieure à celle des comètes de notre nuage de Oort. Aucune comète interstellaire de ce type n'a encore été détectée, mais ce n'est guère surprenant : le Système solaire est une cible minuscule dans l'immensité de l'espace interstellaire, et la probabilité qu'une comète interstellaire soit passée dans le Système solaire interne au cours des derniers siècles est au mieux de un demi.

Le nuage de Oort continue à fasciner les astronomes. Grâce à la mécanique céleste, la nature a préservé dans ce lointain réservoir un échantillon du matériau qui a formé le Système solaire. En étudiant la dynamique de ce réservoir et la composition chimique des comètes qui en sortent, les astronomes comprennent mieux l'origine du Système solaire.

Plusieurs missions spatiales d'étude des comètes sont en préparation. La sonde *Stardust*, qui sera lancée l'an prochain, traversera la chevelure de la comète Wild 2, recueillera des échantillons de poussière cométaire et les rapportera sur Terre. Quelques années plus tard, l'engin *CONTOUR* survolera trois comètes et comparera leurs compositions. La mission *Deep Space 4/Champlion* enverra un orbiteur et un module d'atterrissage sur la comète Tempel 1, et la mission *Rosetta* fera de même pour la comète Wirtanen. Le prochain millénaire sera celui de l'étude des comètes.

Paul WEISSMAN est astronome au Laboratoire pour la propulsion spatiale (JPL), à Pasadena (Californie).

Donald K. YEOMANS, *Comets : A Chronological History of Observation, Science, Myth and Folklore*, John Wiley & Sons, 1991.

Comets in the Post-Halley Era, sous la direction de Ray L. Newburn, Jr., Marcia Neugebauer et Jürgen Rahe, Kluwer Academic Publishers, 1991.

Julio A. FERNANDEZ, *Dynamics of Comets : Recent Developments and New Challenges*, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993 : Proceedings of the 160th Symposium of the International Astronomical Union*, sous la direction de A. Milani, M. Di Martino et A. Cellino, Kluwer Academic Publishers, 1994.

Completing the Inventory of the Solar System, sous la direction de Terrence W. Rettig et Joseph M. Hahn, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 107, 1996.

a

FER

ZINC

b

La création de nouveaux éléments

PETER ARMBRUSTER • FRITZ PETER HESSBERGER

Au cours des dernières années, les physiciens ont créé trois nouveaux éléments : les éléments 110, 111 et 112. La quête des éléments 113 et 114 est en cours. Créera-t-on des éléments chimiques encore plus lourds ?

Les physiciens qui cherchent de nouveaux éléments chimiques doivent avoir une âme de joueur : quand ils projettent deux noyaux atomiques l'un contre l'autre, la probabilité qu'ils fusionneront est mince ! En outre, les produits résultants sont extrêmement fragiles et la plupart se fragmentent immédiatement. Exceptionnellement, un nouvel élément survit à la collision dans une configuration stable, l'état fondamental. Toutefois, il n'est alors présent qu'en quantités infimes : pour synthétiser l'élément 112, le plus lourd élément artificiel connu à ce jour, nous avons travaillé en continu pendant 24 jours. Au final, nous n'avons obtenu que deux noyaux de cet élément, qui subsistèrent quelques microsecondes.

Lorsque nous avons commencé la chasse à l'élément 113, au printemps dernier, nous attendions une production deux ou trois fois inférieure. Aussi avons-nous fait durer l'expérience pendant 42 jours. Nous n'avons rien trouvé. Avions-nous choisi un mauvais réglage de l'énergie des faisceaux ? La probabilité de formation

est-elle inférieure à celle que nous avions calculée ? L'élément 113 a-t-il des caractéristiques inhabituelles qui le rendent difficile à détecter avec notre appareillage ?

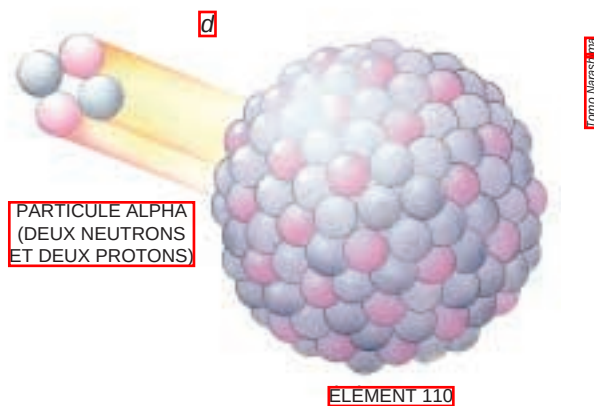
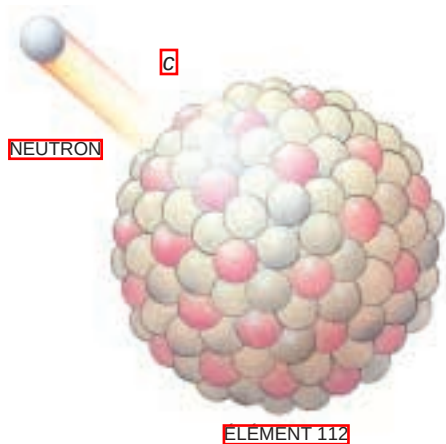
Malgré les difficultés de fabrication de nouveaux éléments ne subsistant que des fractions de seconde, ces questions nous ont poussés à poursuivre cette recherche. En 60 ans, les chercheurs ont produit 20 éléments artificiels au-delà de l'uranium. Combien en créeront-ils encore ?

Les éléments artificiels

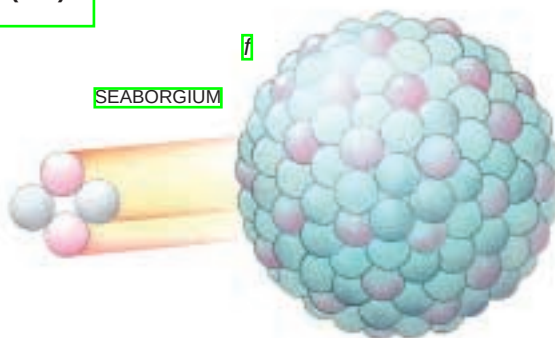
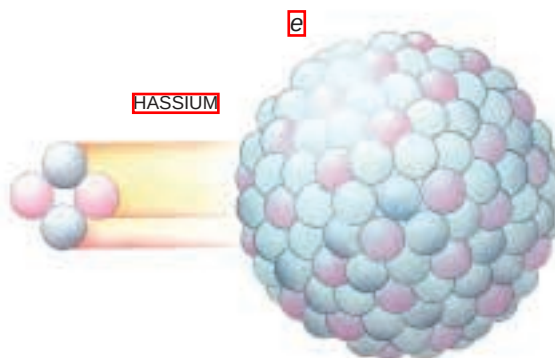
En 1936, Emilio Segrè, de l'Université de Palerme, reçut de son ami, Ernest Lawrence, une partie du cyclotron de Berkeley. Cette pièce de molybdène avait été irradiée, au cours de la vie du cyclotron, par des noyaux de deutérium (une forme lourde de l'hydrogène, avec un noyau composé d'un proton et d'un neutron). En analysant un échantillon de cette pièce, il découvrit le premier élément chimique artificiel, le technétium, l'élément de numéro atomique 43 (le numéro atomique est le nombre de protons dans le noyau atomique).

Segrè devait l'idée de son expérience à un autre physicien italien, Enrico Fermi. En 1934, Fermi avait prédit que l'on pourrait créer de nouveaux éléments en bombardant des atomes avec des neutrons : quand un neutron pénètre dans un noyau atomique, il est parfois capté, et le noyau résultant est soit stable, soit radioactif. Dans ce dernier cas, le neutron se désintègre en un proton, un électron et un antineutrino (une particule subatomique légère, sans charge électrique) : c'est la désintégration bêta. Ainsi, à chaque capture de neutron suivie d'une désintégration bêta, le nombre de protons dans le noyau augmente d'une unité : un élément de numéro atomique supérieur se forme.

Cette idée d'irradier les noyaux de divers éléments avec des neutrons fut reprise par d'autres groupes de recherche. En 1940, à l'Université de Berkeley, Edwin McMillan et Philip Abelson obtinrent l'élément inconnu suivant : par irradiation de neutrons dans le cyclotron du laboratoire, ils synthétisèrent l'élément 93 – le premier élément de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium. Cet élément 93 fut nommé



1. L'ÉLÉMENT 112 se forme lorsqu'un noyau de zinc percute un noyau de plomb avec une force suffisante pour compenser la répulsion électrique des deux noyaux chargés positivement (a). Ces derniers fusionnent (b) et forment un noyau très instable. Le noyau émet très rapidement un neutron, aboutissant à l'isotope 277 de l'élément 112 (c). Le nouvel élément subsiste plusieurs centaines de microsecondes, avant de se désintégrer plusieurs fois de suite, engendrant six éléments « fils » (d à i) : l'élément 110, le hassium (108), le seaborgium (106), le rutherfordium (104), le nobélium (102) et le fermium (100).

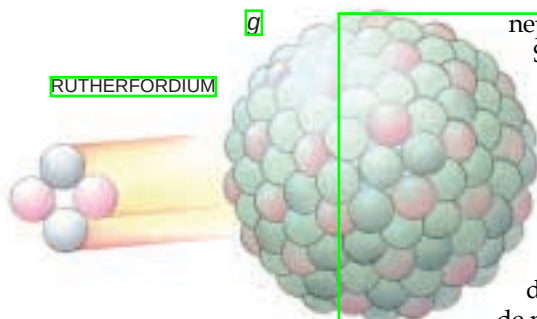


plus de quelques millièmes de milliardième de gramme de fermium (10^{10} atomes). La recette de Fermi ne procure pas d'éléments plus lourds que le fermium : au-delà, la désintégration bêta n'a pas lieu. Une nouvelle approche était nécessaire.

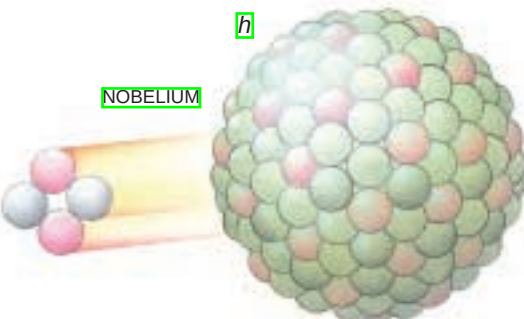
Rivalités internationales

Pouvait-on alors bombarder des éléments lourds avec des éléments légers ? La fusion d'un élément transurannique – du plutonium (94) à l'einsteinium (99) – avec un élément léger, comme le carbone (l'élément 6), l'azote (7) ou l'oxygène (8), conduirait-elle à la formation d'un atome plus lourd ? Cette méthode posa des difficultés pratiques qu'il fallut résoudre.

Pour réaliser ces expériences, les physiciens construisirent les premiers accélérateurs linéaires : ces appareils accélèrent des faisceaux d'ions à des énergies définies. En outre, l'utilisation d'éléments transuranniques requerrait un accès aux réacteurs nucléaires, l'apanage des deux grandes puissances de l'après-guerre. Durant la guerre froide, le Laboratoire américain Lawrence Berkeley, aux États-Unis, et l'Institut de recherche nucléaire de Dubna, en Union soviétique, rivalisaient non seulement scientifiquement, mais aussi politiquement.



neptunium, car, dans le Système solaire, Neptune est la première planète au-delà d'Uranus. Durant les années 1940 et 1950, Glenn Seaborg et ses collègues de Berkeley découvrirent une série de nouveaux éléments : le plutonium (de numéro atomique 94), l'américium (95), le curium (96), le berkélium (97), le californium (98), l'einsteinium (99) et le fermium (100). Chacun de ces huit éléments peut être synthétisé en quantités mesurables, suivant le mécanisme proposé par Fermi : capture d'un neutron suivie d'une désintégration bêta. Cependant, la quantité produite varie beaucoup selon les éléments : plus de 1 000 tonnes (10^{30} atomes) de plutonium ont été créées dans le monde, mais on n'a pas obtenu





2. UN TRAVAIL D'EQUIPE est nécessaire pour créer de nouveaux éléments. Les auteurs sont photographiés avec l'équipe qui a produit l'élément 112, l'élément artificiel le plus lourd synthétisé à ce jour. Peter Armbruster est le troisième à partir de la gauche dans la première rangée ; Fritz Peter Hessberger est dans la rangée du fond, à l'extrême gauche.

En 1955, le groupe de Berkeley obtint le mendelevium (101), par la fusion de l'hélium (2) et de l'einsteinium (99). Entre 1958 et 1974, les deux groupes créèrent le nobélium (102), le lawrencium (103), le rutherfordium (104), le dubnium (105) et le seaborgium (106). La rivalité était si âpre que les deux anciens camps débattaient encore de l'antériorité de la découverte de ces éléments, ainsi que de l'attribution de leurs noms. Les noms que nous utiliserons ici sont ceux qui ont été retenus par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (voir le tableau page 72).

Après la fabrication du seaborgium, les physiciens se heurtèrent à un nouvel obstacle : la technique standard de fusion ne produisait pas d'éléments plus lourds. À cette époque, en 1975, l'accélérateur d'ions lourds UNILAC (*Universal Linear Accelerator*, soit «accélérateur linéaire universel») fut mis en route à l'Institut de recherche sur les ions lourds (GSI), à Darmstadt. Enfin, les physiciens et les chimistes allemands pouvaient participer à cette entreprise jusqu'alors réservée aux Américains et aux Soviétiques.

Cette machine était la première capable d'accélérer tous les types d'ions

(un ion est un atome qui a gagné ou perdu des électrons), y compris l'uranium, à des énergies continues et réglables, offrant une immense flexibilité aux essais de fusion de deux noyaux. L'un de nos quatre objectifs principaux avec l'UNILAC était la production des éléments 107 à 114 au moins. Pourquoi viser l'élément 114? Selon les théoriciens, ses protons et ses neutrons devraient remplir complètement les couches du noyau, qui serait ainsi particulièrement stable.

En 1948, Otto Haxel, Hans Jensen et Hans Suess, de l'Université de Heidelberg, ainsi que Maria Goeppert-Mayer, du Laboratoire d'Argonne, observèrent des régularités intéressantes, selon le nombre de neutrons et de protons des noyaux atomiques : les noyaux composés d'un certain nombre de neutrons et de protons sont plus stables que d'autres. Cette stabilité ressemble à la stabilité chimique des atomes : autour du noyau, les électrons occupent des niveaux d'énergie successifs ; certains niveaux contiennent jusqu'à deux électrons, d'autres en contiennent jusqu'à huit, et d'autres jusqu'à 14. Les atomes les plus stables chimiquement sont ceux dont la couche électronique externe est pleine.

Reprenant cette idée du remplissage des couches électroniques, Goeppert-Mayer et Jensen mirent au point une théorie du noyau atomique en couches et expliquèrent combien de protons et de neutrons remplissaient les couches des noyaux. Cette découverte leur valut le prix Nobel de physique, en 1963.

Tous les atomes d'un élément chimique ont le même nombre de protons dans le noyau. Toutefois, pour chaque élément, différents isotopes existent, chacun comprenant un nombre particulier de neutrons dans le noyau. Certains isotopes sont plus stables que d'autres. C'est le cas du calcium 40 (20 protons et 20 neutrons), du calcium 48 (20 protons et 28 neutrons), et du plomb 208 (82 protons et 126 neutrons). Un isotope de l'élément 114, avec 114 protons et 184 neutrons, devrait aussi avoir une couche pleine. Les éléments dont le nombre de protons ou de neutrons est proche de ceux de ces éléments très stables sont sur un «îlot de stabilité», au milieu d'une mer de noyaux instables.

À l'ouverture de l'UNILAC, nous étions impatients de voir si nous atteindrions cet îlot de stabilité autour de l'élément 114. Initialement, les théoriciens avaient prédit que les éléments voisins de l'élément 114 auraient des périodes de l'ordre du milliard d'années, comparables aux périodes de certains éléments plus légers comme l'uranium et le thorium (la période, ou demi-vie, d'un isotope est le temps après lequel la moitié d'un nombre donné de noyaux se sont désintégrés). Nous pensions alors être capables de produire des quantités considérables d'éléments superlourds, fournissant ainsi aux chimistes de nouvelles substances à étudier et aux physiciens nucléaires de nouveaux atomes. La déconvenue fut grande : quelle que soit la combinaison de noyaux cibles et de noyaux projectiles, les collisions n'engendraient pas l'élément 114. De surcroît, les efforts supplémentaires pour trouver ces éléments dans les minerais, les météorites ou les rayons cosmiques n'aboutirent pas.

La fusion froide

À Dubna, Iouri Oganessian et Alexander Demin avaient obtenu l'élément 100 en bombardant une cible de plomb (l'élément 82) avec des ions d'argon (l'élément 18). I. Oganessian

constata que l'échauffement des noyaux formés était inférieur à celui qui apparaissait quand on bombardait des isotopes transuraniens très lourds avec des ions très légers. Cette idée fut à l'origine d'une nouvelle méthode de production d'éléments superlourds : l'énergie d'excitation des noyaux formés lors des collisions étant inférieure, un nombre supérieur de noyaux survivent à la fusion, parce que leurs nucléons (protons et neutrons) sont moins agités, donc mieux groupés.

Notre équipe s'intéressa à cette technique, que nous avons nommée «fusion froide» (cette fusion froide n'a rien à voir avec celle qui fit la une des journaux, il y a quelques années). Les chercheurs de Berkeley considérèrent la fusion froide comme une curiosité, mais, pour nous, elle présentait plusieurs avantages. D'une part, les matériaux de base, le plomb et le bismuth, étaient plus accessibles que les éléments produits par des réacteurs nucléaires. D'autre part, la configuration de l'UNILAC nous permettait d'utiliser tous les types d'ions comme projectiles et de faire varier leur énergie par paliers.

Nous avions aussi l'appareillage adéquat pour isoler et détecter les produits d'une réaction de fusion : notre collègue Gottfried Münzenberg avait construit un filtre, nommé séparateur des produits de réaction d'ions lourds (SHIP, pour *Separator for Heavy-Ion reaction Products*), qui écarte les projectiles et les produits résiduels de la réaction de fusion et concentre les produits recherchés sur un détecteur, où on les identifie par leurs produits de désintégration radioactive.

Au-delà de l'élément 107

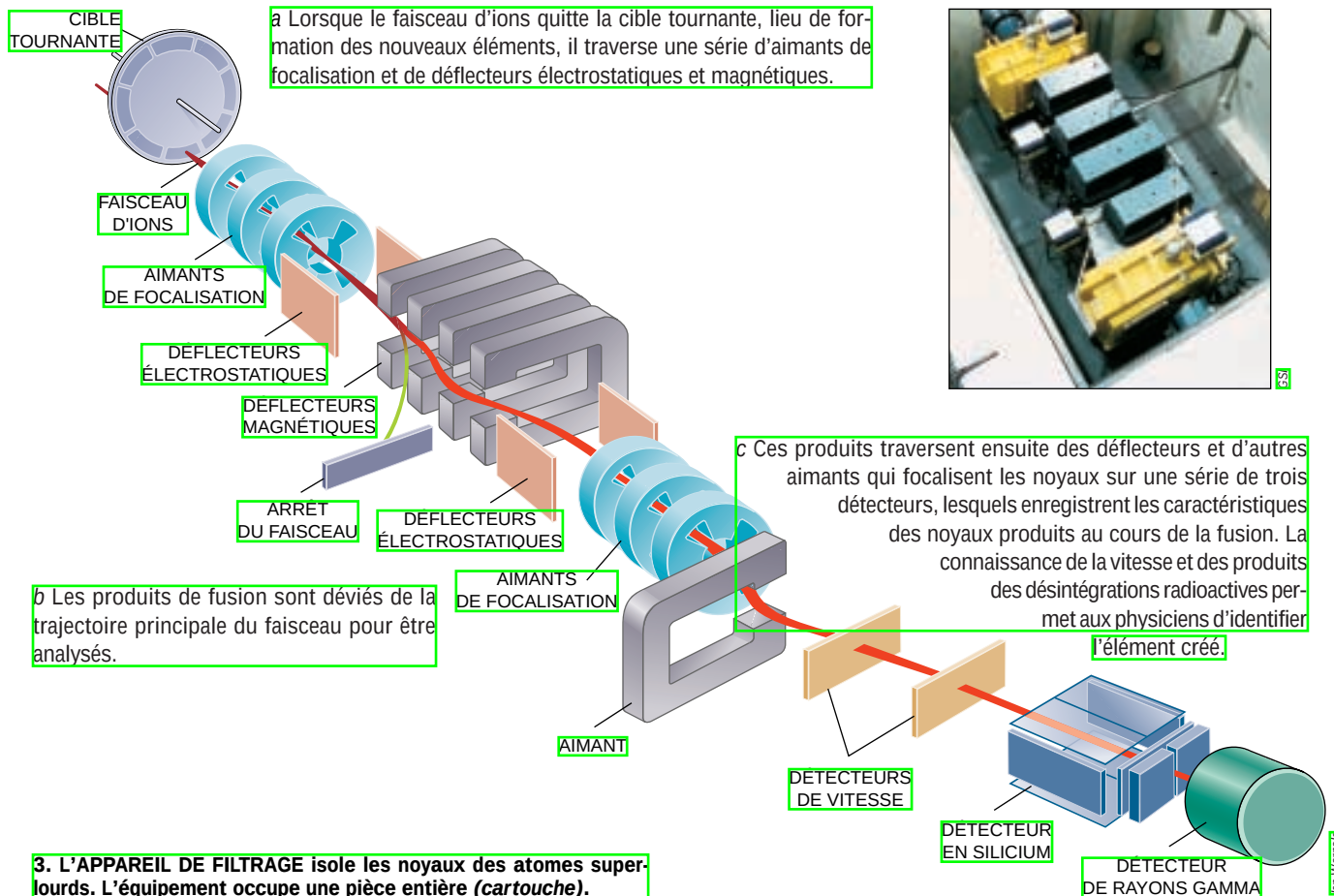
Au début des années 1980, nous avons démontré que la fusion froide fonctionnait : nous avons synthétisé et identifié le bohrium (l'élément 107), le hassium (108) et le meitnerium (109).

Après ce succès, nous avons compris que le franchissement de l'étape suivante nécessitait des améliorations de nos techniques expérimentales. Pour produire un seul atome de meitnerium, l'élément 109, par exemple, nous avons dû faire fonctionner l'accélérateur pendant deux semaines. De surcroît, à chaque création d'un

nouvel élément, la probabilité d'obtenir un nouveau noyau diminuait d'un facteur trois, ce qui compliquait sa détection.

Malgré ces difficultés, nous avons poursuivi les études de la fusion froide, tandis que les équipes de Berkeley et de Dubna étaient revenues à la méthode précédente, de «fusion chaude». En modifiant notre accélérateur linéaire, nous avons triplé l'intensité du faisceau d'ions et la sensibilité de l'appareil de filtrage, et construit des détecteurs de sensibilité accrue, essentiellement sous la houlette de Sigurd Hofmann.

Au redémarrage des expériences sur l'UNILAC, en 1993, nous avons testé notre nouvel appareillage avec des faisceaux d'argon 40 (à 18 protons et 22 neutrons) et de titane 50 (à 22 protons et 28 neutrons), qui avaient été utilisés pour créer divers isotopes du mendelevium et du rutherfordium. D'autres réglages permirent de calibrer l'énergie nécessaire à l'obtention de l'élément 110. Dans tous ces essais, les améliorations étaient patentées : l'intensité du faisceau et la sensibilité du détecteur étaient accrues.



Le 9 novembre 1994, après un arrêt de plus de dix ans, nous identifîâmes les produits de désintégration de l'élément 110, alors inconnu : par la fusion de plomb 208 (l'élément 82) avec du nickel 62 (l'élément 28), nous obtenions un nouveau noyau composé de 110 protons et de 160 neutrons. Ce noyau a rapidement émis un neutron, devenant l'isotope 269 de l'élément 110. Ce nouvel isotope avait une période de 170 microsecondes ; nous l'avons identifié grâce à sa désintégration en des éléments de plus en plus légers. Le noyau a d'abord émis une série de quatre particules alpha (composées de deux neutrons et de deux protons) et formé l'isotope 257 du rutherfordium (l'élément 104). Dans d'autres expériences, nous avons aussi créé l'isotope 271 de l'élément 110.

Un peu plus d'un mois plus tard, le 17 décembre 1994, date du 25^e anniversaire du GSI, nous avons découvert l'élément 111 après avoir irradié

du bismuth 209 avec du nickel 64. Cette expérience a corroboré la théorie des couches nucléaires : conformément à la théorie, deux des produits de désintégration de l'élément 111 (l'isotope 268 du meitnerium et l'isotope 264 du bohrium) se révélèrent plus stables que les isotopes plus légers de ces éléments observés auparavant.

Pour la série d'expériences suivantes, nous avons utilisé comme projectile le zinc 70, un élément riche en neutrons, espérant créer les éléments 112 et 113. Le 9 février 1996, nous avons synthétisé l'élément 112, l'élément le plus lourd jamais créé en laboratoire.

Le butin final était toutefois inférieur aux espérances initiales ; comme mentionné précédemment, nous avons fabriqué deux atomes en 24 jours. La période de l'élément 112 était de 240 microsecondes. Nous étions capables d'identifier l'isotope 277 de l'élément 112 en observant sa désintégration radioactive et en suivant l'émission

de six particules alpha successives pour aboutir au fermium 253 (voir les figures 1 et 2). Durant cette désintégration, nous avons identifié un nouvel isotope de l'élément 110 et un nouvel isotope du hassium (l'élément 108). L'isotope de l'élément 112 était le premier noyau que nous ayons créé avec plus de 162 neutrons, une quantité qui constitue une couche nucléaire déformée remplie. Ce facteur a contribué à la stabilité croissante de certains produits de la désintégration de l'élément : le hassium 269, produit lors de la désintégration de cet isotope de l'élément 112, a une période de 9,3 secondes, tandis que le hassium 265, qui avait été observé dans des expériences précédentes, a une période de 1,7 milliseconde seulement. Ces découvertes ont corroboré les prédictions des théoriciens : avec 162 neutrons, les couches du noyau seraient complètement remplies.

La création d'éléments super-lourds est le fruit d'une planification

Dénomination et politique

Les contestations sur l'antériorité de la découverte des éléments 102 à 109 eurent pour résultat une controverse internationale sur leurs dénominations. En 1994, l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) chargea la Commission sur la nomenclature en chimie inorganique (CNIC) d'établir les noms officiels de ces éléments

(beaucoup avaient été nommés de manière informelle par leurs découvreurs). Toutefois, la liste proposée par la Commission ne fit qu'envenimer le débat. En 1997, l'IUPAC sollicita l'avis des chimistes du monde entier et, en août, les noms définitifs furent adoptés. Les éléments 110 à 112 n'ont pas encore été officiellement nommés.

ELEMENT	DECOUVREUR(S)	NOMS PROPOSÉS (par)	NOM OFFICIEL (symbole chimique)
102	Revendication initiale : l'Institut Nobel à Stockholm, Suède Revendication ultérieure : l'Université de Berkeley ; l'Institut de recherche nucléaire, Dubna, Russie	Joliotium (Dubna) Nobelium (Institut Nobel, CNIC)	Nobelium (No) ; en l'honneur d'Alfred Nobel, inventeur suédois et fondateur des prix Nobel
103	Contesté ; les groupes de Dubna et de Berkeley revendiquent tous deux l'antériorité	Lawrencium (Berkeley, CNIC)	Lawrencium (Lr) ; en l'honneur d'Ernest Lawrence, inventeur du cyclotron
104	Contesté ; les groupes de Dubna et de Berkeley revendiquent tous deux l'antériorité	Dubnium (CNIC) Kurchatorium (Dubna) Rutherfordium (Berkeley)	Rutherfordium (Rf) ; en l'honneur du physicien né en Nouvelle-Zélande, Ernest Rutherford, dont le travail a été essentiel pour la compréhension du noyau
105	Contesté ; les groupes de Dubna et de Berkeley revendiquent tous deux l'antériorité	Hahnium (Berkeley) Joliotium (CNIC) Nielsbohrium (Dubna)	Dubnium (Db) ; en l'honneur du laboratoire de Dubna
106	Berkeley (non contesté)	Rutherfordium (CNIC) Seaborgium (Berkeley)	Seaborgium (Sg) ; en l'honneur de Glenn Seaborg, chimiste américain qui fut codécouvreur de 11 éléments artificiels
107	Institut de recherche sur les ions lourds (GSI), Darmstadt, Allemagne (non contesté)	Bohrium (CNIC) Nielsbohrium (GSI)	Bohrium (Bh) ; en l'honneur du physicien danois Niels Bohr, dont la recherche contribua à la compréhension moderne de l'atome
108	GSI (non contesté)	Hahnium (CNIC) Hassium (GSI)	Hassium (Hs) ; nommé d'après l'Etat allemand de Hesse, où est située Darmstadt
109	GSI (non contesté)	Meitnerium (GSI, CNIC)	Meitnerium (Mt) ; en l'honneur de Lise Meitner, la physicienne autrichienne qui conçut l'idée de fission nucléaire



KVL, LUTHERON



LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

4. LES LABORATOIRES DE HAUTE TECHNOLOGIE comme l'Institut de recherche nucléaire de Dubna, en Russie (en haut), et le Laboratoire Lawrence Berkeley, aux États-Unis (à droite), ont été le foyer de nombreux nouveaux éléments.

soigneuse. Le succès est arrivé par intermittence, et les progrès récents ne sont pas l'exception. La prochaine étape, difficile à atteindre, est la fabrication des éléments 113 et 114. Malgré des efforts soutenus, aucun laboratoire au monde n'a encore créé ces éléments. Néanmoins, un long chemin a été parcouru depuis les années 1940, quand Niels Bohr prédisait que le fermium, l'élément 100, serait le dernier du tableau périodique. Nous identifions aujourd'hui de nouveaux éléments de période inférieure à dix microsecondes. Si, sur dix milliards d'essais, deux noyaux fusionnent pour former un seul atome superlourd, nous le trouverons.

A mesure que nous créons de nouveaux éléments, les progrès sont de plus en plus difficiles. La fusion froide et l'amélioration des techniques expérimentales pourraient aboutir à l'élément 114 si convoité, mais une loi fondamentale de la physique gêne l'obtention d'éléments plus lourds : les protons, positivement chargés, se repoussent avec des forces qui augmentent avec la taille du noyau. Jusqu'ici, nous avons surmonté ces forces, mais nous ne serons pas capables de continuer indéfiniment.

Aujourd'hui, tous les laboratoires cherchant des éléments superlourds collaborent étroitement, et la compétition politique entre les pays n'est plus une force motrice majeure. Toutefois, nous espérons que, même sans pressions politiques, les États continueront à soutenir la recherche sur les éléments superlourds. Cette recherche n'engendrera pas directement des résultats industrialisables, mais les résultats intellectuels et techniques justifient certainement les efforts : nous savons que le nombre d'éléments chimiques est fini. La question lancinante est : quelle est la limite ?

Peter ARMBRUSTER et Fritz Peter HESS-BERGER travaillent à l'Institut de recherche sur les ions lourds (GSI), à Darmstadt.

Peter ARMBRUSTER, *On the Production of Heavy Elements by Cold Fusion : The Elements 106 to 109*, in *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 35, pp. 135-194, 1985.

Gottfried MÜNZENBERG, *Recent Advances in the Discovery of Transuranium Elements*, in *Report on Progress in Physics*, vol. 51, n° 1, pp. 57-104, janvier 1988.

Peter ARMBRUSTER et Gottfried MÜNZENBERG, *La création d'éléments superlourds*, in *Pour la Science*, juillet 1989.

Richard STONE, *An Element of Stability*, in *Science*, vol. 278, pp. 571-572, 24 octobre 1997.

Peter ARMBRUSTER, *Meine 40 Jahre Mit Rückstossspektrometern*, in *Physics Blätter*, vol. 53, pp. 661-668, 1997.

Sigurd HOFMANN, *New Elements : Approaching Z = 114*, in *Reports on Progress in Physics*, vol. 61, n° 6, pp. 639-689, juin 1998.

La classification périodique des éléments

ERIC SCERRI

Depuis ses prémices, il y a environ 200 ans, la classification périodique est devenue un outil essentiel pour les chimistes modernes.

Le tableau de Mendeleïev est une des vedettes de la chimie : sous une forme synthétique, il rassemble une quantité considérable de connaissances. Suspendu au mur de la plupart des laboratoires de chimie du monde, présent sur les pages de garde de la plupart des manuels, il n'a pas d'équivalent dans les autres disciplines scientifiques.

Pendant près de deux siècles, les classifications d'éléments chimiques ont été discutées et perfectionnées. Après les travaux de Mendeleïev, les cases vides du tableau qu'il proposa ont été remplies par les chimistes ou par les physiciens qui découvrirent de nouveaux éléments.

Toutefois, les bouleversements scientifiques du début du siècle – la constitution de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique – n'ont pas remanié le tableau de Mendeleïev. Quelques découvertes ont semblé menacer ses fondements, mais, chaque fois, les scientifiques ont préservé sa structure, tout en incorporant les nouveaux résultats. Le tableau de Mendeleïev est remarquable par son ancienneté et par sa modernité.

Le tableau de Mendeleïev, qui matérialise la classification périodique des éléments chimiques, met en valeur des ressemblances chimiques entre ces éléments, à intervalles de numéros atomiques périodiques (le numéro atomique est le nombre de protons présents dans le noyau). Sans la périodicité exprimée par cette classification, les étudiants en chimie devraient apprendre les propriétés de chacun des 112 éléments connus. Grâce à la classification périodique, les chimistes déterminent les propriétés de n'importe quel élément en

cherchant la famille à laquelle il appartient. Ces familles forment les colonnes du tableau.

Le système périodique de classification des éléments n'a pas été découvert par un génie isolé : c'est l'aboutissement d'avancées scientifiques nombreuses, qui furent un jour résumées sous une forme graphique simple. Cependant, les historiens des sciences considèrent qu'un événement marque la naissance formelle du tableau périodique moderne : le 17 février 1869, un professeur de chimie russe, Dmitri Ivanovitch Mendeleïev, termina le premier de ces nombreux tableaux périodiques. Il classait les 63 éléments connus selon leur masse atomique et selon leurs propriétés chimiques ; Mendeleïev avait aussi laissé des cases vides pour des éléments alors non découverts, dont il prédisait les masses atomiques.

Avant Mendeleïev, de nombreux chimistes avaient cherché des principes organisateurs pour classer les éléments. En 1787, par exemple, Antoine Laurent de Lavoisier, Antoine Fourcroy, Louis-Bernard Guyton de Morveau et Claude-Louis Berthollet avaient dressé une liste des 33 éléments connus à leur époque. Toutefois, cette liste, et d'autres qui suivirent, n'avaient qu'une seule dimension ; de surcroît, elle n'était pas encore périodique. La force du tableau moderne réside dans la représentation en deux dimensions, voire en trois dimensions, de tous les éléments connus.

Soucieux des relations entre les éléments, le chimiste allemand Johann Döbereiner souligna, en 1817, que bien des éléments connus pouvaient être rangés par leurs similarités en groupes de trois, qu'il nomma triades : le

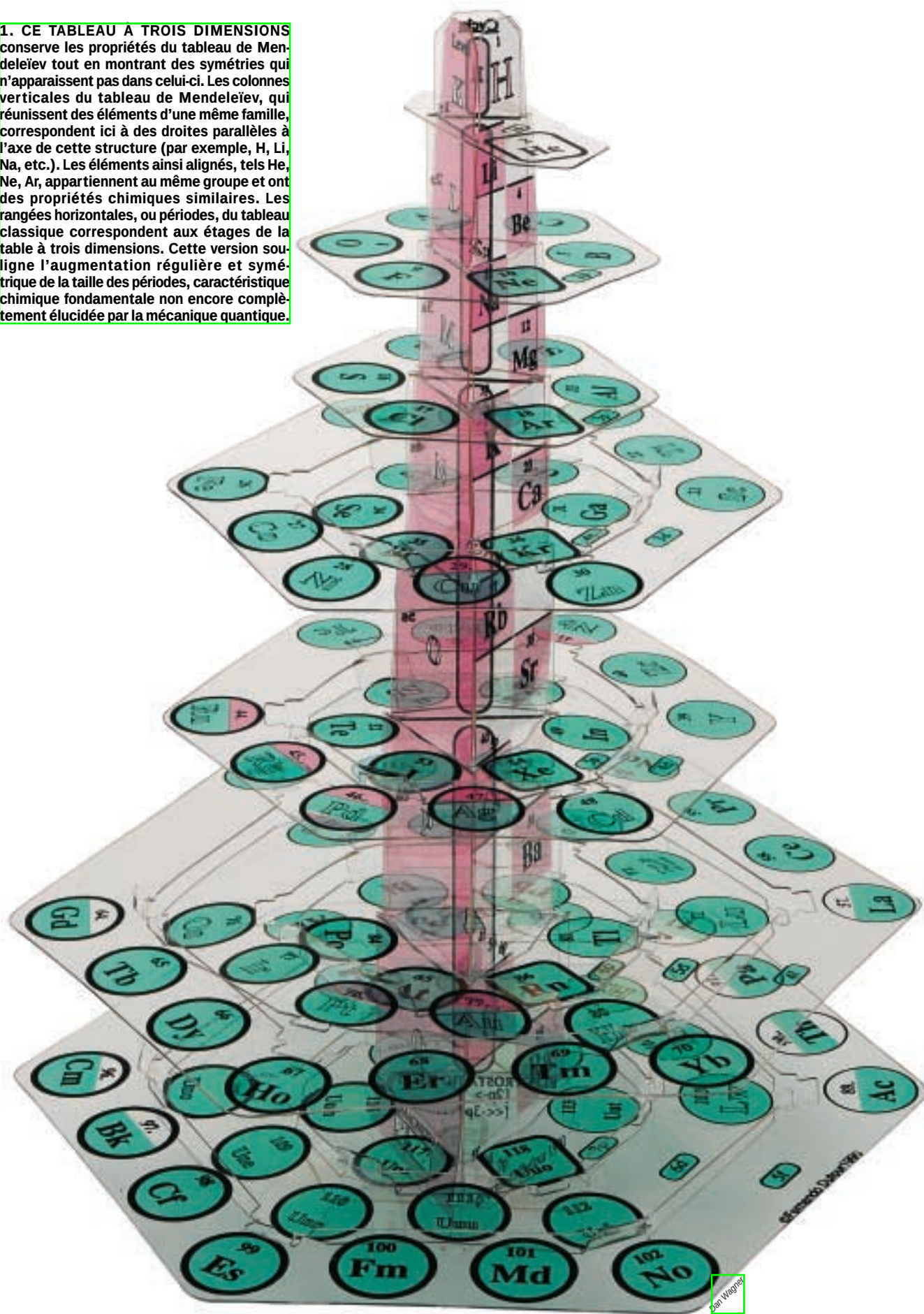
lithium, le sodium et le potassium formaient une triade ; le chlore, le brome et l'iode formaient une autre triade. Il observa que, quand on classait les éléments des triades par ordre de masse atomique, les propriétés de l'élément central étaient intermédiaires entre celles des premier et troisième éléments. Par exemple, le lithium, le sodium et le potassium réagissent avec l'eau ; cependant, le lithium, le moins massif de la triade, réagit moins que les deux autres, et le plus massif des trois, le potassium, réagit plus violemment que le sodium. De surcroît, Döbereiner montra que la masse atomique de l'élément central est proche de la moyenne de la masse du premier élément et de celle du troisième membre de la triade.

Les propriétés périodiques des éléments

Ce travail encouragea les chimistes à rechercher des corrélations entre les propriétés chimiques des éléments et leur masse atomique. Parmi ceux qui poursuivirent l'approche de la triade au XIX^e siècle, Peter Kremers, de Cologne, observa que certains éléments appartenaient à deux triades disposées perpendiculairement. Kremers franchit ainsi une nouvelle étape en comparant les éléments dans deux directions, une caractéristique qui sera un aspect essentiel du système de Mendeleïev.

La caractéristique principale de la classification de Mendeleïev est la périodicité des propriétés des éléments, à intervalles réguliers. Ce comportement avait déjà été observé dans un classement des éléments selon la masse atomique conçu en 1862 par le géologue

1. CE TABLEAU A TROIS DIMENSIONS conserve les propriétés du tableau de Mendeleïev tout en montrant des symétries qui n'apparaissent pas dans celui-ci. Les colonnes verticales du tableau de Mendeleïev, qui réunissent des éléments d'une même famille, correspondent ici à des droites parallèles à l'axe de cette structure (par exemple, H, Li, Na, etc.). Les éléments ainsi alignés, tels He, Ne, Ar, appartiennent au même groupe et ont des propriétés chimiques similaires. Les rangées horizontales, ou périodes, du tableau classique correspondent aux étages de la table à trois dimensions. Cette version souligne l'augmentation régulière et symétrique de la taille des périodes, caractéristique chimique fondamentale non encore complètement élucidée par la mécanique quantique.



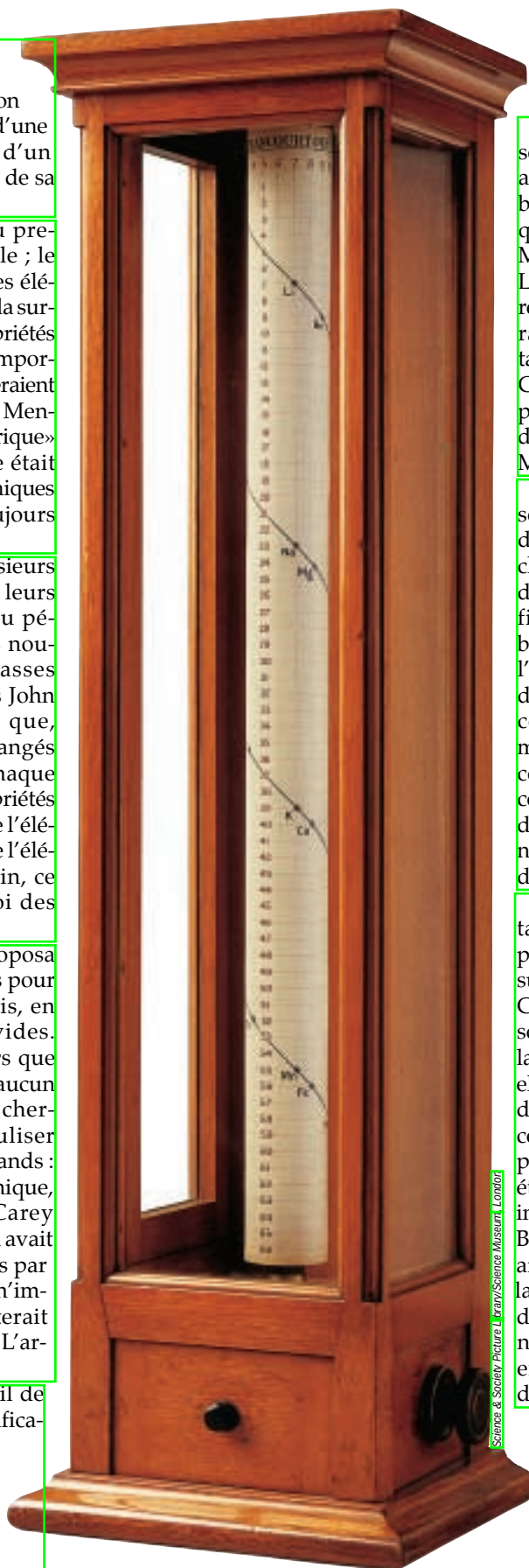
français Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois. Ce dernier plaçait les éléments en fonction de leur masse atomique le long d'une spirale inscrite sur la surface d'un cylindre, et inclinée à 45 degrés de sa base (voir la figure 2).

L'oxygène était à la fin du premier tour complet de la spirale ; le soufre à la fin du deuxième. Les éléments alignés verticalement sur la surface du cylindre avaient des propriétés similaires. Ainsi, ce système comportait déjà les caractéristiques qui seraient essentielles dans le système de Mendeleïev. Pourtant, cette «vis tellurique» eut peu de succès : le système était compliqué, et les similarités chimiques des éléments n'étaient pas toujours probantes.

Durant les années 1860, plusieurs autres chercheurs élaborèrent leurs propres versions d'un tableau périodique. Utilisant les valeurs nouvellement fixées pour les masses atomiques, le chimiste anglais John Newlands observa en 1864 que, lorsque les éléments étaient rangés selon leur masse atomique, chaque élément de la liste avait des propriétés chimiques analogues à celles de l'élément situé huit cases avant et de l'élément placé huit cases plus loin, ce que Newlands nomma «la loi des octaves».

Initialement, Newlands proposa un tableau avec des cases vides pour des éléments manquants, mais, en 1866, il supprima ces cases vides. Des chimistes objectèrent alors que ce tableau ne pourrait inclure aucun nouvel élément, et quelques chercheurs allèrent jusqu'à ridiculiser ouvertement les idées de Newlands : à une session de la Société chimique, à Londres en 1866, George Carey Foster demanda à Newlands s'il avait envisagé de classer les éléments par ordre alphabétique, parce que n'importe quel classement présenterait des coïncidences de propriétés. L'article de Newlands fut refusé.

Malgré cet accueil, le travail de Newlands est la première classification fondée sur une séquence de nombres ordinaux : la séquence des masses atomiques, au lieu de la séquence des numéros atomiques utilisée aujourd'hui (le concept de numéro atomique ne fut pas élaboré avant le début du XX^e siècle).



2. CETTE «VIS TELLURIQUE» est un ancêtre du système périodique de classification des éléments chimiques. Elle fut conçue en 1862 par le géologue français Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois, qui découvrit la périodicité des propriétés des éléments.

Le tableau périodique moderne

En 1868, alors qu'il terminait son manuel de chimie, le chimiste allemand Julius Lothar Meyer élaborait un tableau périodique remarquablement proche de celui que Mendeleïev donnerait un an après. Lothar Meyer ne classa pas correctement tous les éléments et, en raison du retard de l'éditeur, le tableau ne fut imprimé qu'en 1870. Ce retard contribua au développement d'une âpre controverse d'antériorité entre Lothar Meyer et Mendeleïev.

Mendeleïev établit également son tableau périodique au cours de la rédaction d'un manuel de chimie. Contrairement à ses prédécesseurs, Mendeleïev avait suffisamment confiance en son tableau périodique pour prédire l'existence de nouveaux éléments, dont il annonçait les propriétés. Il corrigea même les masses atomiques de quelques éléments déjà connus. Mendeleïev admit avoir connu certaines tables antérieures, dont celle de Newlands, mais il nia avoir été au courant du travail de Lothar Meyer.

Bien que l'aspect prédictif du tableau de Mendeleïev ait été un progrès majeur, il semble avoir été surestimé par certains historiens. Ce n'est apparemment pas la raison de son acceptation générale : la Société royale de Londres, quand elle remit la médaille Davy à Mendeleïev, en 1882, ne mentionne pas ces prédictions. Pour ses contemporains, le tableau de Mendeleïev était surtout intéressant parce qu'il intégrait les éléments déjà connus. Bien que de nombreux scientifiques aient contribué à l'émergence de la classification périodique, Mendeleïev l'éleva au rang de loi de la nature et passa le reste de sa vie à examiner ses conséquences et à défendre sa validité.

Cette défense du tableau périodique n'était pas aisée : sa précision et sa validité étaient fréquemment mises en doute par les nouvelles découvertes. Ainsi, en 1894, la découverte de l'argon par William Ramsay et Lord Rayleigh fut à l'origine d'une grave crise théorique. Cette découverte fut

rapidement suivie de celle de quatre nouveaux éléments, l'hélium, le néon, le krypton et le xénon, également par Ramsay. Puis, en 1900, le physicien allemand Friedrich Ernst Dorn découvrit le radon. Tous ces éléments sont ce qu'on nomme aujourd'hui des gaz rares, ou gaz nobles.

Ces dénominations proviennent de ce que tous ces éléments sont des gaz (à la température ambiante) qui se distinguent des autres éléments par leur inertie chimique. Personne n'avait prédit leur existence, et les chimistes et les physiciens mirent six ans à leur trouver une place dans le tableau périodique. Ils durent ajouter une colonne entre les halogènes (le fluor, le chlore, le brome, l'iode et l'astate) et les métaux alcalins (le lithium, le sodium, le potassium, le rubidium, le césium et le francium).

L'ordonnancement précis des éléments était un second point de litige. Le tableau de Mendeleïev classait les éléments par ordre de masse atomique, mais, en 1913, le théoricien amateur hollandais Anton van den Broek montra que le principe ordonnateur du tableau périodique était plutôt la charge nucléaire de chaque atome. Cette hypothèse fut testée la même année par Henry Moseley, peu de temps avant sa mort tragique au début de la Première Guerre mondiale.

Moseley analysa le spectre d'absorption des rayons X de douze éléments, dont dix occupaient des cases successives dans le tableau périodique. Il découvrit que les fréquences de certaines raies d'absorption, dans le spectre de chaque élément, étaient proportionnelles aux carrés des entiers représentant la position successive de chaque élément dans le tableau (les raies d'absorption correspondent aux longueurs d'onde absorbées par les atomes). C'était la preuve qu'il y a dans l'atome une quantité fondamentale, qui croît par paliers réguliers quand on passe d'un élé-

ment au suivant». Cette quantité fondamentale, qu'Ernest Rutherford nomma le numéro atomique en 1920, est aujourd'hui identifiée comme le nombre de protons du noyau.

Grâce au travail de Moseley, les chimistes pouvaient déterminer combien de cases vides, d'éléments nouveaux, restaient à découvrir. Les chimistes adoptèrent rapidement le numéro atomique pour classer les éléments dans le tableau. Des problèmes lancinants furent alors résolus. Par exemple, quand on classait l'iode et le tellure par ordre de masse atomique (avec l'iode en premier), les deux éléments apparaissaient incorrectement positionnés en fonction de leur comportement chimique ; en revanche, lorsqu'ils sont classés selon leur numéro atomique (avec le tellure en premier), les deux éléments sont bien positionnés.

Comprendre l'atome

Le tableau périodique guida les chimistes, mais aussi les physiciens qui cherchaient la structure de l'atome. En 1904, à Cambridge, le physicien Joseph Thomson (qui découvrit notamment l'électron) élaborait un modèle de l'atome qui tenait compte de la périodicité des éléments : il proposa que les atomes d'un élément contiennent tous le même nombre d'électrons, arrangés en anneaux concentriques ; les éléments avec des configurations d'électrons similaires devaient avoir des propriétés similaires. Le travail de Thomson expliquait la périodicité des éléments. Thomson imaginait que les anneaux d'électrons étaient à l'intérieur du corps principal de l'atome plutôt qu'autour du noyau, comme on le pense aujourd'hui, mais son modèle est le premier qui envisagea l'arrangement des électrons dans l'atome, un concept aujourd'hui omniprésent en chimie.

Le physicien danois Niels Bohr, le premier qui appliqua la mécanique quantique à l'atome, s'intéressait également à l'arrangement des éléments dans la classification périodique. Dans le modèle atomique de Bohr, élaboré en 1913, les électrons occupent une série de couches concentriques autour du noyau. Selon Bohr, les éléments du même groupe, dans le tableau périodique, devaient avoir des configurations électroniques de leurs couches externes analogues, et les propriétés chimiques d'un élément devaient dépendre en grande partie de l'arrangement des électrons dans la couche atomique externe.

Le modèle atomique de Bohr expliquait également pourquoi les éléments nobles réagissent peu : ils ont des couches externes entièrement remplies d'électrons, de sorte qu'ils sont très stables et peu aptes à former des composés. En revanche, la plupart des autres éléments réagissent de telle sorte que leurs couches

3. LE TABLEAU PÉRIODIQUE fut élaboré par le chimiste russe Dmitri Ivanovitch Mendeleïev en février 1869. Sur ce brouillon, les groupes d'éléments sont horizontaux plutôt que verticaux, comme dans le tableau classique.

En 1924, un autre physicien, l'Autrichien Wolfgang Pauli, entreprit d'expliquer la longueur de chaque rangée, ou période, dans le tableau. Le principe d'exclusion qu'il énonça stipule que deux électrons ne peuvent exister dans le même état quantique.

Au milieu des années 1920, Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger donnèrent à la mécanique quantique une forme proche de celle que nous connaissons aujourd'hui. Toutefois, l'influence de ces progrès sur le tableau périodique fut minime. Malgré les efforts de nombreux physiciens et chimistes, la mécanique quantique n'explique pas toutes les propriétés du tableau périodique.

Pourquoi cette incapacité ? Parce que l'équation fondamentale de la mécanique quantique, l'équation de Schrödinger, ne peut être exactement résolue pour d'autres atomes que l'hydrogène et que, même avec les approximations utilisées en chimie quantique, personne n'a encore réussi à prédire l'ordre de remplissage des couches électroniques. Ainsi, la mécanique quantique peut seulement reproduire la périodicité des éléments par l'utilisation d'approximations, mais elle ne peut prédire le système périodique.

[illegible]

+ Ces éléments n'ont pas encore été découverts.

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

Quinto Credo

Diagram illustrating the placement of actinides and lanthanides in the periodic table. The main body of the table is shown in perspective, with the f-block elements (actinides and lanthanides) shown as separate rows that fit into the gaps between the s-block and d-block elements. The top row of the f-block shows Rb, Sr, Y, and Zr. The bottom row shows Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, and Td. The bottom-most row shows Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, and Bk.

+ Ces éléments n'ont pas encore été découverts.

5. LE TABLEAU PYRAMIDAL est une forme du tableau périodique qui illustre la symétrie de la loi périodique, en particulier dans sa relation avec les longueurs des périodes successives. Celui-ci est une forme modifiée du tableau récemment élaboré par William Jensen, de l'Université de Cincinnati. Les lignes continues épaisses indiquent les éléments aux couches électroniques externes analogues ; les lignes continues fines indiquent les éléments des mêmes groupes ; les lignes en pointillé soulignent des relations secondaires en terme de propriétés chimiques.

* Ces éléments ont été découverts, mais pas encore officiellement nommés.
+ Ces éléments n'ont pas encore été découverts.

0



6. LES CHIMISTES Mendeleïev (à gauche) et Julius Lothar Meyer (à droite) ont élaboré le tableau périodique moderne presque en même temps, à la fin des années 1860. Le tableau de Mendeleïev, publié en premier, valut à son auteur les honneurs de la découverte, parce qu'il l'utilisa pour faire des prédictions exactes et qu'il défendit opiniâtement sa validité.

Variations sur un thème

Depuis Mendeleïev, plusieurs chimistes ont proposé des variantes de la classification périodique. Par exemple, à Montréal, Fernando Dufour a mis au point un tableau périodique tridimensionnel qui illustre la symétrie fondamentale de la loi périodique, contrairement à la forme bidimensionnelle courante du tableau. La même propriété apparaît dans le tableau pyramidal de William Jensen, de l'Université de Cincinnati (voir la figure 5).

Peut-on résumer les propriétés des composés plutôt que des éléments? En 1980, à l'Université de Colégiale, Ray Hefferlin a conçu un système périodique pour toutes les molécules diatomiques qui pourraient être formées entre les 118 premiers éléments

(seulement 112 ont été découverts à ce jour). Le diagramme de R. Hefferlin révèle que certaines propriétés des molécules – la distance entre les atomes et l'énergie requise pour ioniser la molécule, par exemple – se retrouvent à des intervalles réguliers. Ce tableau prévoit correctement les propriétés de molécules diatomiques connues.

Malgré de tels raffinements, le tableau périodique de Mendeleïev conserve son influence prépondérante. Fruit de 200 ans d'efforts, il reste au cœur de l'étude de la chimie. C'est une des idées les plus fructueuses de la science moderne, peut-être comparable à la théorie de l'évolution de Darwin. À la différence de théories comme la mécanique newtonienne, il n'a pas été abattu par la physique moderne, mais s'est adapté en conservant sa forme primitive.

Eric SCERRI, de l'Université Purdue, est éditeur de la revue interdisciplinaire *Foundations of Chemistry* («Les fondations de la chimie»).

J.W. van SPRONSEN, *The Periodic System of Chemical Elements : A History of the First Hundred Years*, Elsevier, 1969.

Dennis H. ROUVRAY, *The Surprising Periodic Table : Ten Remarkable Facts*, in *Chemical Intelligencer*, vol. 2, n° 3, pp. 39-47, juillet 1996.

William B. JENSEN, *Classification, Symmetry and the Periodic Table*, in *Computing and Mathematics with Applications*, vol. 12B, n° 1-2, pp. 487-510, 1989.

Bernadette BENSUADE-VINCENT, *La classification périodique des éléments*, in *Éléments d'histoire des sciences*, sous la direction de Michel Serres, Éditions Bordas, 1989.

L. NEKOVAL-CHIKHAOU, *La diffusion de la classification périodique de Mendeleïev en France entre 1869 et 1934*, Thèse de l'Université Paris-Sud Orsay, 1994.

E.R. SCERRI, *Plus ça change*, in *Chemistry in Britain*, vol. 30, n° 5, pp. 379-381, mai 1994.

Eric R. SCERRI, *The Electron and the Periodic Table*, in *American Scientist*, vol. 85, pp. 546-553, novembre-décembre 1997.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du

samedi

- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires

- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque à l'ordre du

PALAI DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAI DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00

Les mathématiques de l'amortissement

ALAIN OUSTALOUP

On perfectionne les systèmes d'amortissement en utilisant les notions mathématiques de fractales, de récursivité et de dérivées non entières. Une suspension automobile a été construite sur ces principes.

De nombreux systèmes de transport ont un degré de stabilité qui diminue lorsque la masse transportée augmente. La 2CV Citroën, par exemple, se balançait inlassablement en sortie de virage quand elle était surchargée. Ce type de comportement est bien connu des ingénieurs ferroviaires, aéronautiques ou maritimes, qui ont longtemps cru que cette interdépendance de l'amortissement et de la masse était inévitable. Nous verrons qu'il n'en est rien.

L'amortissement des systèmes mécaniques est un sujet d'ingénierie classique. Les ingénieurs qui se préoccupent du degré de stabilité des systèmes mesurent celui-ci par le paramètre d'amortissement : ce paramètre caractérise la décroissance des oscillations, après une sollicitation qui a mis le système hors d'équilibre. Le retour à l'équilibre est nommé relaxation ou régime libre. C'est le mouvement que l'on observe quand on comprime les ressorts de suspension d'une voiture, puis que l'on supprime l'effort ; la relaxation de la caisse est sa remontée (régime transitoire) vers son état d'équilibre final. Une relaxation pendant laquelle les oscillations sont excessivement amples et nombreuses révèle un état déficient des amortisseurs.

Les mécaniciens visent généralement un bon amortissement, c'est-à-dire une décroissance rapide des oscillations, afin de limiter leur nombre et d'assurer un bon comportement dynamique.

Le calcul de l'amortissement en fonction de la masse est simple dans

le cas des suspensions classiques composées d'un ressort en parallèle avec un amortisseur (voir la figure 2) : le comportement dynamique de la suspension présente des oscillations transitoires dont la fréquence et l'amortissement décroissent quand la masse croît ; l'amortissement varie alors comme l'inverse de la racine carrée de la masse.

Dans l'automobile, ce cas se présente pour les véhicules qui, à vide, sont légers et peu amortis, telles les 2CV précédemment évoquées. Dans le secteur aéronautique, les pilotes connaissent également bien la différence de comportement dynamique des avions entre la phase de décollage, où l'appareil est à pleine charge, et la phase d'atterrissage, où la charge est réduite, parce que le carburant a été consommé : situé en grande partie dans les ailes, le carburant est responsable de variations importantes de l'inertie de l'appareil. Par exemple, un Boeing 747, dont le poids total au décollage est de 318 tonnes, emporte jusqu'à 152 tonnes de carburant ; le Concorde, de poids total égal à 185 tonnes, emporte jusqu'à 95 tonnes de carburant.

La pleine charge, qui conduit à un médiocre amortissement, n'est pas gênante au décollage. À l'atterrissage, l'avion, qui a généralement consommé son carburant, est moins chargé, de sorte que l'amortissement est meilleur, et le degré de stabilité supérieur. En revanche, le pilote est gêné quand des circonstances imprévisibles le contraignent à entamer des manœuvres d'atterrissage peu après le décollage ; si

les conditions météorologiques sont trop défavorables, le pilote doit alors larguer une partie du carburant afin de conférer à l'appareil un amortissement conforme aux exigences de la situation.

Afin d'obtenir des descriptions théoriques de l'amortissement qui soient à la fois exploitables mathématiquement et réalisables en pratique, les ingénieurs ont d'abord cherché des systèmes (notamment mécaniques) où le désordre n'intervient pas. Autrement dit, ils ont simplifié les systèmes mécaniques qu'ils réalisaient, afin d'éviter les phénomènes incertains ou aléatoires qui risquaient de rendre imprévisibles les comportements de ces systèmes. De ce fait, le désordre (ou, plus précisément, ses manifestations) fut d'emblée exclu des méthodes générales de conception.

Toutefois, depuis quelques décennies, chimistes et physiciens observent que le désordre est parfois stabilisant. En hydrodynamique, il amortit les turbulences et conduit à des écoulements globalement stables et réguliers. En astronomie, il régularise les trajectoires des astres. N'est-ce alors pas une erreur d'exclure *a priori* le désordre naturel des méthodes générales de conception des systèmes dynamiques ?

Nous avons examiné cette question après avoir analysé les propriétés d'amortissement des milieux très perturbés, observées au XVII^e siècle par les constructeurs de digues. Puis, en 1980, nous avons démontré que l'amortissement de l'eau sur une



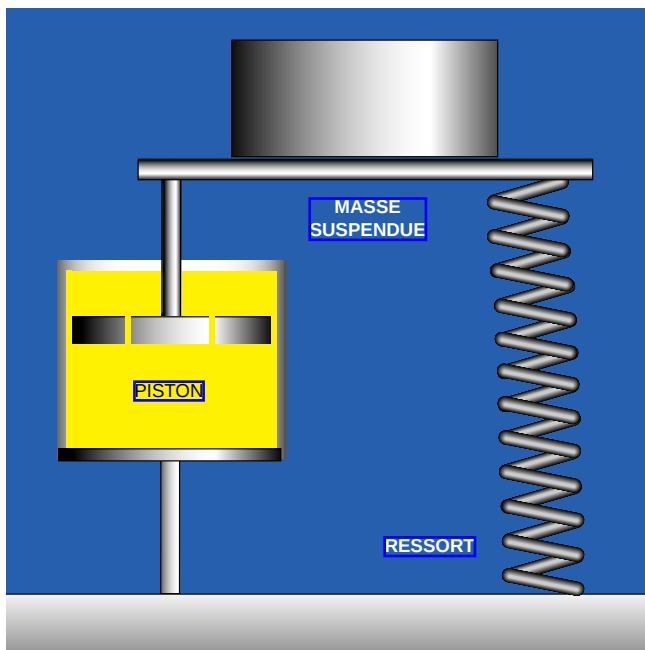
1. LES VAGUES jaillissent quand elles arrivent contre une digue pleine, alors qu'elles sont amorties par une digue désordonnée



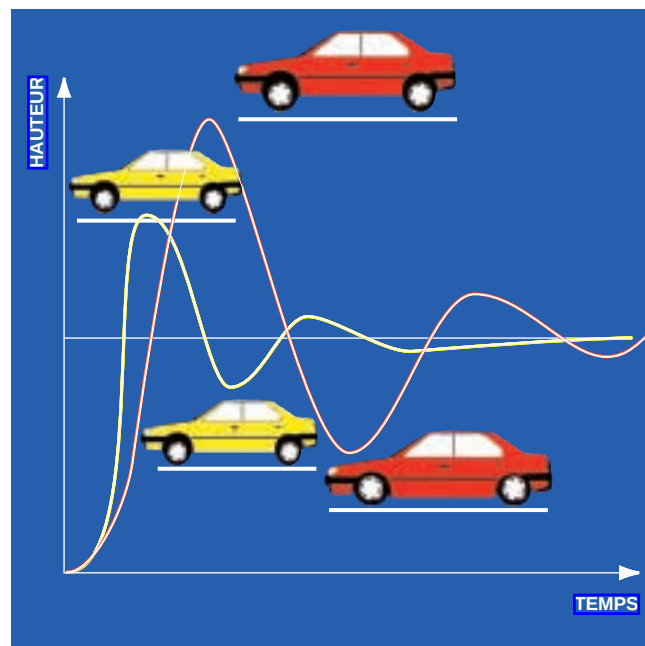
2. L'utilisation du désordre dans la conception des systèmes mécaniques conduit à un perfectionnement des systèmes d'amortissement automobiles (voir la figure 7).

1. LES VAGUES jaillissent quand elles arrivent contre une digue pleine, alors qu'elles sont amorties par une digue désordonnée (en bas, la jetée de Socoa, à Saint-Jean-de-Luz). L'utilisation du

désordre dans la conception des systèmes mécaniques conduit à un perfectionnement des systèmes d'amortissement automobiles (voir la figure 7).



2. L'AMORTISSEMENT est le paramètre qui mesure le nombre d'oscillations d'un système mécanique, après qu'il a été placé dans un état hors d'équilibre et relâché. Le dispositif d'amortissement le plus simple est représenté à gauche : il est composé d'un



ressort et d'un système à frottement visqueux. Les oscillations d'un tel système dépendent de la masse suspendue (à droite, on a représenté les oscillations de deux véhicules identiques : le rouge est plus chargé que le jaune).

digue poreuse est indépendant de la masse d'eau en mouvement : nous avons mathématiquement confirmé que les digues très accidentées amortissent mieux les mouvements de l'eau, surtout quand des poches d'air pouvaient être comprimées par l'avancée des eaux.

Depuis des siècles, les ingénieurs analysent le comportement des digues en enregistrant l'évolution du niveau

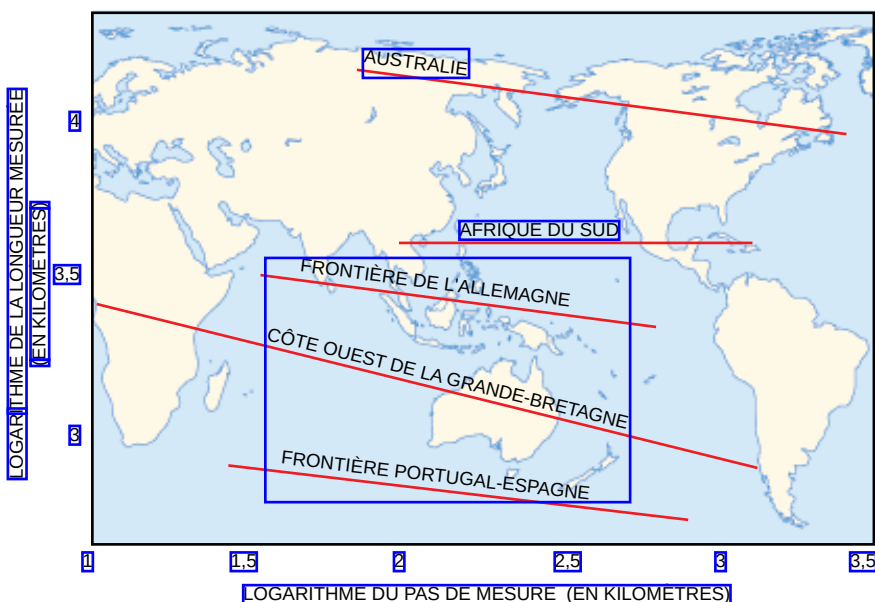
de l'eau sur leur paroi. Dans le cas des digues très amortissantes (ou absorbantes) en raison de leur structure poreuse, on observe que la fréquence de la relaxation est différente selon que la digue est fluviale ou côtière (dans ce dernier cas, la masse d'eau transportée est bien supérieure) ; l'amortissement de la relaxation, lui, semble indépendant de la digue, qu'elles soit fluviale ou côtière.

Un tel résultat est paradoxal en mécanique classique, où toute relaxation présente un amortissement lié à la masse transportée. Il est pourtant assez général, puisqu'il se manifeste également dans le cas de l'amortissement du vent par le feuillage d'un arbre ou dans le cas de l'amortissement des mouvements de l'air dans les poumons.

Sachant que la nature est une source inépuisable de solutions techniques, nous avons recherché l'essence mathématique d'un tel phénomène, afin d'en tirer des idées directrices pour la conception d'une nouvelle stratégie de commande et d'isolation vibratoire. Nous avons ainsi identifié que la propriété des systèmes fractals nommée récursivité conduit à un amortissement particulièrement efficace, que l'on décrit aujourd'hui par la notion de dérivation non entière.

Côtes, fractales et amortissement

Ces analyses ont conduit, après l'analyse mathématique du phénomène, à la découverte d'une méthode générale de conception de systèmes et, notamment, à un nouveau type de suspension automobile que nous nommons suspension Crone (pour «commande robuste d'ordre non entier»).

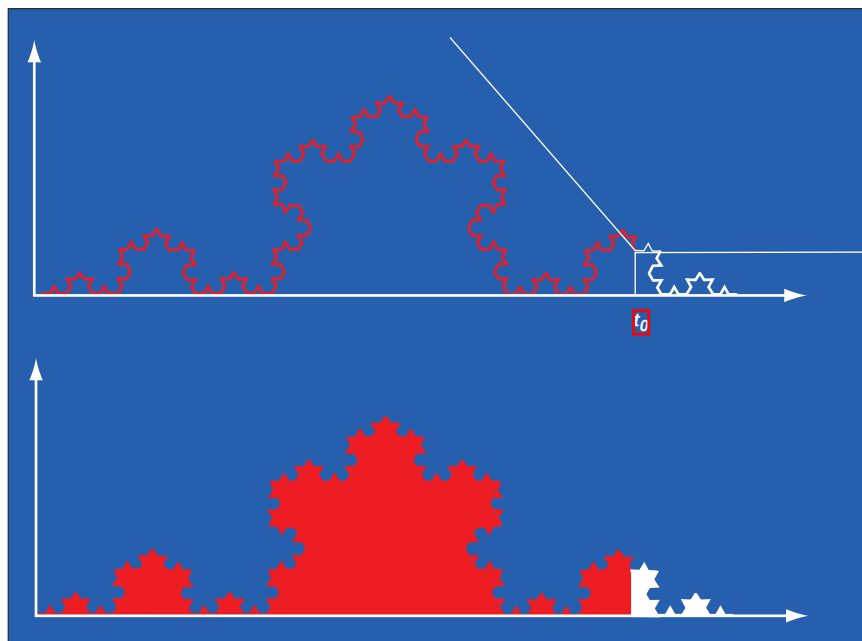
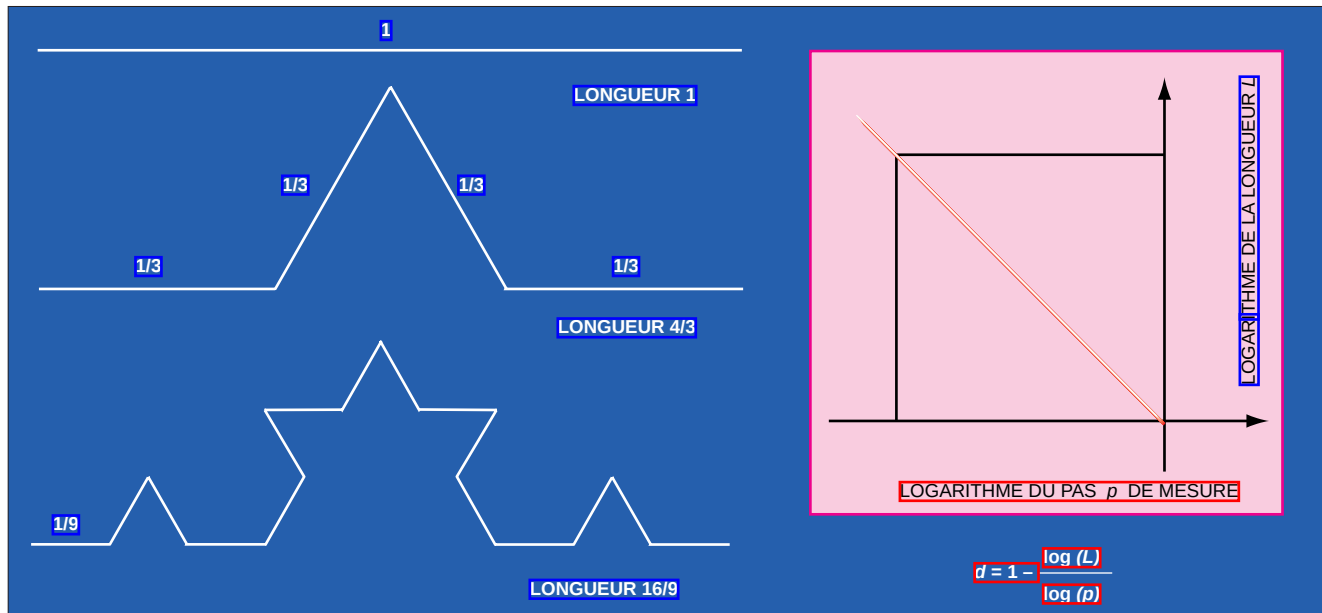


3. LA LONGUEUR DES CÔTES et des frontières dépend de la précision avec laquelle on la mesure : plus le pas de mesure est petit, plus on prend en compte de détails. Pour définir la dimension fractale des objets, on utilise la pente de la droite qui décrit la relation entre la longueur mesurée et le pas de mesure, dans un graphique bilogarithmique.

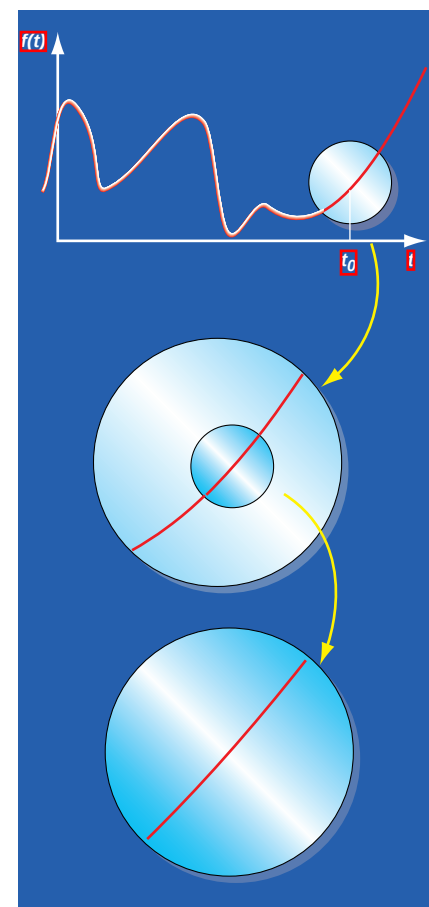
La notion de fractalité est l'aboutissement des diverses études menées depuis le début du siècle par des mathématiciens qui cherchaient une mesure du caractère désordonné (ou irrégulier) de systèmes naturels. Tout a commencé quand ils ont examiné la notion de mesure. Quelle est, par exemple, la longueur de la côte de la

Bretagne, a demandé le mathématicien français Benoît Mandelbrot? Si l'on mesure cette longueur à l'aide d'une règle de un kilomètre de longueur, on ne tient pas compte des reliefs inférieurs à cette longueur. Avec une règle de un mètre de longueur, on peut prendre en compte les rochers ; avec un pas de un millimètre, on tient

compte des grains de sable. Comme l'utilisation d'une règle de plus en plus petite conduit à prendre en compte des éléments toujours plus petits, les segments de droites sont remplacés par des lignes brisées, et la longueur mesurée augmente quand le pas de mesure diminue. À la limite, quand le pas de mesure devient infiniment



4. LES COURBES fractales sont des exemples de courbes irrégulières que l'on construit en appliquant récursivement une même transformation (en haut, les trois premières étapes de la construction de la courbe de von Koch). Ces courbes ont une dimension dite fractale, comprise entre un (pour les courbes régulières) et deux (pour les surfaces). Les courbes régulières sont dérivables (à droite) : quand on agrandit une partie plusieurs fois de suite, la partie agrandie se présente comme un segment de droite ; c'est une partie de la tangente à la courbe. Les courbes fractales ne sont pas dérivables, parce que chaque point est une singularité (la courbe de von Koch, par exemple, a deux tangentes en chaque point). Pour calculer des dérivées non entières de telles courbes, on ne cherche pas la tangente, puisqu'elle n'est pas définie, mais l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses (en rouge dans le schéma inférieur).



petit, la longueur mesurée devient infiniment grande. Ainsi toutes les côtes accidentées ont une longueur infinie, et la longueur classique n'est pas une mesure pertinente des objets naturels désordonnés.

Toutefois la longueur mesurée ne croît pas n'importe comment. En 1953, le mathématicien américain Lewis Fry Richardson a eu l'idée d'étudier expérimentalement la variation de la

longueur mesurée en fonction du pas de mesure. Il a examiné diverses côtes et frontières naturelles terrestres : la côte de l'Australie, de l'Afrique du Sud, la côte Ouest de la Grande-Bretagne, la frontière terrestre de l'Allemagne en 1900, la frontière entre le Portugal et l'Espagne.

Pour chacune, il a porté le logarithme décimal de la longueur mesurée en ordonnée, en fonction du

logarithme décimal du pas de mesure, en abscisse (le logarithme décimal associe la valeur 1 au nombre 10, la valeur 2 à 100, 3 à 1 000, etc.). Richardson a alors observé que, dans un tel graphique, le logarithme de la longueur mesurée croît linéairement vers l'infini quand le pas de mesure tend vers zéro. En outre, la pente des droites du graphique varie selon la nature de la côte ou de la frontière.

Cette pente pouvait-elle mesurer le degré de désordre (ou d'irrégularité)? La linéarité observée correspond à une loi qui indique que la longueur mesurée L est proportionnelle à la longueur du pas de mesure élevée à une puissance $1 - d$. Pour Richardson, le nombre d était un paramètre sans signification particulière, mais, en 1967, B. Mandelbrot proposa de l'interpréter comme une dimension d'espace (qu'il qualifia de fractale pour traduire son caractère fractionnaire).

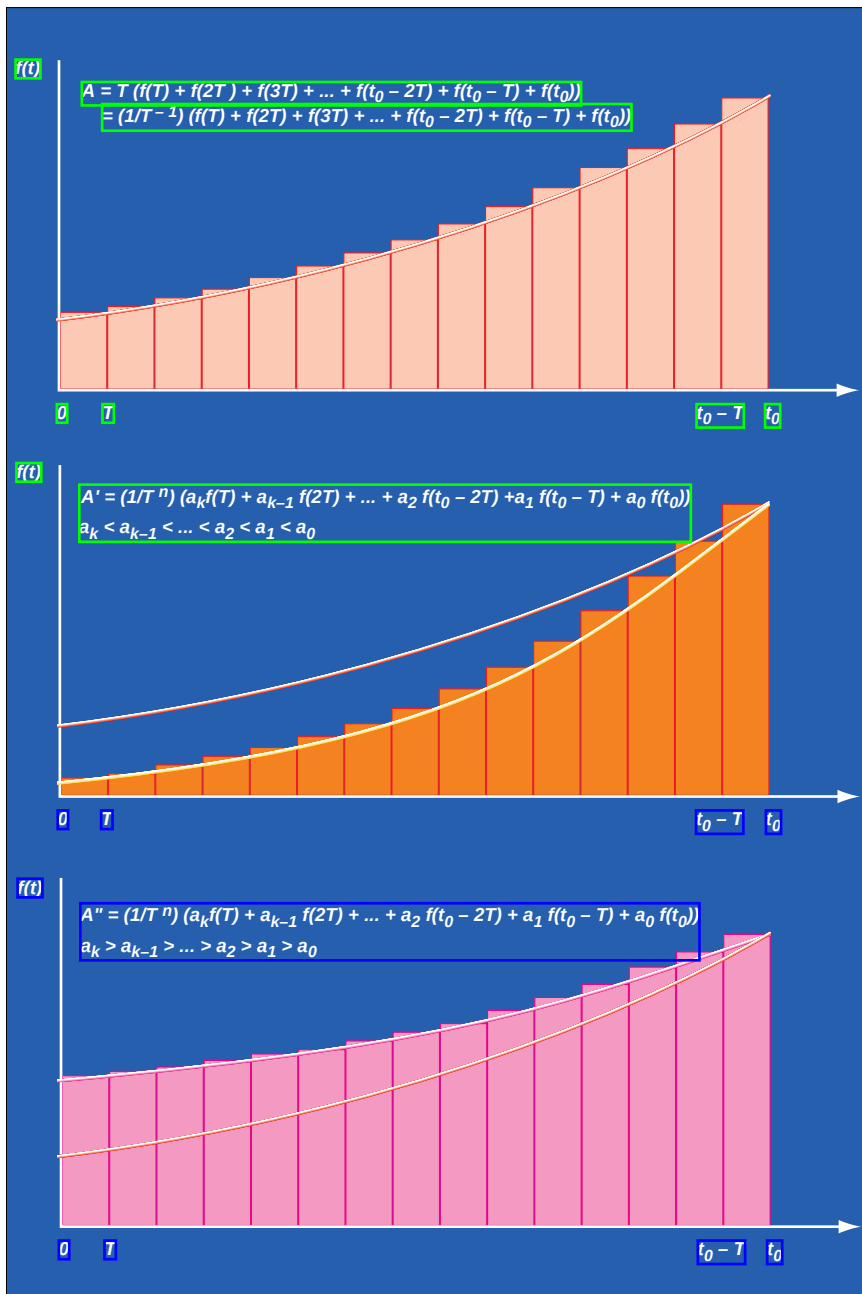
La dimension fractale

Cette idée lui vint quand il observa que la pente correspondant à la côte de l'Afrique du Sud était nulle ($1 - d = 0$) et que, de ce fait, le paramètre d était égal à 1, pour cette côte qui n'est pas accidentée. On retrouvait ainsi la dimension égale à 1 des courbes régulières : un nombre – la distance mesurée le long de la courbe entre un point et une extrémité, choisie comme origine – suffit pour décrire la position de ce point sur la courbe.

Pour les autres côtes étudiées par Richardson, la pente des courbes est négative, et leur dimension fractale est supérieure à 1 ($1 - d < 0$, soit $d > 1$) : ces courbes dites fractales emplissent mieux le plan, de dimension égale à 2, que les courbes régulières, de dimension égale à un. Leur dimension fractale est comprise entre 1 et 2 ; on la calcule aujourd'hui par une formule selon laquelle la dimension fractale est égale à 1 moins le quotient du logarithme de la longueur mesurée par le logarithme de la longueur du pas de mesure.

En appliquant ce résultat à la courbe proposée par von Koch en 1904, nous découvrirons des caractéristiques de la fractalité qui nous serviront ensuite à élaborer des systèmes d'amortissement.

La courbe de von Koch résulte d'un procédé récursif, c'est-à-dire de



5. POUR DEFINIR LA DERIVEE NON ENTIERE d'une courbe (courbe rouge sur la figure supérieure), on commence par remarquer que l'intégrale de la courbe, égale à l'aire sous la courbe) est obtenue par l'opération inverse de la dérivée. Cette intégrale se calcule par exemple, comme la somme d'aires de rectangles (en haut). Quand on introduit une mémoire, qui tient différemment compte des valeurs passées de la courbe, on obtient une aire différente qui correspond à une dérivée non entière, d'ordre n supérieur à -1 quand on atténue le passé (au milieu), ou d'ordre n inférieur à -1 quand on accentue le passé (en bas).

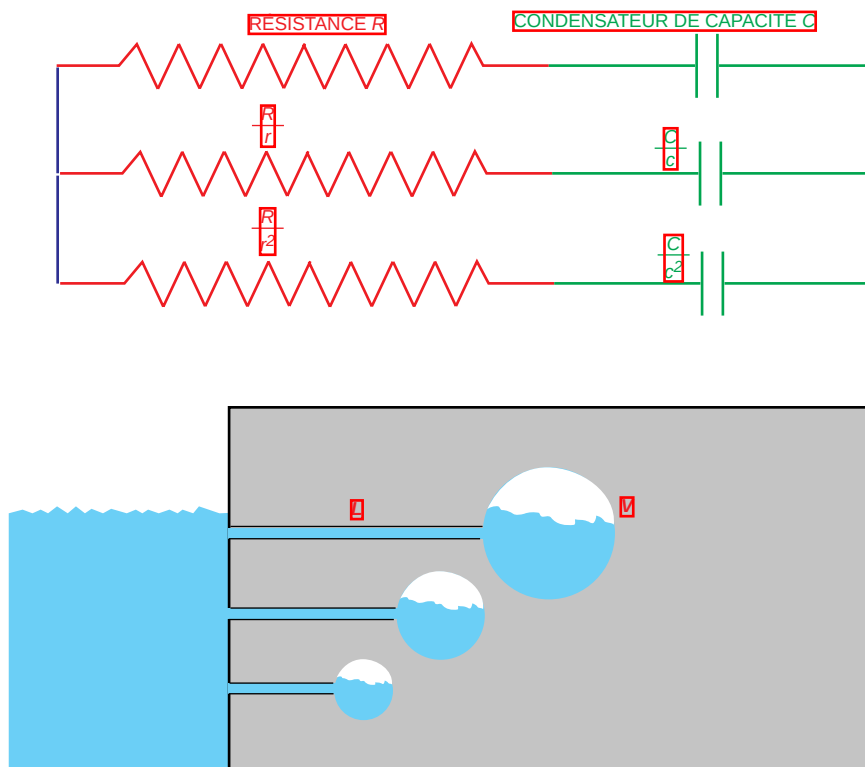
l'application répétée à l'infini d'une même procédure (voir la figure 4). À l'étape 0, on considère un segment de droite de longueur égale à 1. À l'étape 1, on divise ce segment en trois parties égales et l'on remplace la partie médiane par un triangle équilatéral dont on supprime la base. À l'étape 2, on répète la procédure de l'étape 1 à chaque segment de la ligne brisée ainsi obtenue, et ainsi de suite. À la limite, on obtient une figure qui représente plus qu'une ligne ($d > 1$), puisqu'elle est infiniment perturbée, mais moins qu'une surface ($d < 2$), puisqu'elle ne remplit pas complètement le plan. Sa dimension fractale, égale à 1,262, confirme cette perception géométrique.

La dérivation non entière

La dérivation non entière est une opération qui s'impose quand on considère de telles courbes fractales, parce que la dérivation classique n'est plus applicable. Considérons tout d'abord une fonction régulière en fonction du temps, dont la courbe représentative des variations est une courbe continue (voir la figure 4). Observons la courbe dans un petit intervalle de temps, autour d'un instant t_0 : la partie de courbe considérée est un arc. Quand on agrandit la zone d'étude, le segment d'arc devient moins concave. Après un deuxième grossissement, sa concavité diminue encore. Répétée indéfiniment, cette procédure de grossissement conduit progressivement à un segment de droite : une partie de la droite nommée tangente à la courbe au point d'abscisse t_0 . La pente qui mesure l'inclinaison de ce segment de droite est ce que l'on nomme la dérivée (d'ordre 1) de la fonction à l'instant t_0 .

Pour une fonction f dont la courbe représentative est infiniment brisée, comme la courbe de von Koch, la recherche de la tangente n'aboutit pas, parce que, à tout instant t , la procédure de grossissement indiquée précédemment conduit à deux segments de droite, d'inclinaisons différentes. Comme il n'y a aucune raison de privilégier une inclinaison plus qu'une autre, la dérivée à un instant t n'est pas définie. Une courbe fractale n'est pas dérivable.

Pour lever la difficulté, on considère alors l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses. Non



6. UN CIRCUIT ÉLECTRIQUE composé de plusieurs branches identiques amortit bien les impulsions électriques quand les valeurs des capacités et des résistances sont respectivement en progression géométrique. De même, un modèle simplifié de digue garnie d'alvéoles où l'air sert d'amortisseur, reliées à la masse de l'eau par des canaux de différentes longueurs (où l'eau est freinée par des forces visqueuses) amortit bien les vagues.

seulement cette aire reste finie, mais, de surcroît, le caractère perturbé de la courbe a très peu d'effet sur l'aire sous la courbe. Quand on calcule l'aire, à toutes les étapes de la construction de la courbe, on observe qu'elle tend vers une limite. On se propose donc d'utiliser l'aire pour généraliser la notion de dérivation.

Notons que l'utilisation de l'aire fait passer d'une caractérisation locale (la tangente à la courbe à l'instant t_0) ne dépend que des variations de la courbe autour de t_0) à une caractérisation globale : l'aire sous la courbe, entre l'origine et l'instant t_0 , prend en compte tout le passé de la fonction.

Que représente l'aire sous la courbe? Considérons d'abord le cas simple d'une courbe continue telle que celle de la figure 5. Si T désigne une période d'échantillonnage suffisamment petite, on trouve une valeur approchée de l'aire A sous la courbe en calculant la somme de rectangles de largeur T et de hauteur égale à $f(t)$, pour toutes les valeurs de t comprise entre 0 et t_0 . Cette somme est égale au produit de la période T par la somme des valeurs de la fonction à des intervalles de temps espacés de T , entre

0 et t_0 . L'aire ainsi calculée est classiquement nommée l'intégrale de la fonction f , et l'intégrale est l'opération inverse de la dérivée, car la dérivée de la fonction obtenue par intégration est la fonction elle-même. Si la dérivée classique est la dérivée d'ordre 1, l'intégrale peut donc être considérée comme la dérivée d'ordre -1 . Or l'aire peut être exprimée comme le produit de $1/T^{-1}$ par la somme des valeurs de la fonction à des temps espacés de T : la puissance de T , -1 , est l'ordre de dérivation qui correspond, nous l'avons vu, à l'intégration.

Comment passer aux dérivées non entières? Remarquons que l'aire classiquement calculée prend en compte de la même façon les valeurs de la fonction aux temps anciens et aux temps proches du temps t_0 considéré. Définir une dérivée non entière revient à introduire une «mémoire» en accordant moins de poids ou plus de poids aux échantillons les plus anciens (dans la vie courante, le souvenir d'un événement dépend de la nature de cet événement : pour les événements habituels, le souvenir d'événements plus anciens est moindre que celui d'événements plus

récents ; pour des événements inhabituels, le souvenir d'événements plus anciens peut se révéler plus importants que celui d'événements plus récents).

En tenant ainsi compte des valeurs passées d'une courbe par une pondération (on peut au choix atténuer ou renforcer le passé), on obtient des aires A' et A'' qui sont égales au produit de $1/T^n$ par une somme pondérée de valeurs de la fonction f . Cette expression généra-

lise la notion de dérivée à l'ordre n si les coefficients de pondération vérifient une relation qui dépend de n . L'expression obtenue tient compte des valeurs de la fonction à tous les instants du passé. Quand n est égal à -1 , il n'y a aucune pondération du passé ; pour n supérieur à -1 , le passé est atténué ; et pour n inférieur à -1 , le passé est accentué.

Un tel souci d'obtenir des ordres de dérivation non entiers remonte au

début du XIX^e siècle : le mathématicien allemand Bernhard Riemann, et les mathématiciens français Joseph Liouville ou Augustin Cauchy donnèrent une première formulation mathématique de la dérivation non entière.

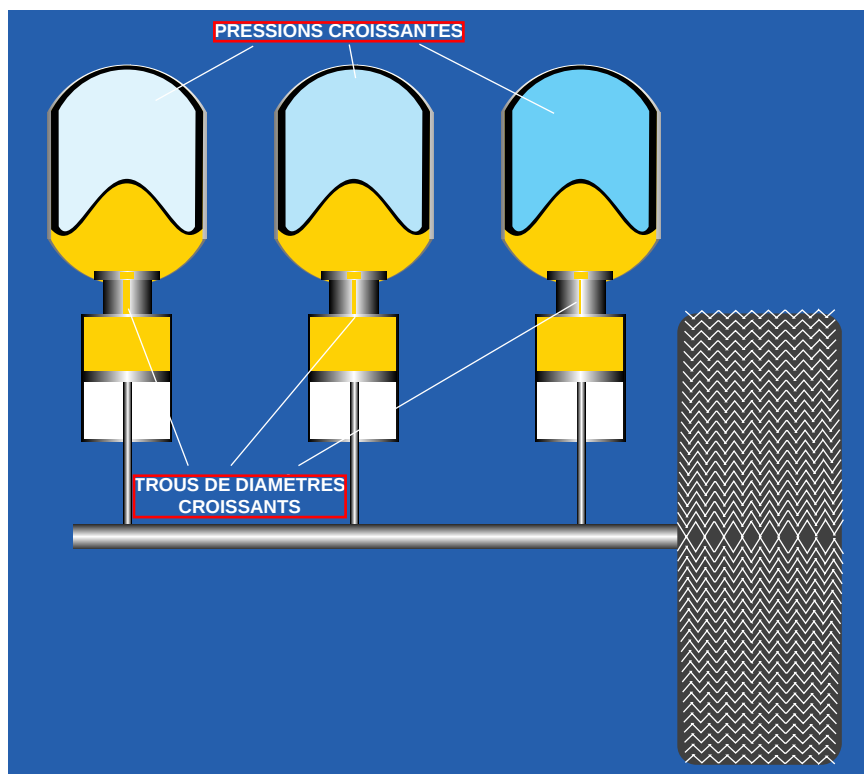
Le souci d'assurer la continuité de la dimension d'espace est plus récent, puisque c'est seulement au XX^e siècle que l'on a identifié des dimensions non entières d'espace. Et c'est enfin dans la seconde moitié de ce siècle que l'on a identifié l'interdépendance de la fractalité et de la dérivation non entière en trouvant une relation entre l'ordre non entier de dérivation et la dimension fractale.

De la dérivée au circuit électrique

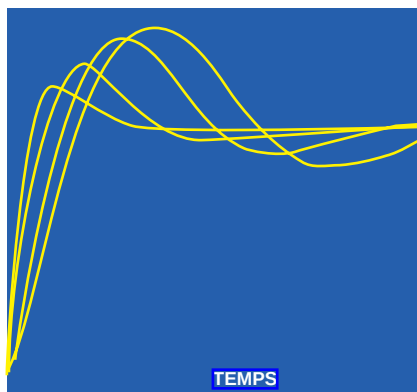
Si la fractalité relève de la géométrie, la dérivation non entière relève de la dynamique des systèmes. L'interdépendance de ces deux concepts n'apparaît donc que lorsqu'il y a corrélation de la géométrie et de la dynamique. Mieux encore, la construction de la courbe de von Koch montre qu'une caractéristique essentielle de la fractalité est la récursivité, c'est-à-dire la répétition du procédé de construction. Celle-ci serait-elle suffisante ? Oui : nous avons montré que la dérivation non entière résulte plus de la récursivité (qu'elle soit ou non d'origine fractale) que de la fractalité ; une géométrie récursive fractale n'est pas nécessaire à l'obtention d'une dérivation non entière, mais une géométrie récursive l'est.

Nous fondant sur ces idées, nous avons construit en 1975 une classe de systèmes que nous avons nommés «dérivateurs non entiers bornés en fréquence», à l'aide de résistances et de condensateurs (électriques, hydrauliques ou pneumatiques).

Examinons d'abord un système électrique : nous associons récursivement, en parallèle, des cellules composées d'une résistance et d'un condensateur en série. À l'étape 0, nous utilisons une cellule composée d'une seule résistance en série avec un seul condensateur ; c'est ce que l'on nomme une cellule RC série. À l'étape 1, on branche en parallèle sur cette cellule une autre cellule RC série, dont la résistance est divisée par r et dont la capacité est divisée par c . À l'étape 2, on branche en parallèle sur



7. LA SUSPENSION CRONE est construite sur le principe du circuit électrique de la figure 6. Des sphères contenant un gaz à différentes pressions sont reliées à l'arbre de la roue par des systèmes hydrauliques où l'huile s'écoule plus ou moins difficilement (en bas).



8. L'AMORTISSEMENT assuré par une suspension Crone (en bas) ne dépend pas de la charge de la voiture, contrairement à l'amortissement classique (en haut). Sur ces diagrammes, on a indiqué la réaction à une sollicitation de la roue de type marche. La suspension Crone, de surcroît, limite l'amplitude des oscillations.

les deux premières cellules une autre cellule RC série dont la résistance est divisée par r^2 et la capacité par c^2 .

Après avoir ainsi disposé une dizaine de cellules, on obtient un circuit qui présente un comportement de dérivation non entière sur une plage de fréquences extrêmement large : quand on applique une tension sinusoïdale à un tel circuit, le courant est déphasé d'une valeur qui dépend des paramètres r et c et qui reste constante sur dix millions de hertz (généralement, les circuits qui déphasent les signaux électriques ont un comportement qui dépend fortement de la fréquence).

Les rapports constants r et c , entre les résistances et les capacités des cellules consécutives, sont nommés facteurs récursifs ; ils déterminent l'ordre non entier n de dérivation entre la tension et le courant, qui s'exprime en l'occurrence par la relation $n = \log(r)/\log(rc)$. La disposition récursive des résistances et des capacités se traduit par une distribution récursive des constantes de temps et des modes de relaxation.

Plus généralement, la dispersion des dynamiques qu'entraîne la récursivité est à l'origine du caractère stabilisant du désordre dans la nature.

C'est donc la récursivité qui est le maître phénomène : c'est la particularité du désordre qu'il convient d'exploiter judicieusement dans la conception des systèmes dynamiques, notamment en retenant la notion de récursivité de nature non fractale.

Digues et suspension

Afin de transposer directement ces résultats à des systèmes d'amortissement mécanique, nous avons étudié le comportement de digues poreuses. Les cavités du milieu poreux que constitue la digue forment comme un ensemble de branches composées chacune d'un canal et d'une alvéole (voir la figure 7).

Le modèle hydraulique simplifié de l'interface eau-digue est analogue à l'arrangement en parallèle de cellules RC série : une distribution récursive des pertes d'énergie dans les canaux se traduit par une distribution récursive des résistances hydrauliques, et une distribution récursive des énergies potentielles d'élasticité dans les alvéoles se traduit par une distribution récursive des capacités hydrauliques.

Autrement dit, le modèle hydraulique est l'analogue exact du système parallèle récursif de cellules RC série envisagé précédemment : l'ordre non entier de dérivation, entre le débit de l'eau et la pression P à l'interface eau-digue, est déterminé par les rapports constants r et c entre les résistances hydrauliques et les capacités hydrauliques de deux cellules consécutives.

Pour passer de la digue poreuse à la suspension Crone, il suffit de tourner d'un quart de tour la représentation de la digue, de mettre l'eau en

mouvement par un piston lié à la roue, de remplacer l'eau par de l'huile. On obtient ainsi le schéma de principe de la version hydropneumatique de la suspension Crone.

Trois cellules au moins sont nécessaires pour définir des rapports constants entre les coefficients de frottement visqueux et les raideurs des amortisseurs et des ressorts de deux cellules consécutives. En pratique, trois cellules sont suffisantes pour couvrir la plage des fréquences qui comprend la fréquence propre de la caisse, qui est de l'ordre du hertz (une oscillation par seconde), et la fréquence propre de la roue, comprise entre 15 et 20 hertz. La récursivité des coefficients de frottement visqueux est assurée par des trous de laminage de diamètres différents. Quant à la récursivité des raideurs, elle est assurée par des sphères où du gaz est placé à des pressions différentes (de la sorte, on peut utiliser des sphères toutes de même taille).

Pour une masse suspendue variant d'un facteur six, entre 150 et 900 kilogrammes, la figure 8 illustre, comparativement à une suspension classique, les réactions de la caisse à une sollicitation de type marche de la roue. Ces réactions montrent que le premier dépassement et l'amortissement restent constants, traduisant une bien meilleure robustesse de la suspension Crone.

Nous avons cherché à valoriser l'approche conceptuelle ainsi mise au point en l'appliquant au secteur automobile. En collaboration avec le groupe PSA, nous avons implanté la suspension Crone sur une Citroën BX expérimentale. Notre réalisation a été récompensée par le trophée AFCT'95, qui distingue la meilleure innovation technique dans le cadre des relations université-industrie.

Alain OUSTALOUP est directeur adjoint du Laboratoire d'automatique et de productique de l'Université de Bordeaux I et de l'ENSERB. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 1997.

Alain OUSTALOUP, *La commande Crone*, Éditions Hermès, Paris, 1991.

Alain OUSTALOUP, *La dérivation non entière : théorie, synthèse et applications*, Éditions Hermès, Paris, 1995.

A. OUSTALOUP, B. MATHIEU et P. LANUSSE, *The Crone Control of Resonant Plants: Application to a Flexible*

Transmission, in *European Journal of Control*, vol. 1, n° 2, pp. 113-121, Éditions Springer, 1995.

A. OUSTALOUP, X. MOREAU et M. NOUILLANT, *The Crone Suspension*, in *Control Engineering Practice*, vol. 4, n° 8, pp. 1101-1108, 1996.

A. OUSTALOUP, F. LEVRON, F. NANOT et B. MATHIEU, *Frequency Band Complex Non Integer Derivator : Characterization and Synthesis*, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, à paraître.

Des photopiles sans soleil

TIMOTHY COUTTS • MARK FITZGERALD

Les générateurs thermophotovoltaïques transforment directement la chaleur radiante en électricité. Ils remplaceront bientôt les groupes électrogènes et permettront des économies d'énergie dans de nombreuses industries.

Les systèmes photovoltaïques transforment la lumière solaire, abondante, non polluante et gratuite, en électricité. Par le même phénomène physique, les générateurs thermophotovoltaïques produisent de l'électricité à partir du rayonnement infrarouge, produit par exemple par la combustion d'hydrocarbures.

Encore peu connue, la génération thermophotovoltaïque a plusieurs avantages. Elle fonctionne de nuit, ou quand le ciel est couvert. Son rendement énergétique est supérieur à celui des groupes électrogènes à moteur. Enfin, dépourvus de pièces mobiles, les générateurs thermophotovoltaïques sont silencieux et fiables, et ils ne requièrent que peu d'entretien.

Ces systèmes n'ont pas connu le même succès que les photopiles solaires. Pourtant, dès 1956, à l'École normale supérieure, Pierre Aigrain avait décrit quelques principes de base de ces générateurs et, au début des années 1960, l'armée américaine en fabriqua même des prototypes. Le rendement, inférieur à un pour cent, était insuffisant pour l'armée, qui estimait avoir besoin d'un rendement d'au moins 10 à 15 pour cent.

Les performances ont été améliorées à la fin des années 1970 et au début des années 1980, mais on n'a fabriqué que récemment les matériaux nécessaires à une conversion efficace de la chaleur en électricité. Aujourd'hui, des prototypes fonctionnent, et le premier générateur thermophotovoltaïque sera bientôt commercialisé, pour l'alimentation électrique de voiliers ou d'habitations isolées. On envisage aussi d'utiliser ces générateurs dans des automobiles : l'énergie électrique ainsi produite s'ajouterait à l'énergie mécanique donnée par le moteur à explosion. En outre, des ingénieurs étudient

l'emploi de tels systèmes pour la récupération de la chaleur dissipée par de nombreux procédés industriels.

Du brûleur à l'électricité

Un générateur thermophotovoltaïque est constitué de quatre éléments principaux. Une source de chaleur chauffe un radiateur, qui émet alors un rayonnement infrarouge. Des photopiles semi-conductrices transforment ensuite ce rayonnement en électricité. Enfin, l'énergie inutilisée est renvoyée vers le radiateur ou récupérée, pour chauffer une pièce par exemple.

Quelle source de chaleur utiliser ? Il existe *a priori* trois possibilités : la combustion d'hydrocarbures, l'énergie solaire ou la fission nucléaire. La plupart des générateurs dont on prépare la fabrication industrielle sont chauffés par des hydrocarbures, parce que cette source d'énergie est facilement disponible et d'emploi flexible. De grands concentrateurs solaires pourraient alimenter des générateurs thermophotovoltaïques, mais on commence à peine la mise au point de systèmes domestiques et l'adaptation de systèmes de stockage de la chaleur, en vue d'une restitution nocturne. Enfin, l'utilisation de combustible nucléaire serait réservée aux missions spatiales, dans des zones où l'intensité du rayonnement lumineux naturel ne permet pas l'emploi de photopiles.

Les combustibles fossiles ont un autre avantage : des brûleurs efficaces ont déjà été mis au point pour le séchage industriel du papier, des encres, des peintures ou des produits agricoles. Ces brûleurs comportent des grilles métalliques ou des récipients en céramique, qui sont chauffés par la combustion des hydrocarbures. Les éléments rayonnants ont une grande

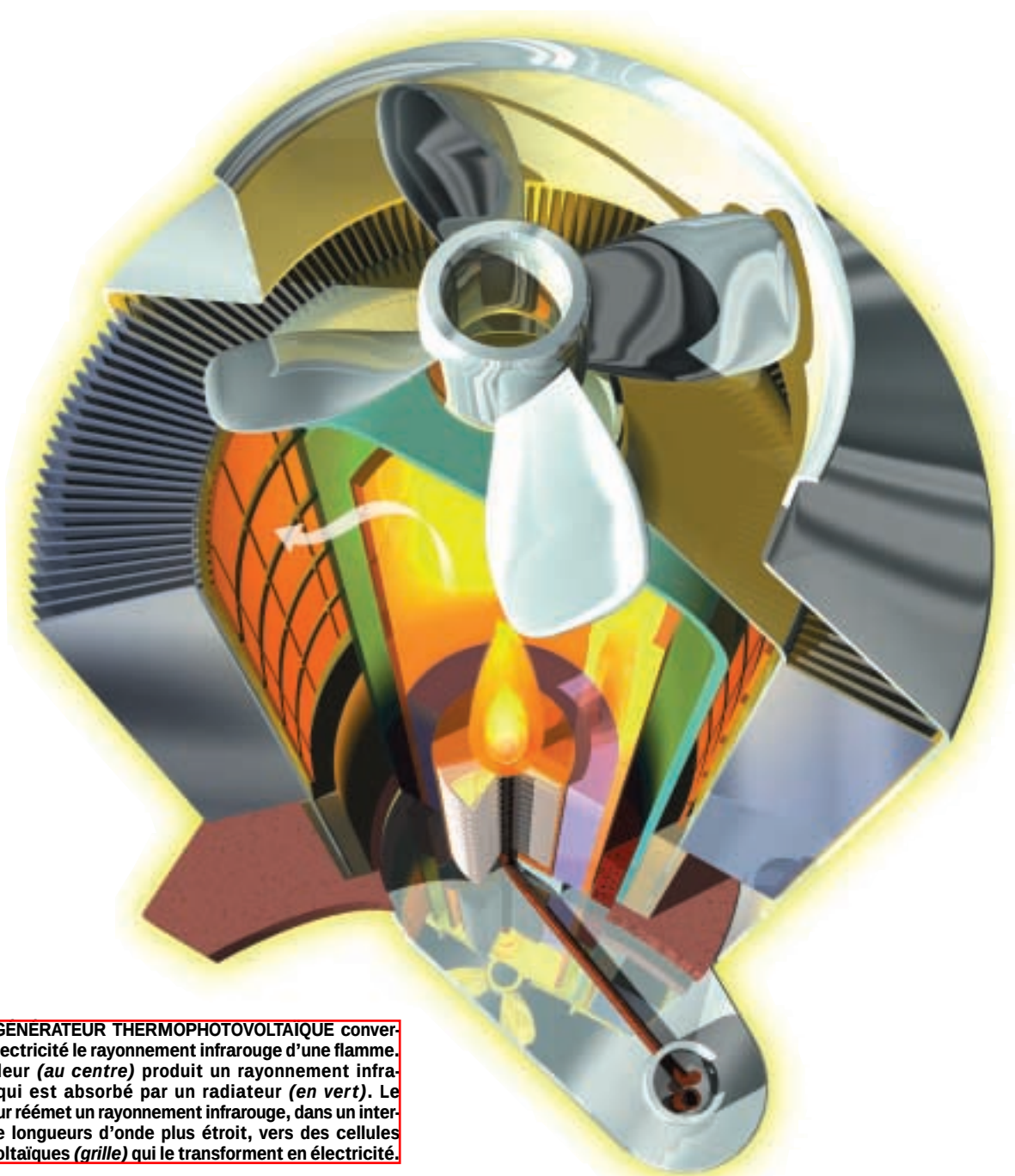
surface totale et ils sont portés à des températures supérieures à 1 000 °C.

Les éléments chauffés émettent de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge (qui chauffe les matériaux avec lesquels il interagit). Toutefois, ce rayonnement a des longueurs d'onde variées, et les intensités aux différentes longueurs d'onde varient beaucoup au cours du temps, en raison des instabilités de la flamme : aucune photopile ne peut les convertir efficacement en électricité. On interpose donc un radiateur qui absorbe le rayonnement émis par le brûleur et réémet un rayonnement d'énergie totale équivalente, mais concentré dans une gamme de longueurs d'onde plus étroite.

Ce radiateur est souvent une surface, plane ou arrondie, ou un réseau de minuscules filaments. Selon les matériaux qui le composent, il émet dans un intervalle de longueurs d'onde assez étroit (pour l'ytterbium, l'erbium et l'holmium) ou plutôt large (pour le carbure de silicium).

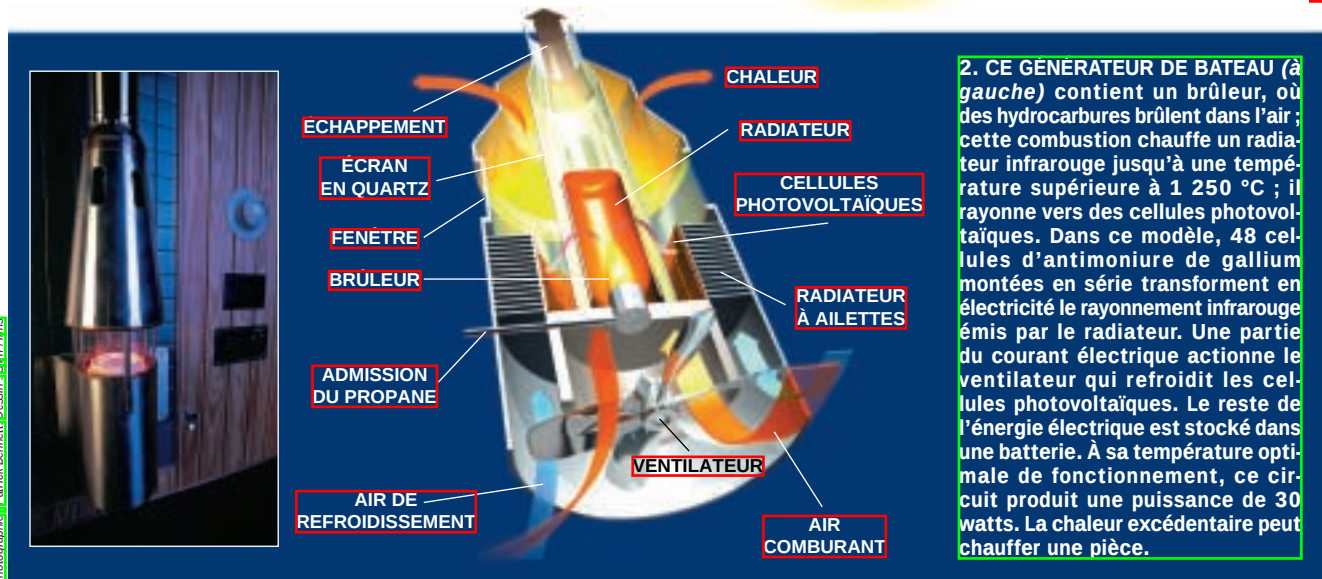
Les photopiles produisent de l'électricité si elles absorbent efficacement le rayonnement infrarouge provenant du radiateur. La caractéristique déterminante du matériau semi-conducteur qui compose les photopiles est sa « largeur de bande interdite », c'est-à-dire l'énergie que l'on doit fournir à un électron pour qu'il participe au courant électrique. Ainsi on doit choisir les semi-conducteurs pour que l'énergie des photons qui composent le rayonnement infrarouge (les photons sont les particules qui composent les rayonnements électromagnétiques) soit supérieure ou égale à la largeur de bande interdite (voir l'encadré de la page 92).

Idéalement, le radiateur devrait émettre des photons dont l'énergie est comprise dans un intervalle étroit, peu supérieur à la largeur de la bande



1. UN GÉNÉRATEUR THERMOPHOTOVOLTAÏQUE convertit en électricité le rayonnement infrarouge d'une flamme. Un brûleur (au centre) produit un rayonnement infrarouge qui est absorbé par un radiateur (en vert). Le radiateur réémet un rayonnement infrarouge, dans un intervalle de longueurs d'onde plus étroit, vers des cellules photovoltaïques (grille) qui le transforment en électricité.

51 1015 012



2. CE GÉNÉRATEUR DE BATEAU (à gauche) contient un brûleur, où des hydrocarbures brûlent dans l'air ; cette combustion chauffe un radiateur infrarouge jusqu'à une température supérieure à $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$; il rayonne vers des cellules photovoltaïques. Dans ce modèle, 48 cellules d'antimoniure de gallium montées en série transforment en électricité le rayonnement infrarouge émis par le radiateur. Une partie du courant électrique actionne le ventilateur qui refroidit les cellules photovoltaïques. Le reste de l'énergie électrique est stocké dans une batterie. À sa température optimale de fonctionnement, ce circuit produit une puissance de 30 watts. La chaleur excédentaire peut chauffer une pièce.

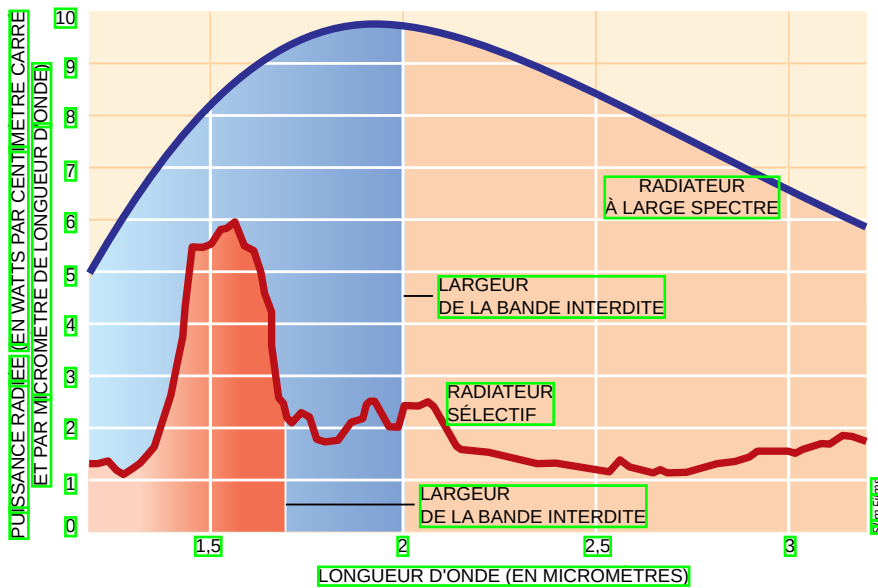
interdite du semi-conducteur : tous les photons seraient ainsi absorbés, et ils n'échaufferaient pas le semi-conducteur (un électron du semi-conducteur qui reçoit une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite cède rapi-

dement la différence au cristal sous forme de chaleur).

Les premiers générateurs thermophotovoltaïques associaient des radiateurs à spectre d'émission étroit, en oxyde d'ytterbium par exemple,

à des photopiles en silicium (dont l'énergie de bande interdite est de 1,14 électronvolt). Ils n'ont toutefois jamais été très puissants, car les radiateurs émettent trop peu de photons à l'énergie utile pour la conversion par le silicium (voir la figure 3) : il faut chauffer jusqu'à des températures de 2 000 °C pour que l'intensité de l'émission soit suffisante, ce qui endommage le matériau du radiateur et les autres éléments du système, réduisant leur durée de vie. Enfin, à ces températures élevées, le brûleur risque aussi d'émettre des oxydes d'azote, qui polluent l'atmosphère.

Aujourd'hui, on sait fabriquer des semi-conducteurs à bande interdite plus étroite, de 0,5 à 0,7 électronvolt (voir la figure 4), que l'on associe à des radiateurs à large spectre d'émission. Ces derniers, en carbure de silicium par exemple, fonctionnent efficacement à des températures inférieures à 1 000 °C.

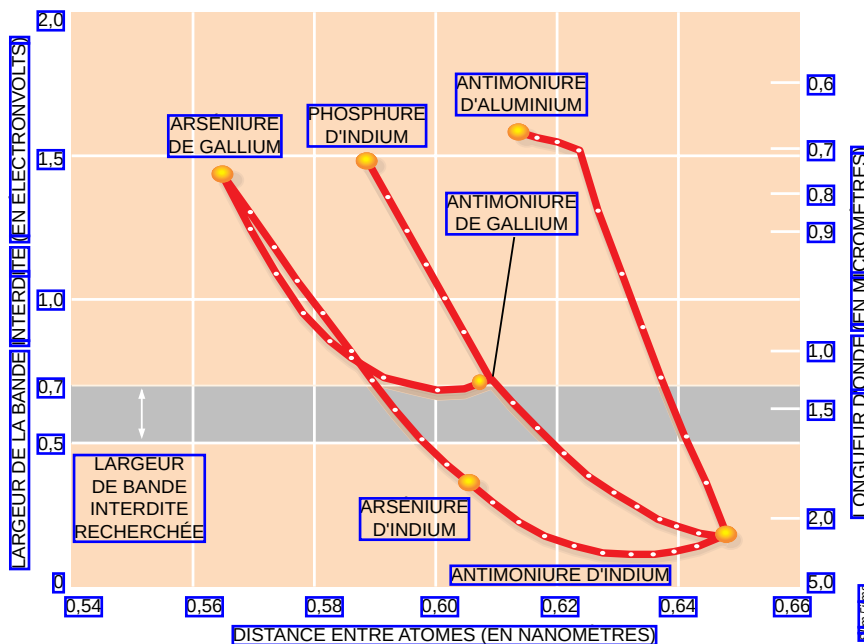


3. LES RADIATEURS émettent soit dans une bande étroite de longueurs d'onde (radiateurs sélectifs), soit dans un spectre plus large (radiateurs à large spectre). Les radiateurs sélectifs, fabriqués avec des éléments chimiques de la famille des terres rares, produisent moins de photons d'énergie égale ou supérieure à celle de la bande interdite du convertisseur semi-conducteur, ceux dont l'énergie est transformée en électricité (zone rouge). Au contraire, les radiateurs à bande large émettent plus d'énergie récupérable par le convertisseur photovoltaïque (en bleu). Les photons dont l'énergie est inférieure (à droite de la bande interdite) perdent leur énergie sous forme de chaleur.

La récupération des photons

Aucun générateur thermophotovoltaïque ne convertit toutefois toute l'énergie infrarouge en électricité : les photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite ne sont pas absorbés par le semi-conducteur. Leur énergie, transformée en chaleur, serait perdue si on ne les récupérait pas. On ajoute donc un réflecteur qui renvoie ces photons vers le radiateur, qu'ils contribuent à maintenir à la bonne température.

Plusieurs types de réflecteurs ont été proposés. Ainsi, une grille métallique placée devant le semi-conducteur ne laisserait passer que les photons d'énergie suffisante et réfléchirait les autres. On peut aussi placer une couche d'or à l'arrière du semi-conducteur : elle réfléchit les photons qui n'ont pas été absorbés. Pour éviter l'absorption de photons de faible énergie par le semi-conducteur, Scott Ward et Mark Wanlass, du Laboratoire américain des énergies renouvelables, ont construit une photopile en couche mince sur un substrat de phosphore d'indium semi-isolant, qui contient très peu d'électrons capables d'absorber. Les photons d'énergie inférieure à la largeur de la bande interdite de la photopile traversent ainsi le substrat avec un faible risque d'être absorbés, et la plupart atteignent la couche d'or, qui les réfléchit vers le radiateur.



4. DES ALLIAGES en diverses proportions (points sur les lignes rouges) de différents éléments des troisième et cinquième colonnes du tableau périodique des éléments ont des largeurs de bande interdite très différentes (la largeur de bande interdite est la quantité d'énergie qu'il faut fournir à un électron pour qu'il participe au courant électrique). Des largeurs de bande interdite comprises entre 0,5 et 0,7 électronvolt (en gris) sont idéales pour les générateurs thermophotovoltaïques et correspondent à des longueurs d'ondes infrarouges de plus en plus courtes du radiateur. Le calcul de la distance entre les atomes voisins (en abscisse) permet aux chimistes de mélanger des matériaux de structures cristallines différentes.

De nombreux laboratoires construisent des générateurs thermophotovoltaïques expérimentaux. Avec un radiateur qui fonctionne jusqu'à 1500 °C, on vise une puissance de trois ou quatre watts par centimètre carré de photopile.

Comment améliorer le rendement de conversion des photopiles? Avec des cellules à jonctions multiples, on devrait théoriquement atteindre des puissances de cinq à six watts par centimètre carré (à comparer avec les dix milliwatts par centimètre carré des panneaux solaires du commerce : l'énergie solaire est très diluée) ; en pratique, on a déjà obtenu plus de un watt par centimètre carré. Dans une cellule à jonctions multiples, on superpose des couches de semi-conducteurs différents, dont la largeur de bande interdite est de plus en plus petite à mesure que l'on pénètre dans le matériau : les photons de faible énergie traversent les premières couches, mais finissent par être absorbés par une couche de faible largeur de bande interdite, et le rayonnement

émis par les radiateurs à large spectre est ainsi mieux utilisé.

Le câblage des différentes cellules du générateur détermine les performances : le courant doit circuler dans les connexions avec le moins possible de pertes d'énergie. À terme, on espère fabriquer plusieurs cellules photovoltaïques sur une même plaquette de semi-conducteur, par les techniques utilisées en micro-électronique. Les coûts baisseront quand les procédés de fabrication en grande série seront au point.

Des voiliers aux verriers

Un premier générateur thermophotovoltaïque sera bientôt commercialisé : la Société JX Crystal proposera, à l'intention des marins, un appareil cylindrique, de 14 centimètres de large sur 43 centimètres de haut, alimenté avec du propane et qui produit une puissance électrique de 30 watts. Cet appareil chauffe aussi la cabine du bateau si on le souhaite. Le radiateur, en aluminate de magnésium, a un spectre

d'émission relativement large, et les cellules thermophotovoltaïques, en antimonure de gallium, sont montées en série. Plus coûteux (20 000 francs) qu'un groupe électrogène au diesel, il sera plus silencieux et plus fiable (il ne contient pas de partie mobile). Une version moins résistante à la corrosion, donc moins coûteuse, pourrait intéresser les propriétaires de camping-cars ou de maisons isolées.

Une société qui dépend du ministère américain de la Défense a aussi mis au point un prototype fonctionnant au gaz : un radiateur à spectre étroit en fibres d'oxyde d'ytterbium émet à la longueur d'onde de 980 nanomètres, et le rayonnement est converti en électricité par des photopiles en silicium. Un filtre multicouche isolant récupère l'énergie inutilisée. Des modules délivrent une puissance comprise entre 150 et 300 watts, suffisante pour l'alimentation d'un système de télécommunications ou d'ordinateurs.

Quel sera le succès industriel des générateurs thermophotovoltaïques?

L'effet photovoltaïque

L'effet thermophotovoltaïque utilise des matériaux semi-conducteurs qui produisent de l'électricité quand ils absorbent des photons. Dans un cristal semi-conducteur, l'énergie d'un électron ne peut prendre que les valeurs contenues dans des intervalles disjoints que l'on nomme bandes d'énergie. Parmi les bandes normalement occupées par des électrons, celle dont l'énergie est la plus grande, la bande de valence, est presque pleine d'électrons, qui participent à la cohésion du cristal : engagés dans des liaisons chimiques, ces électrons ne se déplacent que sur de courtes distances. La bande de valence est séparée de la bande d'énergie immédiatement supérieure, la bande de conduction, par une «bande interdite», inaccessible aux électrons. Lorsqu'un électron de la bande de valence reçoit une énergie au moins égale à la largeur de la bande interdite, il passe dans la bande de conduction et devient libre de se déplacer dans le cristal. Il laisse localement, derrière lui, une charge positive que l'on nomme trou et que l'on peut considérer comme une particule chargée positivement et capable de se déplacer dans le matériau.

Un cristal semi-conducteur parfait

contiendrait autant d'électrons dans la bande de conduction que de trous dans la bande de valence. En pratique, on ajoute des impuretés pour modifier la proportion de trous et d'électrons dans le cristal. Quand le semi-conducteur possède davantage d'électrons

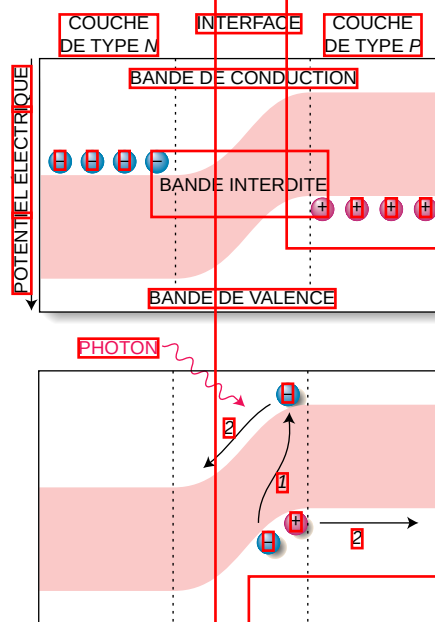
dans la bande de conduction que de trous dans la bande de valence, il est de type *n* (pour «négatif»). Dans le cas contraire, il est de type *p* (pour «positif»).

Quand on met en contact un semi-conducteur de type *n* avec un semi-conducteur de type *p*, on forme une jonction *n-p*. Les charges électriques libres, dans les deux matériaux (électrons du côté *n* et trous du côté *p*), se dirigent vers la jonction, où elles se recombinent en partie, laissant le cristal chargé électriquement de part et d'autre : ces charges créent une différence de potentiel à la jonction (voir la figure, en haut).

Quand un photon d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite est absorbé près de la jonction, il fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et engendre aussi un trou dans la bande de valence (voir la figure, en bas, 1). Le champ électrique qui règne à la jonction entraîne le trou vers le semi-conducteur de type *p* et l'électron vers le semi-conducteur de type *n* : un courant électrique apparaît (2).

Les cellules thermophotovoltaïques ont une largeur de bande interdite bien différente de celle des photopiles solaires.

Tandis que la largeur de bande interdite des matériaux utilisés pour ces dernières est de 1 à 1,5 électronvolt, elle atteint 0,5 à 0,7 électronvolt pour les cellules thermophotovoltaïques, qui absorbent ainsi efficacement le rayonnement infrarouge.



Ils pourraient d'abord occuper des niches, spécialisées mais lucratives. Ainsi, la récupération de la chaleur dissipée par de nombreux procédés industriels (fabrication du verre, de l'aluminium ou de l'acier) est un marché important. Dans l'industrie du verre, les deux tiers de l'énergie consommée sont aujourd'hui perdus en chaleur : pour l'ensemble des verriers, une puissance de un milliard de watts est ainsi gaspillée ! Les générateurs thermophotovoltaïques, en transformant cette chaleur en électricité, permettraient de substantielles économies. Dans le domaine des transports, on peut aussi imaginer que des véhicules électriques hybrides emportent, outre leur moteur à explosion, un convertisseur thermophotovoltaïque : un prototype a été présenté, avec un générateur de dix kilowatts.

Aujourd'hui, 100 à 250 millions de francs sont investis chaque année dans la mise au point de générateurs thermophotovoltaïques. Une étude de marché récente indique qu'ils rapporteraient trois milliards de francs en 2005, surtout grâce au remplacement des groupes électrogènes de moins de deux kilowatts utilisés par les militaires, et dans les camping-cars et les voiliers. D'autres utilisations apparaîtront sans doute ensuite, mais les évolutions sont imprévisibles : lorsqu'il fonda la Société IBM, Thomas Watson n'imaginait pas que l'informatique bouleverserait le monde.

Timothy COUTTS est chercheur au Laboratoire américain des énergies renouvelables. Mark FITZGERALD dirige la Société *Science Communications*.

Timothy COUTTS et John BENNER, *The First NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 321, AIP Press, 1995.

The Second NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de John Benner, Timothy Coutts et David Ginley, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 358, AIP Press, 1996.

The Third NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de Timothy Coutts, Carole Allman et John Benner, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 401, AIP Press, 1997.

Les beautés du monde microbien

ESHEL BEN-JACOB • HERBERT LEVINE

Les motifs des colonies de bactéries ou d'amibes ressemblent à ceux du monde minéral.

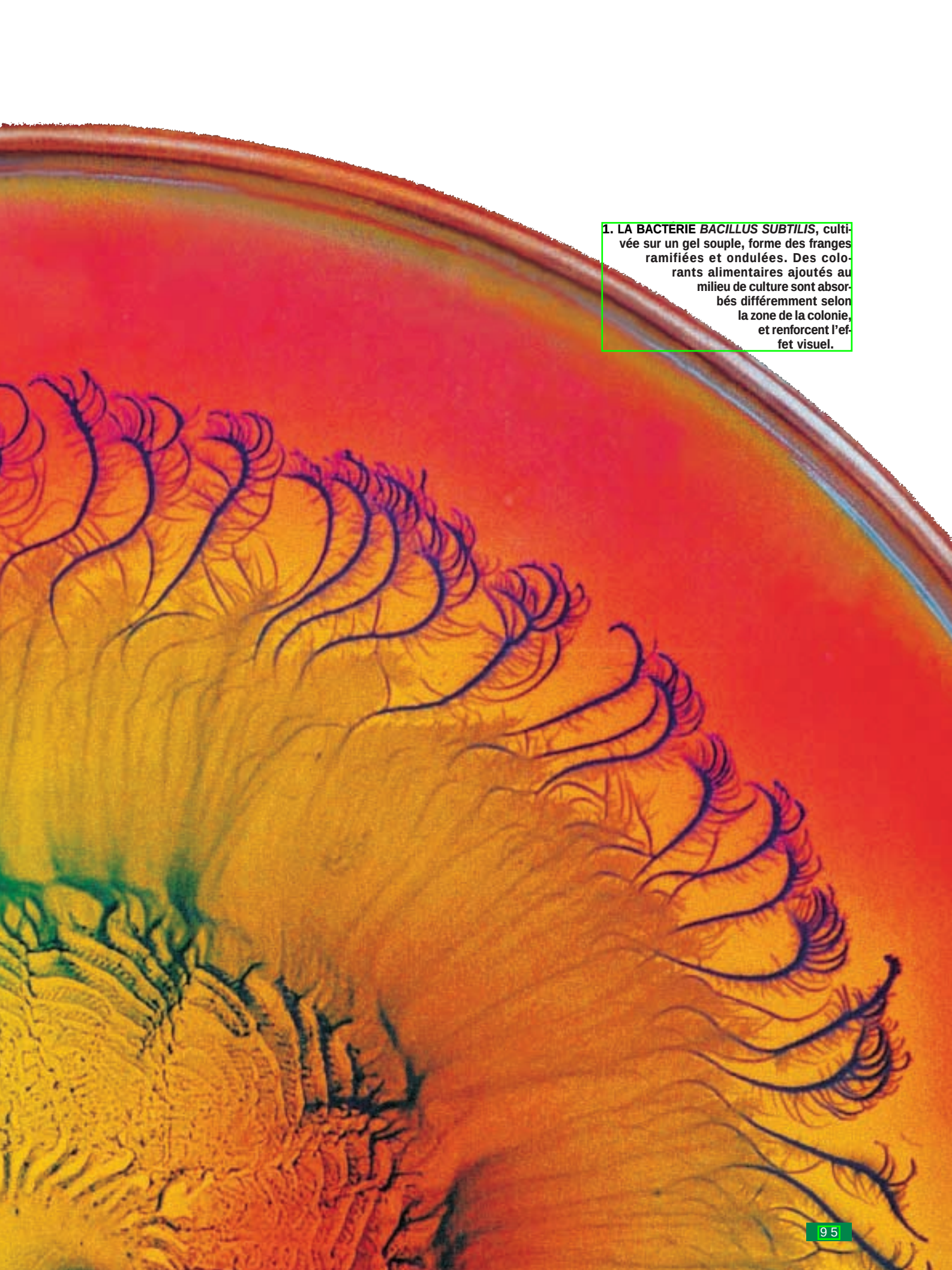
Au cours des dernières décennies, les physiciens ont élucidé les mécanismes de formation de structures telles que les cristaux de givre ou les flammes de bougie. Le givre sur une vitre froide, par exemple, se forme par l'agrégation de molécules d'eau : elles se déplacent au hasard dans l'air d'une pièce chaude ou à la surface du verre et se fixent, au gré des rencontres, sur un cristal naissant. Les parties saillantes du cristal, plus accessibles, se développent plus que les autres, et l'orientation des molécules d'eau déjà cristallisées impose la disposition des nouvelles venues : le cristal adopte spontanément une structure ramifiée.

Les physiciens qui ont observé les colonies de micro-organismes ont été surpris de retrouver des motifs comparables à ceux du givre et d'autres structures formées par le jeu des seules forces physico-chimiques. Parfois, cependant, ces colonies ont des structures plus complexes que celles des cristaux, parce que les micro-organismes ont une propriété que les molécules n'ont pas : la vie. L'exploration des formes que prennent les colonies bactériennes révèle souvent des capacités d'adaptation étonnantes à des milieux hostiles.

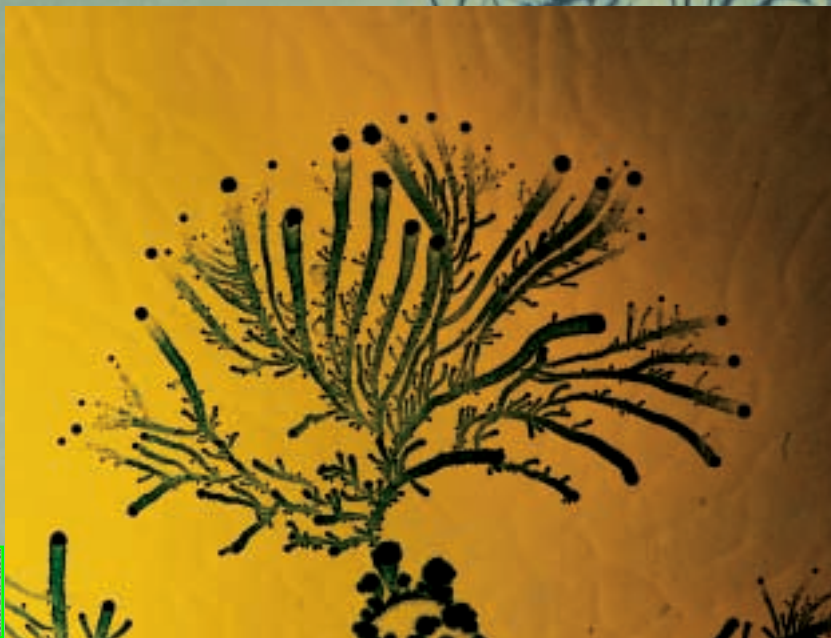
À la fin des années 1980, Mitsugu Matsushita et ses collègues de l'Université Chou, à Tokyo, ont montré que les bactéries *Bacillus subtilis* forment des colonies ramifiées quand le gel

Suite page 101



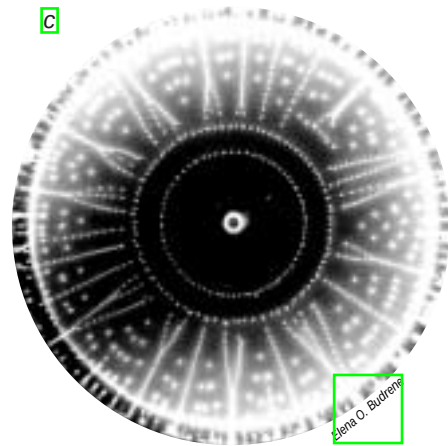
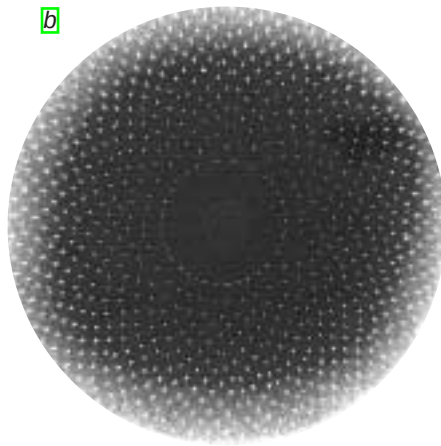
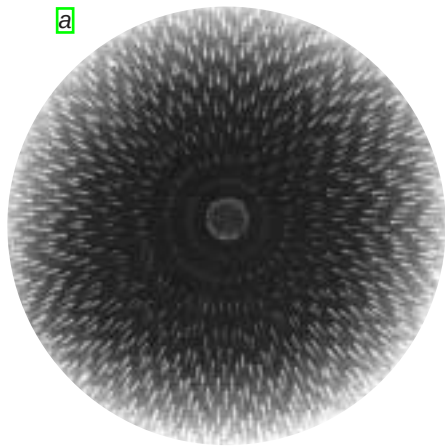
A petri dish containing a bacterial culture of Bacillus subtilis on a soft agar medium. The culture is characterized by wavy, branched, and undulating fringes that spread across the surface. The medium is stained with food dyes, showing a color gradient from red at the top to yellow and green at the bottom, with the bacterial growth following these color zones.

1. LA BACTERIE *BACILLUS SUBTILIS*, cultivée sur un gel souple, forme des franges ramifiées et ondulées. Des colorants alimentaires ajoutés au milieu de culture sont absorbés différemment selon la zone de la colonie, et renforcent l'effet visuel.

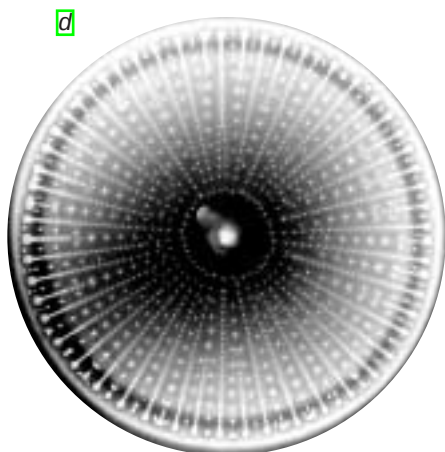


2. UNE SOUCHE DE *BACILLUS SUBTILIS* a été cultivée sur un milieu à deux densités. Sur un gel dur, la colonie est ramifiée (*en bas*) ; sur le milieu souple, un motif plus fin, plus frisé, plus enchevêtré apparaît (*en haut*). Cette structure se forme parce que les bactéries s'allongent et se déplacent rapidement, en tournant vers la droite (sans doute parce que les flagelles qui propulsent chaque

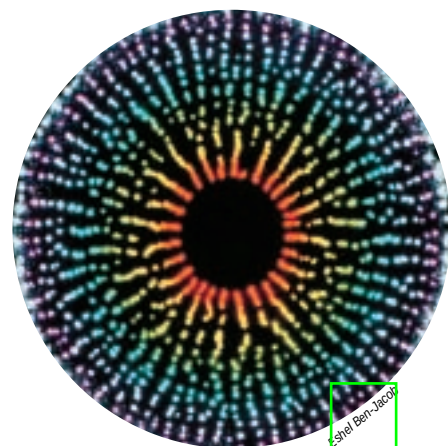
bactérie sont asymétriques). Dans un gel extrêmement dur, *Bacillus subtilis* s'aggrave et forme des petits disques compacts, qui se déplacent en tournant sur eux-mêmes. L'effet est comparable à celui d'une scie circulaire. Grâce à la coopération de ses membres, la colonie se déplace, trouve de la nourriture et se développe (*encart*). La «scie» est le disque noir au bout de chaque branche.



Genia O. Budrene



3. EN PRÉSENCE de substances nutritives ou d'agents de stress, les bactéries *Escherichia coli* (a, b) ou *Salmonella typhimurium* (c, d) sécrètent des substances chimiques attractives et s'organisent. Les colonies forment des réseaux réguliers de disques ou de raies. On retrouve ces motifs quand on reproduit par ordinateur le déplacement des bactéries (à droite) : les bactéries virtuelles se déplacent vers les zones riches en signaux chimiques.



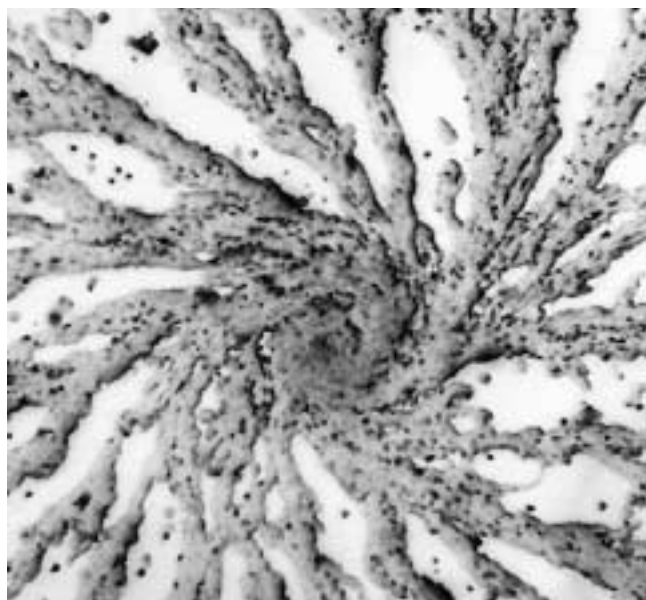
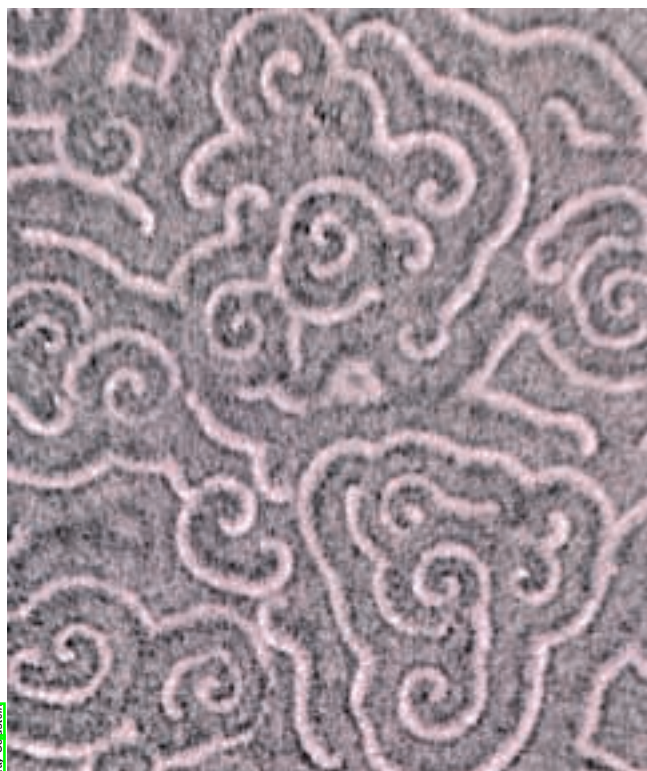
Shel Ben-Jacob



4. UNE COLONIE DE BACTÉRIES *Escherichia coli* cultivée sur un gel dur présente des anneaux concentriques. Alors, les bactéries ne se déplacent alors pas ; elles se propagent uniquement par division cellulaire. Les anneaux révèlent une activité métabolique périodique : ici, on a coloré en bleu les produits d'une réaction enzymatique.

James A. Shapiro





6. LES CELLULES «AFFAMÉES» de *Dictyostelium discoideum* forment des motifs étoilés qui émettent finalement des spores. Les amibes sécrètent tout d'abord des signaux chimiques (AMPC) qui s'organisent en vagues spirales. Les cellules sont repoussées, elles se déforment et perdent leurs pseudopodes (équivalant à des pieds). Les vagues de substances chimiques sont observées au microscope en champ sombre.

d'agar-agar (extrait des algues) sur lequel on les cultive contient peu de substances nutritives. Elles se développent selon les mêmes principes que le givre. Une bactérie immobilisée par un gel trop dur ne reçoit que les éléments nutritifs qui diffusent dans le gel. Seules les bactéries en bordure de colonie captent alors les substances nutritives, doublent de volume, puis se divisent : l'extrémité de la colonie se ramifie. Sur un gel plus souple, les bactéries se déplacent, elles se dirigent vers les régions plus riches en nourriture, c'est-à-dire vers l'extérieur de la colonie. Dans ce cas aussi, des branches se forment, mais la croissance est bien plus rapide.

L'un de nous (E. Ben-Jacob) a étudié les influences du milieu sur la morphologie des colonies de bactéries (voir la figure 2). Cultivée sur un milieu souple, une colonie adopte spontanément un motif frisé, ondulé et à croissance rapide. Les bactéries

sont alors individuellement plus longues et plus mobiles, mais le mécanisme de la transition entre les colonies ramifiées et les colonies ondulées reste un mystère.

Si certaines bactéries s'adaptent ainsi à leur environnement, d'autres le modifient par les actions individuelles qui déterminent le comportement collectif. Par exemple, les colonies de bactéries *Escherichia coli* parviennent à s'agréger parce qu'elles émettent des molécules qui servent de signaux chimiques. En cas de stress, les colonies de bactéries ne survivent que par les mutants mieux adaptés.

Les amibes ont des comportements collectifs encore plus remarquables. Ces organismes unicellulaires sont plus évolués et plus résistants que les bactéries. Ils ont un noyau et des structures intracellulaires spécifiques qui leur permettent de réagir au stress par des mécanismes sociaux.

Dictyostelium discoideum est l'amibe favorite des biologistes qui étudient les regroupements cellulaires et la formation d'organismes pluricellulaires. Après environ quatre heures sans nourriture, elle sécrète une molécule qui sert de signal : l'AMPC (l'adénosine monophosphate cyclique). Lorsqu'une amibe détecte la présence de cette molécule par ses récepteurs spécifiques, elle en sécrète

à son tour une quantité supérieure. L'information, amplifiée au fur et à mesure, se propage rapidement : des vagues spirales d'AMPC envahissent le milieu de culture. En réaction, les amibes se déplacent vers le centre de la spirale la plus proche, rencontrent d'autres cellules et forment un motif étoilé (voir la figure 6). Avec David Kessler, de l'Université Bar-Ilan, en Israël, l'un de nous (H. Levine) a montré que ces motifs sont indépendants de la nature biologique des amibes ; elles ne sont que le résultat de lois physiques. Finalement, les amibes se regroupent en masses qui émettent des spores ; ceux-ci resteront dormants tant que le milieu sera hostile.

Les biologistes utilisent aujourd'hui des techniques biochimiques et génétiques pour comprendre l'influence de signaux extérieurs sur le déplacement des cellules. L'élucidation des lois microscopiques du comportement collectif des microorganismes est un travail redoutable, mais l'étrangeté des motifs microbiens stimulera les chercheurs encore longtemps.

Eshel BEN-JACOB est professeur à l'Université de Tel-Aviv. Herbert LEVINE est professeur de physique à l'Université de San Diego.



Écritures sous contraintes

JEAN-PAUL DELAHAYE

La combinatoire, l'arithmétique et l'algèbre rencontrent la langue française.

Un bon article mathématique est bien écrit : l'objectif recherché est clairement annoncé et placé dans le contexte des travaux déjà publiés qui sont brièvement rappelés ; les énoncés sont formulés avec précision et concision ; les démonstrations sont agencées minutieusement pour qu'on y perçoive instantanément les points délicats et les idées nouvelles ; les perspectives à venir sont évoquées pour conclure. Un bon mathématicien a du style, ses théorèmes sont élégants et ce qu'il dévoile du monde abstrait est joliment décrit. Les informaticiens aussi sont des écrivains : un programme ne peut être bon que s'il est parfaitement écrit et aucune méthodologie de programmation, comme le monde industriel en recherche depuis trente ans, ne dispense du talent littéraire nécessaire en informatique.

Un autre lien entre littérature et mathématiques inverse le précédent : au lieu de demander au mathématicien d'être écrivain, il suggère à l'écrivain d'utiliser les mathématiques pour les cacher dans ses textes et en nourrir son art. En imposant une architecture, combinatoire, arithmétique, algébrique, logique ou même géométrique, l'écrivain enrichit ses textes et y insère une part de la beauté des structures mathématiques. La contrainte peut rester cachée et habiter le texte à l'insu du lecteur, lui procurant une impression étrange qui n'est dévoilée que lorsque le secret est identifié. La contrainte peut être manifeste et alors son irruption dans la conscience du lecteur lui fait ressentir avec force que le sens se construit sur un support où le jeu ouvre des possibilités illimitées à l'auteur et procure des plaisirs subtils au lecteur.

L'exercice n'est pas nouveau. L'alexandrin, avec sa contrainte métrique de 12 pieds, et plus généralement le poème rimé, sont des exemples de contraintes formelles si anciennes qu'on ne réalise pas que les carcans arithmétiques qu'ils imposent sont arbitraires et susceptibles de variations nombreuses.

1. PLAINTÉ D'UNE FEMME DÉCUE

L'hommage de leurs vers qu'à
l'envi les poètes
À la femme déçue offrent toujours
ardent
Flatte certes le but, mais n'apaise la
quête :
L'attente a des plaisirs qu'on ne fait
qu'un moment.

Aussi, jouet des vents qui l'hiver me
rudoient,
Sur des talus où vont se fanant mes
appas,
En un dense réduit où je n'ai point
de joie,
Veux-je conter ce don que Thyrsis
bafoua.

Las ! le pâle Thyrsis avait la mine
austère :
Le sentant sur le banc près d'elle un
peu tarder
L'amante bien des fois lui fit en vain
la guerre
Ferme et froid cependant jamais il
ne doutait.

Pour voir se dénouer ce vœu, que
de tendresse !
Que, docile à sa voix et promise à
son lit,
J'eusse aimé dans ses bras
m'adonner à l'ivresse !
Mais le vin que j'offrais jamais ne le
conquit.

Ses doigts pouvaient jouer aux fous
entre mes tresses,
Du vent hardi parfois copiant les
effets :
Il fallait à mon but, d'autres riens,
des caresses
Moins lourdes dont mon goût se fût
mieux satisfait....

Depuis 1960, le mouvement littéraire l'OULIPO (Ouvroir de littérature potentielle) s'est donné pour objet l'invention, l'étude et la pratique des jeux mathématiques avec le langage. Si la systématisation de l'OULIPO est nouvelle, on trouve des traces de cette activité loin en arrière dans le temps : de nombreux auteurs ont pratiqué ces exercices, et les grands rhétoriciens du Moyen Âge y étaient passés maîtres.

ANTISTROPHES...

Tout le monde connaît la contrepèterie, où quelques permutations de syllabes ou de lettres dans une phrase anodine en font apparaître une autre qu'il aurait été malséant d'écrire ou de prononcer. Même si l'on peut trouver des exemples de contrepèteries dans certains textes latins, il semble qu'elles sont fortuites, et l'on doit attribuer l'invention de cet art à Rabelais (il appelait cela des antistrophes). Dans son œuvre, on trouvera par exemple : «Goûtez-moi cette farce», «Cette femme est une lieuse de chardons». On peut se demander si le poète plus récent qui aimait le «son du cor au fond des bois» ne nous a pas adressé un clin d'œil.

Le chef-d'œuvre du genre a paru il y a quelques années dans *Le canard enchaîné* (qui, chaque semaine, propose quelques créations nouvelles dans *L'album de la comtesse*, écrit par le scientifique maître du genre, Joël Martin, le titre de la rubrique étant lui-même une contrepèterie bien cachée). Le chef-d'œuvre anonyme dont nous donnons un extrait ci-contre est cité dans le merveilleux livre de Claude Gagnière *Pour tout l'ordre des mots* (Collection Bouquins, Robert Laffont, Paris, 1996, page 26). À la contrainte déjà difficile d'inclure une contrepèterie dans chaque ligne, notre expert a ajouté celle de l'alexandrin, contrainte accompagnée, bien sûr, de celle des rimes. On remarquera la cohérence du thème du récit apparent et celle, non moins étonnante, du récit caché.

LIPOGRAMMES

Un autre jeu formel avec les lettres d'un texte est le lipogramme, où l'on s'interdit... d'en utiliser une. Il est facile bien sûr de faire un lipogramme en s'interdisant la dernière lettre de l'alphabet (ce

paragraphe en est un!). En revanche, le lipogramme en e est exercice de virtuose.

L'exploit le plus fantastique est celui de Georges Perec qui, dans son roman *La disparition* (Éditions Denoël, 1969), raconte l'histoire de la disparition d'un rond pas tout à fait clos finissant par un

trait horizontal». L'éditeur, dont le nom comporte un e, l'auteur lui-même, dont les nom et prénom en contiennent quatre, ne souhaitaient cependant pas rester anonymes, malgré la noblesse de l'enjeu. Aussi utilisèrent-ils un subterfuge : dans les premières et les dernières pages

2. IDENTIFIEZ LES CONTRAINTES CACHÉES DE CES TEXTES**1. Lettre d'Alfred de Musset à George Sand**

Quand je mets à vos pieds un éternel hommage
Voulez-vous qu'un instant je change de visage ?
Vous avez capturé les sentiments d'un cœur
Que pour vous adorer forma le Créateur.
Je vous chéris, amour, et ma plume en délire
Couche sur le papier ce que je n'ose dire.
Avec soin, de mes vers lisez les premiers mots
Vous saurez quel remède apporter à mes maux

Réponse :

Cette insigne faveur que votre cœur réclame
Nuit à ma renommée et répugne à mon âme.

2. D'un auteur inconnu

Quand Adam fut créé, tout seul il s'ennuya
Dans de vagues pensées trop souvent absorbé.
Il suppliait son Dieu de les faire cesser.
Dieu crut à ses désirs devoir enfin céder,
L'homme en fut pour sa côte... Ève alors fut créée.
Elle était séduisante et belle au premier chef.
Depuis la Création, la race a peu changé,
Et de plaire et séduire, elle s'est fait la tache
À force de l'aimer, le monde s'arrondit,
L'amour, ce doux plaisir, cette douce magie,
Ne donnait que bonheur et jamais de tracas.
La femme était constante et le mari fidèle
Que faire ? Ils étaient seuls... il faut bien que l'on s'aime
Pas de rivaux d'amour, pas d'ennuis, pas de haine.
Oh ! c'était le beau temps des plaisirs du repos.
Tandis que, de nos jours, on voit l'homme occupé
Courbant sous le destin, par le besoin vaincu.
Et pour qui le travail, devenu nécessaire,
S'assied à son chevet, le poursuivant sans cesse.
Eh bien soit ! travaillons... et vive la gaieté !
Que jamais le chagrin ne nous trouve abattu.
J'ai vu soixante hivers, je pense avoir trouvé
Des amis que je tiens en réserve au beau fixe.
Croyez à ce bonheur : comme moi, croyez-y,
Et qu'un Dieu protecteur nous soutienne et nous aide.

3. Travaux de l'OULIPO

La divinité s'amuse de la timide habitude de rêver une
petite minute, de-ci, de-là, sur une lame marine. L'alizé te
ramènera du pâle horizon à la sévérité de ce rivage
coloré : salut, ami revenu.

4. De Davis Massot

A Noël elle te traqua la carte telle Léona

5. De George Perec

La belle absente
Inquiet, aujourd'hui, ton pur visage flambe.
Je plonge vers toi qui déchiffre l'ombre et
La lampe jusqu'à l'obscur frange de l'hiver :
Quêtes du plomb fragile où j'avance, masque
Nu, hagard, buvant ta soif jusqu'à accomplir
L'image qui s'efface, alphabet déjà évanoui.
L'étrave de ton regard est champ bref que je
Dois espérer, la flèche magique, verbe jeté
Plain-chant qu'amour flambant grava jadis.

6. De Louise de Vilmorin

Abbaye, abbaye !
J'ai assez cédé, aimé et obéi
Et double vécu et rêvé et fui.
Ogive et émaux et miel et mer
Abbaye, Abbaye !
Hélène aima et fit grec et la chair et l'été !

7. De Noël Arnaud

Elle ici
Clé Celée
Cil lié
Le ciel Clic

8. De Paul Braffort

La lave est jetée là, sur lui, à côté, là ; la côte a lui sur la
jetée Est : lave-là !

Solutions :
1. Lisez les premiers mots des vers.
2. La dernière syllabe de chaque vers égraine l'alphabet
A, B, C, D ... Z (soit le W)
3. Alternance de voyelles et de consonnes
4. Palindrome
5. En mettant à part les cinq lettres les moins utilisées
dans la langue française (K W X Y Z) on découvre que
toutes les lettres sauf le "c" sont utilisées dans la
première ligne, que toutes sauf le "a" sont utilisées dans
la seconde, etc. le tout composant le prénom Catherine.
6. Tout le texte peut se lire en prononçant des lettres :
A.B.I.A.B.I.G.A.C.C.D.M.E.O.B.I.E.W.Q.R.E.V.F.U.I.
O.J.V.M.O.M.I.L.M.R.A.B.I.A.B.I.L.N.M.A.F.Y.L.H.R.
L.E.T
7. Seules les quatre lettres E L I C sont utilisées.
8. Il s'agit d'un palindrome de mots.

du roman, les passages imprimés en encre rouge utilisent librement la lettre e.

Plus récemment, l'exercice a été pratiqué par Pascal Kaeser dans son livre *À l'assaut du Snark. Jeux d'écriture* (Diderot, collection "La règle et le compas", Paris, 1998) où il donne la traduction en français et sans e du célèbre texte de Lewis Carroll *La chasse au snark*, dont nous citons le début :

A l'assaut du Snark

Introduction à la traduction qui suit.

Louis Carroll, qui naquit Charly Dogson, fut un as du pari fou, du discours tordu, du calcul savant. Il fut aussi un pion à Oxford, mais passons ! Son plus important travail fut la composition d'Alicia au pays du Lapin blanc, roman qui nous a tous ravis, du marmot sans raison au barbon qui faiblit. Aurait-il souri s'il avait pu voir son Snark traduit dans français dont on a banni l'attribut occupant un rang cinq sur vingt-six dans l'abc ? Souhaitons qu'un mandat aussi affolant lui aurait plu...

PANGRAMME, ACROSTICHE ET INSCRIPTION

Le pangramme est l'inverse du jeu de l'évitement d'une lettre : la règle impose d'utiliser toutes les lettres de l'alphabet dans un texte aussi court que possible. C'est un art tout aussi délicat, qui a d'autres fins que l'amusement, puisque l'on utilise les pangrammes pour tester les polices de caractères d'imprimerie ou pour créer des exercices de dactylographie. Le plus connu est :

Portez ce vieux whisky au juge blond qui fume

L'intérêt du whisky se comprend aisément. On le retrouve dans :

Peux-tu m'envoyer du whisky que j'ai bu chez le forgeron ?

Toujours jouant avec les lettres, l'acrostiche (la première lettre de chaque mot ou de chaque vers d'un poème en

donne une clef) lui aussi est un jeu ancien que François Villon (1431-1463) utilisa pour signer plusieurs ballades (on ne distinguait par les lettres i et j à cette époque) :
*Vous portâtes, digne Vierge, Princesse,
 Jésus régnant qui n'a ni fin ni cesse,
 Le Tout-Puissant, prenant notre faiblesse
 Laissa les Cieux et nous vint secourir,
 Offrit à Mort sa très claire jeunesse
 Notre Seigneur, tel est, tel le confesse :
 En cette foi, je veux vivre et mourir.*

L'acrostiche peut-il être involontaire ? À vous d'en juger en considérant ces vers tirés de l'acte IV d'*Horace* de Corneille :
S'attacher au combat contre un autre soi-même

Attaquer un parti qui prend pour défenseur

Le frère d'une femme et l'amant d'une sœur

Et, rompant tous ces nœuds, s'armer pour la patrie

Contre un sang qu'on voudrait racheter de sa vie

*Une telle vertu n'appartenait qu'à nous ;
 L'éclat de son grand nom lui fait peu de jaloux...*

L'inscription dans une phrase d'un nombre (le plus souvent une date) est une façon d'y cacher une information ou de lier la phrase à un événement. Voyons un exemple de cette imbrication arithmétique (provenant du livre de Claude Gagnière déjà cité).

En 1675, Alphonse de Vignoles, au moment même où il tentait de mettre le feu à une abbaye objet de sa colère, mourut écrasé par son cheval. Son épitaphe *FALLAX EQVVS AD SALVTEM* (C'est à un cheval perfide que je dois mon salut) est un chronogramme. On ne retient que les lettres utilisées dans l'écriture des chiffres romains, LLXVVDLVM, on les replace en ordre MDLLXVVV, ce qui fait 1675 (rappelons que le M vaut mille, le D cinq cents, le L cinquante, le X dix, le V cinq et le I un).

AIDE-MÉMOIRE

Cela nous conduit directement aux contraintes formelles ayant pour fonction un codage mnémotechnique. Tout le monde connaît le fameux :

Que (3) j' (1) aime (4) à (1) faire (5) apprendre (9) un (2) nombre (6) utile (5) aux (3) sages (5)..., où le nombre de lettres de chaque mot code les décimales du nombre π .

On sait moins que ce jeu a été pratiqué dans presque toutes les langues. Antreas Hatzipolakis s'est amusé à collectionner plusieurs dizaines de ces poèmes mnémotechniques qu'il a réunis dans un recueil, intitulé *Piphilology*, que vous pourrez consulter à l'adresse internet : <http://www.unipissing.ca/topology/z/a/a/a/26.html>

Le nombre $e = 2,71828...$ a aussi ses adeptes qui, en anglais, ont créé : *To express e remember to memorize a sentence to simplify this*, qui n'est peut-être que la traduction du peu connu texte français : *Tu aideras à rappeler ta quantité à beaucoup de docteurs amis*.

Parmi une multitude d'autres phrases utilisées par les écoliers pour retenir les règles de grammaire (« mais où est donc Ornicar ? ») ou autres, voici la phrase « Monsieur, vous tirez mal - je suis un novice pitoyable » dont l'initiale de chaque mot donne dans l'ordre des planètes : Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton.

LES PALINDROMES

Le jeu mathématique devient plus ardu avec le palindrome : une phrase ou un mot invariant par inversion de l'ordre des lettres. Le français comporte bien quelques mots palindromes : ressasser, essayasse, radar, snobons, retâter, kayak, rotor, erre, sanas, sèves, sexes, selles, gag, non, tôt, solos, tâtât, sèmes, rotavator et quelques autres, mais aucun n'égale celui de vingt lettres que les Finlandais ont la chance de posséder : *siappuakiviikauppa*, qui veut dire marchand de savon. Il existe aussi des mots *Janus* qui ont deux significations, à l'en-droit et à l'envers, comme Léon et Noël.

Le palindrome peut être musical et Joseph Haydn composa une symphonie (n° 47) intitulée *Le Palindrome* dont le nom est justifié par le troisième mouvement dont les dix dernières mesures s'obtiennent en inversant les dix premières. Le canon Cancrizans de L'offrande musicale de Jean-Sébastien Bach est une forme de palindrome musical : la seconde voix est identique à la première lue à l'envers.

3. CANON DE L'OFFRANDE MUSICALE DE BACH



Le canon Cancrizans de Jean-Sébastien Bach. L'utilisation de contraintes combinatoires est commune en musique. Jean-Sébastien Bach s'y est souvent adonné. Ici la seconde voix du canon est exactement identique à la première, mais jouée de droite à gauche.

Nul n'égale l'exploit de Georges Perec (membre de l'OULIPO), qui réussit à écrire un palindrome de 5 000 mots dont voici le début... et la fin.

Trace l'inégal palindrome. Neige. Bagatelle, dira Hercule. Le brut repentir, cet écrit né Perec. L'arc lu pèse trop, lis à vice versa. Perte. Cerise d'une vérité banale, le Malstrom, Alep, mort édulcoré, crêpe, porté de ce désir brisé d'un iota (...) À toi, nu désir brisé, décédé, trope percé, roc lu. Détrompe-la. Morts : l'Âme, l'Élan abêti, revenu. Désire ce très pas rêvé : ci va ! S'il porte, sépulcral, ce repentir, cet écrit ne perturbe le lucre : Haridelle, ta gabegie ne mord ni la plage ni l'écart.

On doit pouvoir écrire des programmes informatiques qui soient des palindromes (et qui fassent quelque chose d'intéressant). Je n'en ai jamais rencontré : un lecteur saura-t-il en produire un ?

PERMUTATIONS ET ANAGRAMME

La permutation des lettres d'un mot ou d'un nom ou d'une phrase peut en donner d'autres, c'est ce qu'on appelle les anagrammes. Tout le monde connaît celui de Salvador Dali : *Avida Dollars*. Vincent Auriol, qui fut le premier président de la IV^e République, possédait un nom qui permettait de nombreux anagrammes et qui tous avaient l'injuste objet de le tourner en dérision : *Voilà un crétin ; Ô inculte ravin ; Il court en vain ; Un certain viol*.

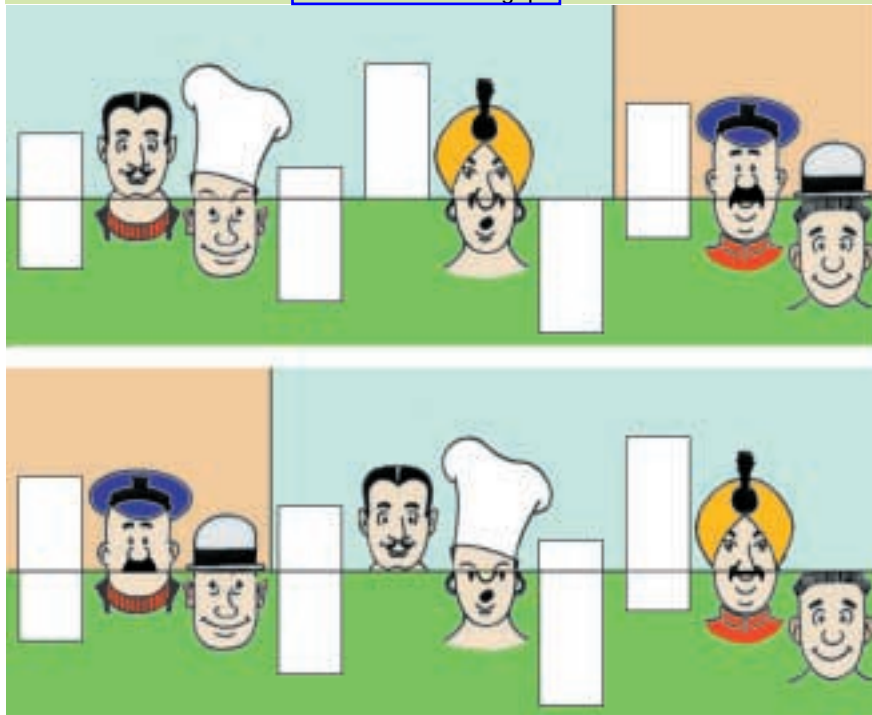
Un poème entier dont chaque vers est l'anagramme du titre *Rose au cœur violet* fut composé par Nora Mitrani et Hans Bellmer. Voici les premiers vers :

*Se vouer à toi, ô cruel
À toi, couleuvre rose
Ô vouloir être cause !
Couvre-toi, la rue ose
Ouvre-toi, ô la sucrée !
Va ou surréel côtoie
Ô l'oiseau crève-tour
Vil os écœura route
Cœur violé osa tuer ...*

MULTIPLICATION MAGIQUE

Combiner des textes pour en obtenir de nouveaux sans trop se fatiguer est tentant. Jean Meschinot (1415-1491) a publié une «Litanie de la Vierge» composée de huit décasyllabes formés d'hémistiches syntaxiquement indépendants. En permutant des hémistiches de même longueur tout en respectant le système des rimes *a b a b b c b c*, qui fonctionne aussi pour les rimes intérieures, on obtient des litanies distinctes. Jacques Roubaud, en 1973, en a dénombré 36 864.

4. L'interversion magique



La princesse Aztèque

Tandis qu'en frissonnant elle	égrenait des vers
Serrait sa souveraine une blonde	L' Aztèque imperturbable à la touque imprécise
D'un lien	aux yeux verts
Dans l'Ouest enfoui dit-elle à son amant	libidineux que la froidure attise
C'est là que l'art	pervers,
Et que la pyramide abolit l'univers !	jaillit, que l'Inca prosaïse,
Nul n'entend le muet qui	tout doucement s'enlise..

Comme l'infatigable apion	déblatérât
Jeune	ami présomptueux plus fou qu'il ne paraît,
N'offre pas de pactole à ton gardien	farouche
Si le verbe	à la fois oppresseur et charmant
D'un tel triomphateur ne trouble le diamant	
Même Xipe Totec	fuit et détruit sa souche

Tandis qu'en frissonnant elle	déblatérât
Serrait sa souveraine une blonde	L' ami présomptueux plus fou qu'il ne paraît,
D'un lien	farouche
Dans l'Ouest enfoui dit-elle à son amant	à la fois oppresseur et charmant
C'est là que l'art	fuit et détruit sa souche.
Et que la pyramide abolit l'univers	
Nul n'entend le muet qui	égrenait des vers

Comme l'infatigable apion	Aztèque imperturbable à la touque imprécise
Jeune	aux yeux verts
N'offre pas de pactole à ton gardien	libidineux que la froidure attise
Si le verbe	pervers,
D'un tel triomphateur ne trouble le diamant !	jaillit, que l'Inca prosaïse,
Même Xipe Totec	tout doucement s'enlise...

L'alexandrin disparu. En 1896, Sam Loyd inventa un paradoxe géométrique présenté sous la forme d'un puzzle où l'on intervertit deux cartes : les cinq personnages du premier arrangement en donnent six. Claude Berge, sur le même principe, proposa la transformation d'un sonnet classique de 14 alexandrins en une ode de 15 alexandrins.

5. LE PROBLÈME DE KIRKMAN (1847)

Ce problème est un grand classique. Une maîtresse d'école accompagne chaque jour ses 15 élèves (désignés par a, b, c, ...) en promenade. Ceux-ci doivent être disposés en 5 rangées de 3, de sorte que, pendant 7 jours consécutifs, aucun élève ne soit plus d'une fois avec un de ses camarades dans une même rangée. Comment procéder? Solution.

Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
afk	abe	bcf	efi	cek	egm	kmd
bgl	cdg	deh	ghk	dfi	fhn	lne
chm	hil	ijm	lma	gio	ikb	obh
din	jkn	klo	noc	hja	jlc	aci
ejo	mof	nag	bdj	mnb	oad	fgj

Pascal Kaeser propose de choisir un ensemble de 15 mots et de construire un poème comportant 7 strophes de 5 vers, où chaque vers contient 3 des 15 mots, d'une manière conforme à la disposition des élèves dans la solution du problème de Kirkman. Ni l'ordre des strophes ni celui des vers à l'intérieur d'une strophe ne sont dictés par la contrainte. Exemple :

a = bal	b = feu	c = chic	d = monde	e = doute
f = mal	g = jeu	h = hic	i = onde	j = route
k = val	l = peu	m = pic	n = ronde	o = toute

La vie au val (Pascal Kaeser 1994)

Zut ! Le dormeur du val a mal ouvert le bal.
Son jeu de contorsions manquait un peu de feu.
Il a le chic pour fondre à pic, voilà le hic!
Sa ronde autour de l'onde a fait fuir le beau monde.
Toute étoile, sans doute, erre en vain sur sa route.

Quand le doute prend feu et qu'il mène le bal,
Le jeu de l'esprit chic se heurte au mur du monde.
Peu après, l'onde naît, qui propage le hic
Sur la route du val, à cent lieues à la ronde.
Toute montagne a mal quand vacille son pic.

Dès qu'un choc a le chic d'ombrer le feu du mal,
Le doute éclate et le monde est beau, hic et nunc.
Autour du pic s'ouvre une route en forme d'onde,
Qu'impregne un peu toute la sagesse du val.
Le bal est clos, le jeu éclôt, voici la ronde!

L'onde du mal s'éteint : il n'y a plus de doute.
Le val berce le jeu sans émettre un seul hic.
Peu s'en faut que le pic soit le seigneur du bal.
Toute la faune chic s'étourdit à la ronde.
Chants de joie et routes en feu : le monde est ivre !

Chic ! Le dormeur du val a surmonté ses doutes :
Peu de monde à présent saurait le maltraiter.
Qu'il sorte le grand jeu ! L'onde est toute à son vœu.
Pas de hic à prévoir, en route pour le bal !
Pic et pic et colegram, la ronde est en feu.

Nul doute que le jeu va rejoindre le pic !
Le mal quitte la ronde : il rend son dernier hic.
Victoire ! Une onde de feu embrase le val.
Peu de route à franchir pour atteindre le chic.
Aujourd'hui, le monde est un bal. En avant toutes !

Vrai ! Le dormeur du val a fait du monde un pic,
Dont la ceinture ronde est peu livrée au doute.
Boutons le feu au hic, combattons toute peste !
Du rire activons l'onde et le bal sera chic.
Il n'y a plus de mal quand le jeu est en route.

Une Litanie de la Vierge
Dame Defens. Mère de dieu Très nette
Infini Pris. Souvenir gracieux
Mame Defens. Très chière Pucelette
Esjouy Ris. Plaisir mélodieux
Apuy Rassis. Safir Très précieux
D'onneur sentier. Support bon en tout fait
Rubi chieris. Désir humble joyeux
Cueur doux et chier. Confort seur et parfait

Le principe fut repris par Raymond Queneau qui composa dix sonnets (14 alexandrins groupés en deux quatrains suivis de deux tercets) de façon qu'en prenant un vers à chaque fois dans l'un des dix possibles, on obtienne toujours un sonnet régulier. Le fait qu'il y ait dix choix possibles pour chacun des 14 vers conduit à un total de 10^{14} sonnets possibles, c'est-à-dire Cent mille milliards de poèmes, ce qui est le titre de l'ouvrage publié en 1961 par les Éditions Gallimard. Malgré son contenu potentiel énorme, il n'est pas très épais (les feuilles en sont même cartonnées pour justifier son prix), chacune des dix pages contenant les vers est découpée en 14 lamelles que vous pouvez plier. En tournant par exemple quatre lamelles de la première ligne, cinq de la seconde, deux de la troisième, etc., vous composerez un sonnet que vous serez probablement le seul humain à lire. À raison d'un poème par minute, 24 heures par jour pendant 365 jours par an, vous lirez des poèmes différents durant plus d'un million de siècles.

J'ai étudié avec attention tous ces sonnets et ma conclusion est formelle : le meilleur sonnet porte le numéro 31415926535897 (on tourne trois lamelles pour avoir le premier vers, puis une pour le second, puis quatre pour le troisième, etc.). Le voici :

C'était à cinq o'clock que sortait la marquise
Depuis que lord Elgin négligea ses naseaux
Une toge il portait qui n'était pas de mise
Il chantait tout de même oui mais il chantait faux
Il déplore il déplore une telle mainmise
On prépare la route aux pensers sépulcraux
Nous regrettons un peu ce tas de marchandise
Que les parents féconds offrent aux purs berceaux
Devant la boue urbaine on retrousse sa cotte
Comme à Chandernagor le manant sent la crotte
Lorsqu'il voit la gadoue il cherche le purin
On a bu du pinard à toutes les époques
Comptant tes abattis lecteur tu te disloques
Le métronome à force incarne le devin.

CARRÉ MAGIQUE

Des structures mathématiques plus complexes peuvent intervenir lors de ces jeux d'écriture. Un carré magique est un tableau de nombres dont la somme de chaque ligne et de chaque colonne est toujours la même. On impose aussi que les diagonales donnent le même total et que les nombres utilisés soient 1, 2, 3, ... jusqu'au 9 pour un carré 3×3 , jusqu'au 16 pour un carré 4×4 , etc. Un des plus simples, de total 15, est :

2	9	4
7	5	3
6	1	8

Pascal Kaeser, dans son livre *Nouveaux exercices de style. Jeux mathématiques et poésie* (Diderot, 1997), propose de composer un poème suivant ce carré magique : le nombre de pieds des trois premiers vers est déterminé par la première ligne du carré magique : 2, 9, 4. La seconde ligne donne le nombre de pieds des vers du deuxième groupe de trois vers, etc.

Magie !

Imagine un monde où l'important

Serait le jeu,

Seul moteur des énergies.

Exit militants

Et grincheux !

Au placard nostalgie,

Temps

Cruel et climat orageux !

L'utilisation de la contrainte introduit un équilibre dans l'ensemble du poème : le nombre de syllabes de chaque strophe est 15, mais, de plus, la somme des longueurs des premier vers (ou des seconds, ou des troisièmes) des différentes strophes est aussi constante et il y a un vers de chaque longueur possible : 1 pied, 2 pieds, ... 9 pieds. Tout cela confère à l'ensemble une élégante et secrète esthétique.

CARRÉ GRÉCO-LATIN

Toujours avec l'idée d'introduire une organisation cachée, on utilise un carré gréco-latin dont chaque case contient une lettre grecque et une lettre latine telles que :

(i) Chaque lettre grecque α , β , γ , etc., apparaît dans chaque ligne, et chaque colonne une fois exactement, de même que chaque lettre de l'alphabet latin a , b , c , etc. ;

(ii) Chaque case contient une lettre grecque et une lettre latine ;

(iii) Deux cases différentes ne contiennent jamais les mêmes deux lettres.

Voici un carré gréco-latin d'ordre 3 :

γc	αb	βa
βb	γa	αc
αa	βc	γb

Euler, dans un mémoire écrit à la fin de sa vie, prétendit qu'il n'existait pas de

6. POEMES PROGRESSIFS

A	J'
un	ai
mur	cru
bête	voir
blanc	parmi
ivoire	toutes
montent	beautés
certain	insignes
vigoureux	Rosemonde
sarmenteux :	resplendir
persicaire,	flamboyante
aristoloches,	pantelante
inimaginables,	écartelée
chèvrefeuilles	évoquant
monstrueusement	quelque
indisciplinables,	charme
suremberlificotés,	scié
multidimensionnels.	sur
Latis	un
	x
	G. Perec

carré gréco-latin pour les nombres de la forme $4k + 2$ (pour les autres, il avait proposé une méthode de construction). En 1960, R. Bose, E. Parker et S. Shrikhande ont démontré qu'il est possible de construire un carré gréco-latin d'ordre N pour toute valeur de N sauf 2 et 6. En particulier donc pour l'ordre 10, Pascal Kaeser propose d'utiliser de telles structures pour composer des poèmes comme celui-ci basé sur un carré gréco-latin d'ordre 4 et construit sur un principe transparent :

Je suis	je bois	je suis	je vois
dans l'air	de l'eau	si feu	par terre
Je suis	je vois	je fuis	je bois
sur terre	un feu	tant d'eau	plein air
Je vois	je suis	je bois	je fuis
sous l'eau	fait d'air	à terre	le feu
Je bois	je fuis	je vois	je suis
sans feu	vers terre	en l'air	fou d'eau

Le carré gréco-latin le plus intéressant est celui qui prouva l'inexactitude de la conjecture d'Euler. Claude Berge, membre de l'OULIPO, avait proposé d'écrire une série de dix récits ayant chacun dix personnages dont les rôles (« amoureux violent », « bête à manger du foin », etc.) seraient déterminés par la structure d'un carré gréco-latin d'ordre 10. L'idée fut reprise par Georges Perec, qui construisit son roman *La vie, mode d'emploi* (Hachette, 1978), sur la structure d'un carré gréco-latin d'ordre 10 associé à un parcours du cavalier de toutes les cases. À chaque pièce d'un immeuble de neuf étages et de dix fenêtres de largeur correspond un chapitre du livre. Le contenu des cases du carré gréco-latin détermine le mobilier, les décors, les personnages, les allusions littéraires, historiques ou géographiques, les citations présentes dans le chapitre. Le passage d'une pièce à l'autre quand on change de chapitre est fixé par une solution (trouvée à la main

par Perec lui-même) du problème du cavalier sur un échiquier 10×10 : faire parcourir toutes les cases de l'échiquier en respectant les règles du déplacement d'un cheval d'échecs et sans passer deux fois par la même.

Toujours sur un échiquier, le problème des huit reines consiste à disposer ces reines de sorte qu'aucune reine ne soit en prise. Pascal Kaeser propose d'associer à l'échiquier un poème composé de huit vers de huit pieds construits sur le principe suivant. À chaque case de l'échiquier correspond un pied du poème, conformément à la disposition géométrique solution du problème ; la présence d'une reine sur une case est traduite par la répétition, aux endroits appropriés, d'un monosyllabe choisi. Le poème de Pascal Kaeser intitulé *Un trou dans l'espace-temps*, est illustré à côté du titre. Un autre poème du même auteur, tiré d'un problème célèbre, le problème de Kirkman, est détaillé sur la figure 5.

Bien d'autres objets mathématiques ont été utilisés par ces curieux virtuoses de la langue qui pimentent leur travail de composition littéraire dans l'espoir de bâtir sur une architecture mathématique un texte plus beau, plus original, plus singulier que ceux que la liberté et le désordre de l'imagination produisent. Les mathématiques sont un jeu, la littérature un autre, quoi d'étonnant qu'en les combinant on explore à l'infini des jeux encore plus drôles. L'excellente émission dominicale de Bertrand Gérome *Des papous dans la tête* sur France Culture intéressera les amateurs de littérature contrainte.

P. BRAFFORT, Science et littérature : les deux cultures, dialogues et controverses pour l'an 2000, Diderot Éditeur, 1998.

A. DELEDICQ, J.-C. DELEDICQ et F. CASIRO, Les maths et la plume, ACL Éditions, 1996.

C. GAGNIÈRE, Pour tout l'or des mots, Collection Bouquins, Robert Laffont, 1997.

P. KAESER, Nouveaux exercices de style. Jeux mathématiques et poésie, Diderot, collection "Jardin des sciences", 1997.

P. KAESER, À l'assaut du Snark, Jeux d'écriture, Diderot, collection "La règle et le compas", Paris 1998, ISBN : 2-84352-113-0

OULIPO, La Littérature potentielle, Gallimard, 1973.

OULIPO, Atlas de littérature potentielle, Gallimard, 1981 (deuxième édition, Folio, 1988).

OULIPO, La bibliothèque oulipienne, 3 volumes, éditions Seghers, 1990.

Georges PEREC, La disparition, Denoël, Paris 1969.

R. QUENEAU, Cent mille milliards de poèmes, Gallimard, Paris, 1961.



Une main-d'œuvre pharaonique ?

IAN STEWART

Dix mille ouvriers ont suffi à la construction de la Grande Pyramide de Gizeh.

La construction des pyramides de l'ancienne Égypte reste un des principaux mystères de l'archéologie. Le plus grand de ces monuments, est la Grande Pyramide de Gizeh, ou pyramide de Khéops, toujours intacte, qui fut construite sous le règne du roi Khéops, 2 500 ans avant notre ère. Elle est formée d'énormes blocs de pierre que des ouvriers extraient, taillaient, transportaient sur le site de

construction et empilaient les uns sur les autres.

Pourquoi les Égyptiens assemblaient-ils de tels édifices ? Beaucoup de pyramides sont vraisemblablement des tombes royales. Comment ces monuments étaient-ils construits ? Les hypothèses abondent, mais la question demeure. Aujourd'hui les historiens disposent d'une évaluation de la main-d'œuvre utilisée grâce aux travaux de Stuart Wier.

Les calculs de ce mathématicien amateur d'égyptologie répondent à ceux qui furent proposés, au V^e siècle avant notre ère, par l'historien grec Hérodote : celui-ci estimait à 100 000 le nombre d'hommes nécessaires à la construction de la Grande Pyramide. Il semble avoir surestimé le travail, puisque S. Wier a calculé que 10 000 hommes ont suffi.

Ses calculs s'appliquent à la pyramide de Khéops, mais sont valables pour n'importe quelle autre. Il évalue d'abord la quantité d'énergie nécessaire à l'élévation d'une masse connue à une hauteur donnée. Le quotient de cette énergie potentielle par le nombre de jours de construction est la quantité de travail fournie chaque jour par tous les ouvriers égyptiens pour élever les pierres. En divisant ce résultat par la quantité moyenne d'énergie dépensée chaque jour par un ouvrier, on obtient le nombre de travailleurs recherché.

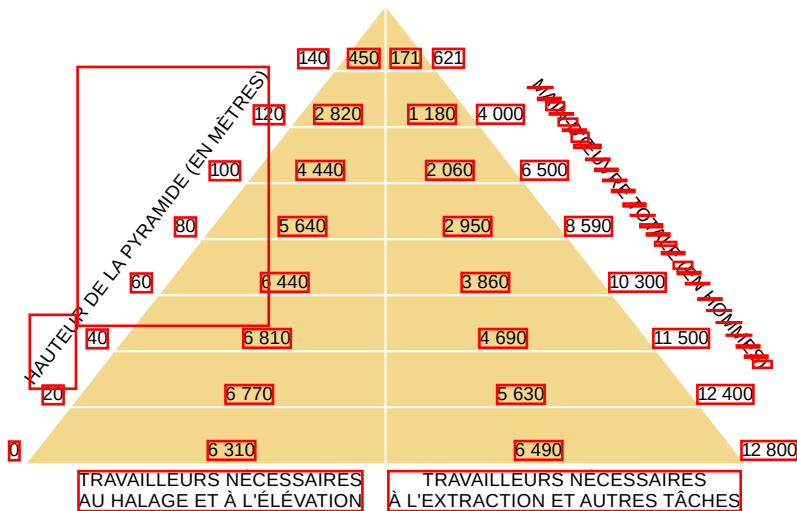
Combien de temps dura la construction ? Elle ne commença sans doute pas avant l'arrivée au pouvoir de Khéops, et la date de son achèvement reste incertaine. S. Wier suppose le temps de construction égal à la durée du règne de Khéops : 23 ans, soit 8 400 jours de travail ininterrompu.

La Grande Pyramide de Gizeh mesurait initialement 146,7 mètres de hauteur et 230,4 mètres de côté à la base. Son volume V (le tiers du produit de la hauteur par la surface de la base) était donc de 2,6 millions de mètres cubes. Comme la roche utilisée est un calcaire de densité 2,7 (2 700 kilogrammes par mètre cube), le poids de la pyramide atteignait sept milliards de kilogrammes. L'énergie potentielle E_p (le quart du produit du poids par la hauteur et par l'accélération de la pesanteur g , égale à 9,81 mètres par seconde carrée) est égale à 2 520 milliards de joules.

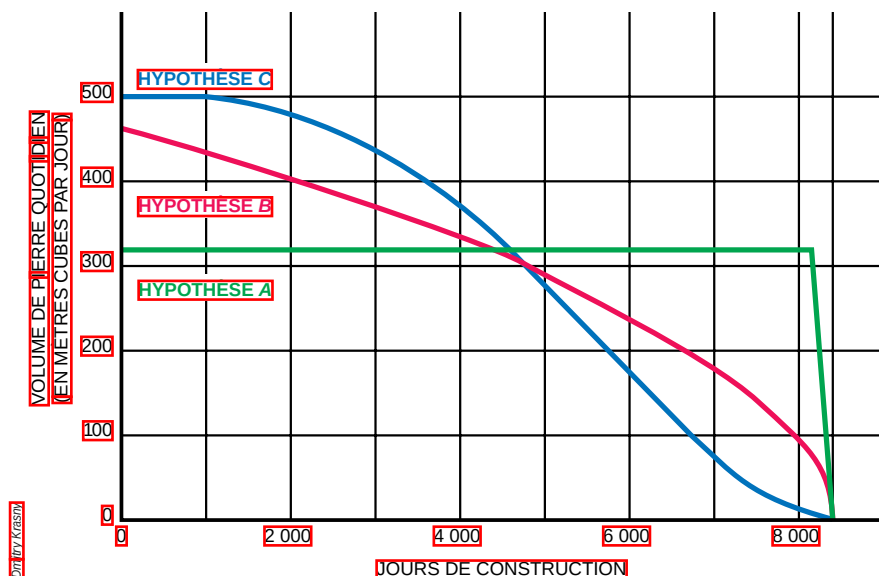
En moyenne, un homme fournit 240 000 joules par jour. Dans l'hypothèse d'une efficacité parfaite, 1 250 hommes ont suffi pour l'élévation des pierres.



1. La Grande Pyramide (au centre), à Gizeh, peut avoir été construite par 10 000 hommes seulement.



2. Main-d'œuvre nécessaire à la construction de la Grande Pyramide.



3. Trois façons de répartir la main-d'œuvre pour achever la Grande Pyramide en 8 400 jours.

S. Wier tient compte (par un facteur 1,5) de la relative inefficacité du travail musculaire. Il n'oublie pas non plus la main-d'œuvre requise pour le transport des pierres, de la carrière jusqu'au site de construction, éloigné de quelques centaines de mètres et plus élevé de 19 mètres.

Les pyramides contiennent des passages et des chambres, quelquefois remarquables, mais l'essentiel de la construction reste un empilage de blocs. Certains archéologues pensent que les blocs étaient hissés sur de longues rampes de sable ; d'autres supposent l'utilisation d'un système de leviers.

Des gravures égyptiennes montrent que les blocs de pierre étaient halés, à leur sortie de la carrière, sur des rondins de bois. Pour calculer le nombre d'hommes requis pour le halage, S. Wier a tenu compte de l'énergie perdue par les frottements contre le sol des rondins de bois chargés d'un bloc de pierre. Il a également considéré l'énergie nécessaire à l'extraction des pierres, à leur taille ou à leur installation sur la pyramide. Il propose, pour l'ensemble de ces travaux parallèles, un maximum de 14 hommes par mètre cube de pierre et par jour.

Ces calculs supposent un travail constant par un nombre d'ouvriers invariable, mais l'hypothèse est-elle juste ? Aucune information ne le précise, et plusieurs cas sont possibles.

Le quotient du volume V par le temps de travail (8 400 jours) indique une moyenne de 310 mètres cubes de pierre mis en place chaque jour. Cependant, quand la construction progresse, les ouvriers doivent porter les blocs de plus en plus haut, tandis que l'espace de travail (la surface au niveau atteint) diminue.

La construction devait ralentir lorsque la pyramide s'élevait.

S. Wier a considéré trois cas (voir la figure 3). Dans l'hypothèse A, pendant 8 110 jours, 315 mètres cubes sont posés chaque jour, puis le volume diminue rapidement avec la surface de travail disponible au sommet de la pyramide. Dans l'hypothèse B, de 462 mètres cubes le premier jour, le volume de pierre décroît lentement pendant 8 000 jours, et plus rapidement ensuite. L'hypothèse C, enfin, suppose la mise en place d'un volume de 500 mètres cubes pendant 1 000 jours, puis une diminution brusque jusqu'à presque atteindre zéro au bout de 7 000 jours. Dans les trois cas, la pyramide est achevée au bout de 8 400 jours.

La figure 2 montre la quantité de main-d'œuvre nécessaire à chaque étape de la construction réalisée suivant l'hypothèse B. Au début, la moitié des travailleurs déplacent les blocs, l'autre moitié les extraient ou les installent. À la fin, seulement un quart des ouvriers déplacent les blocs. Beaucoup d'ouvriers travaillent au début, mais leur nombre n'excède pas 12 800, soit environ un pour cent de la population égyptienne estimée de cette époque. Les hypothèses A et B conduisent à des résultats similaires.

Le cas le plus simple est sans doute l'emploi d'une main-d'œuvre constante, sauf vers la fin de la construction, lorsque l'espace de travail est réduit. Dans un tel cas, 10 600 hommes auraient pu construire la Grande Pyramide de Gizeh. Une main-d'œuvre encore inférieure aurait assuré la construction des autres pyramides de Gizeh ou celles de Dashour. En dépit de l'énormité des pyramides, l'Égypte ancienne disposait d'une main-d'œuvre bien suffisante.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F

Code 1897

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

Histoire des sciences

Michel-Eugène Chevreul, Un savant des couleurs

Sous la direction de Georges Roque, Bernard Bodo et Françoise Viénot. Éditions du Muséum national d'histoire naturelle/EREC, 1997.

Art et science de la couleur. Chevreul et les peintres, de Delacroix à l'abstraction

Georges Roque. Éditions Jacqueline Chambon, 1997.

Le nom de Michel-Eugène Chevreul est plus connu pour des raisons postales et toponymiques que scientifiques : armé de patience et d'un *Minitel*, le chimiste Jean-Jacques, un des auteurs du premier volume considéré ici, a montré en 1988 que Chevreul est, après Marcelin Berthelot, le chimiste français du XIX^e siècle qui a donné son nom au plus grand nombre de voies publiques. Quel était ce personnage auquel viennent d'être consacrés deux ouvrages ? Il est né à Angers en 1786, et mort à l'âge de 103 ans, à Paris. Son activité scientifique fut considérable : il fut l'auteur d'environ 800 notes, mémoires ou livres, et, en 1885, âgé de 99 ans, il publiait encore une note dans les *Comptes rendus* de l'Académie des sciences de Paris ! Son activité protéiforme a concerné non seulement la chimie, la science des couleurs, mais aussi l'agriculture, l'alimentation, la teinture, l'histoire de la chimie, la théorie de la connaissance, la baguette divinatoire et les tables tournantes (il était très critique)...

Son centenaire, en 1886, est un événement national : 52 discours sont prononcés, une statue est inaugurée, une médaille est frappée, une réception à l'Hôtel de ville de Paris est suivie d'un banquet de 1 000 couverts et d'une retraite aux flambeaux sur les grands boulevards, un entretien que Chevreul accorde à Nadar, illustré de photographies expressives, est le premier reportage photographique paru dans la presse française (il est

publié par le *Journal Illustré*). Tous les journaux relatent les manifestations du centenaire.

Avant tout, Chevreul a été l'un des grands chimistes de son temps. C'est l'incontesté créateur de la chimie des corps gras, qu'il a commencé à étudier dès 1812 et à laquelle il consacra en 1823 ses *Recherches sur les corps gras d'origine animale*. Ce traité, avec les *Considérations générale sur l'analyse organique* (1824), fait de Chevreul un des pionniers de la chimie organique, discipline alors naissante. Ainsi, en 1825, Chevreul dépose avec Louis-Joseph Gay-Lussac un brevet sur la préparation des bougies stéariques, qui allaient remplacer avantageusement les chandelles fuligineuses ; ce travail aura une importance pratique considérable quand l'industriel Adolphe de Milly aura l'idée de perfectionner les mèches de coton en les imprégnant d'acide borique.

C'est aussi le début de sa grande carrière : en 1824, il est nommé directeur des Ateliers de teinture de la Manufacture des Gobelins, poste qu'il occupera jusque en 1883. Élu à l'Académie des sciences en 1826, il est nommé professeur de chimie appliquée aux corps organiques au Muséum national d'histoire naturelle en 1829 ; il y enseignera durant 60 ans.

La nomination aux Gobelins marquera profondément l'activité de Chevreul. À ses débuts, il s'était initié, auprès de son maître Nicolas Vauquelin, à la chi-

mie des colorants végétaux alors utilisés en teinture, tels l'indigo, la gaude et la garance ; dès sa prise de fonctions aux Gobelins, il est intéressé par les phénomènes de perception des couleurs et par les effets produits en nous par leur juxtaposition. Il comprend ainsi que les plaintes concernant la stabilité de certaines couleurs, notamment les bleus, les violets clairs et les gris, sont justifiées : elles correspondent à une instabilité des pigments colorés ; en revanche, pour d'autres couleurs, tels les noirs utilisés pour les ombres des draperies bleues ou violettes, la stabilité des couleurs utilisées n'est pas en cause. En 1828, il présente ces résultats à l'Académie des sciences dans un mémoire intitulé *Sur l'influence que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre quand on les voit simultanément* ; puis, en 1839, il publie un livre au titre interminable – un procédé dont il usera largement – et qui reste connu par son début : *De la loi du contraste simultané des couleurs*... Il y étudie systématiquement des phénomènes voisins du suivant : quand on juxtapose deux objets colorés, chacun d'eux paraît, non pas de la couleur qui lui est propre, celle qu'il aurait si on le regardait isolément, mais d'une autre couleur. Cette couleur nouvelle résulte d'une modification de la couleur propre de l'objet par la couleur complémentaire de celle qui lui est contiguë.

Chevreul est revenu souvent sur la définition et les propriétés des couleurs complémentaires ; en 1868, il écrivait : « Définissons maintenant la couleur complémentaire d'une autre couleur, celle qui neutralise en même temps qu'elle est neutralisée, soit que, les couleurs étant des rayons solaires, elles reforment de la lumière blanche, c'est-à-dire incolore, soit que les couleurs étant matérielles, elles produisent du gris ». C'est en pensant aux couleurs matérielles (les couleurs des peintres) que Chevreul indique que sont respectivement complémentaires le rouge et le vert, l'orangé et le bleu, le jaune tirant sur le vert et le violet, l'indigo et le jaune orangé.

Sic transit gloria mundi : le bicentenaire de la naissance de Chevreul est passé aussi inaperçu, en 1986, que le centenaire avait été fastueux. Puis seulement deux colloques ont marqué le centenaire de sa mort, en 1989 : celui qui s'est tenu à Angers a concerné la chimie des corps gras ; le second, à Paris, a été une rencontre interdisciplinaire autour de son



Michel-Eugène Chevreul, photographié par Nadar en 1883.

œuvre et, tout particulièrement, de ses travaux sur la vision des couleurs et de leurs répercussions sur l'histoire de l'art. Huit ans plus tard, paraissent les actes de ce colloque, en même temps qu'un livre important sur Chevreul et les peintres, par Georges Roque, un des responsables de l'organisation du colloque parisien.

Les actes montrent que ce colloque fut interdisciplinaire, comme le voulaient les organisateurs. Les communications autour du premier thème, «Chevreul, l'homme de laboratoire et l'homme de la méthode», donnent une excellente vision du chimiste, de son activité et de sa place dans la communauté scientifique de l'époque. Les deux autres thèmes concernent plus directement les travaux consacrés à la couleur. Mentionnons les articles spécialement intéressants sur la théorie de la vision, et les prolongements informatiques du travail de Chevreul, celui très surprenant (c'est un compliment) sur l'art des jardins et celui de G. Roque sur Chevreul et les peintres. Cet article servit de base à son livre, que nous évoquerons après avoir souligné la qualité des illustrations du premier volume, parmi lesquelles on trouve certaines des photographies de Nadar et de belles reproductions de cercles chromatiques de Chevreul.

L'ouvrage de G. Roque est un développement considérable de sa contribution au colloque parisien. La richesse de la documentation et de l'appareil critique font penser à l'adaptation réussie d'un travail de thèse. L'ouvrage est à la fois un livre d'histoire de l'art et un ouvrage d'histoire des sciences. Dans la première partie, en plus d'indications biographiques sur la carrière de chimiste de Chevreul, l'auteur présente la méthode qui servit à l'établissement de la loi du contraste simultané des couleurs.

La seconde partie du livre montre comment les peintres ont accueilli la loi du contraste simultané. Avant d'y venir, mentionnons l'influence pratique des conceptions de Chevreul sur des artisans, tels les peintres d'enseignes ou de dioramas, les fabricants de papiers peints et les spécialistes de l'art des jardins, pour qui la manipulation des couleurs est un outil professionnel. Chevreul écrivit que les peintres ne l'avaient pas attendu pour reproduire correctement les couleurs, mais il était convaincu que la prise en compte du contraste simultané pouvait leur éviter de longs tâtonnements. Si l'influence pratique des théories de Chevreul sur la peinture de Delacroix reste discutée, on sait que le peintre s'intéressait à ces théories, qu'il avait acquis, vers 1850, un carnet de notes prises au cours de Chevreul et qu'il avait manifesté l'intention, qui ne s'est pas réalisée, de



Chevreul s'intéressa à la stabilité des couleurs quand il fut nommé à la Manufacture des Gobelins

le rencontrer. Les rapports entre la peinture des impressionnistes et la loi du contraste simultané restent très controversés ; en revanche, les néo-impressionnistes, tels Georges Seurat et Paul Signac, se réfèrent très explicitement à Chevreul, et Robert Delaunay revendique pour sa peinture, à partir de 1912, le terme de «simultanée».

Le livre est bien écrit et bien illustré : c'est un ouvrage de fond auquel on aura plaisir à revenir. L'origine de l'auteur, philosophe et historien de l'art, se manifeste par de rares coquetteries de langage qu'on lui pardonne volontiers. Était-il utile, par exemple, de qualifier de paradigme le contraste simultané de couleurs ? Certains ont souligné que Thomas Kuhn lui-même, sur la fin de sa vie, avait abandonné l'usage de ce terme galvaudé. D'autre part, G. Roque a tort de reprendre sans nuance une idée fausse sur l'histoire de la chimie : la chimie du XIX^e siècle se serait limitée à une pratique expérimentale hostile à toute spéculation intellectuelle. Au contraire, les faits montrent que l'intense activité pratique s'est toujours accompagnée d'efforts de formalisation théorique ; la plupart des théories, après avoir été opérationnelles, ont été normalement «réfutées», alors que d'autres ont mieux résisté au temps.

Je recommande vivement la lecture des deux ouvrages, en souhaitant que leur parution marque la redécouverte de la figure attachante de Chevreul : est-il nécessaire d'oublier l'homme, son bicentenaire passé ?

Georges BRAM

Neurobiologie

Une introduction aux neurosciences cognitives

J. Delacour. Collection «Neurosciences et Cognition». Éditions De Boeck Université, 1998.

Le livre de J. Delacour a un double intérêt. D'abord, il inaugure une collection consacrée à un thème scientifique d'avenir : «Neurosciences et Cognition». D'autre part, il se présente justement comme une présentation de ce thème très à la mode et souvent mal compris. Pour bien mesurer l'intérêt des neurosciences cognitives, on doit savoir qu'elles sont issues d'une réaction à un grand courant qui a dominé les neurosciences et que l'on peut nommer, au sens large, le courant behavioriste. Pour ce courant, seule était objective la connaissance des comportements en relation avec les stimulus de l'environnement ; le savant sérieux ne devait pas s'intéresser à ce qui se passait entre les stimulus et les réponses comportementales, dans la «boîte noire», c'est-à-dire la boîte crânienne : les mécanismes intermédiaires, ceux qui sous-tendent ce qu'on nomme communément la pensée, ne pouvaient être objectivables et sortaient donc du propos de la science.

Ce que J. Delacour nomme la «révo-

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 30 novembre 1998.

FRANCE

info

lution cognitive» a changé cet état de choses. La révolution cognitive fait suite à la révolution informatique. Les développements de l'informatique, en effet, ont permis d'imaginer des simulations de processus mentaux qui, sans renoncer à l'objectivité du behaviorisme, ont conduit à la conception d'états intermédiaires entre les stimulus et les réponses, notamment, ce qu'on appelle les représentations mentales, dont J. Delacour donne une longue description. Il serait faux de croire que cette révolution cognitive s'appuie seulement sur des systèmes complexes créés par l'homme. Comme le souligne l'auteur, et c'est peut-être le message le plus important de l'ouvrage, la révolution cognitive ouvrirait nécessairement sur la cognition animale, la conception selon laquelle l'animal évolué est également capable de représentations. Dépassant le behaviorisme, la révolution cognitive permettait donc également de réfuter définitivement les thèses de René Descartes et de ses successeurs sur l'animal-automate ! Et, comme beaucoup d'autres thèses biologiques, elle plaçait la théorie de l'évolution au centre de son discours : comme les (autres) fonctions physiologiques, la cognition humaine était le fruit de l'évolution des ancêtres de l'homme ; c'est l'évolution qui «détient les clés de la compréhension de la structure et de la capacité fonctionnelle du système nerveux» (p. 182).

Le corps de l'ouvrage, ce sont, bien sûr, les études concernant l'apprentissage et la mémoire, dont les neurosciences modernes commencent à comprendre certains des processus. Philosophiquement, l'auteur se réclame d'un «matérialisme-identité» qui traduit le parallélisme de fait entre les fonctions biologiques du cerveau et les fonctions mentales. Plus précisément (p. 176) : «À tout état mental correspond un état du système nerveux, mais l'inverse n'est pas vrai – il existe des états du système nerveux qui n'ont pas de contrepartie psychique spécifique.» Cette conception se rattache au grand courant des monismes matérialistes, mais en se démarquant vigoureusement des monismes simplistes et réductionnistes (p. 176) : «À la différence du matérialisme réductionniste, le matérialisme-identité admet, du moins provisoirement, la validité des notions de la psychologie «mentaliste», par exemple les notions d'acte volontaire, de conscience.»

Autrement dit, ce monisme est bien adapté aux connaissances d'aujourd'hui et, notamment, à l'autonomie relative des neurosciences cognitives par rap-

port aux structures moléculaires du vivant. Il permet même une utilisation de concepts issus d'autres disciplines comme la phénoménologie (p. 189) : «La phénoménologie, plus qu'un guide, pourrait être un auxiliaire précieux des neurosciences cognitives, en leur évitant de méconnaître la réalité subjective de la connaissance.» Et ces perspectives, qui offrent à l'étude des représentations une large autonomie, devraient permettre d'intégrer également dans le champ des neurosciences l'étude des structures imaginaires de la pensée. Elles offriraient ainsi une approche nouvelle aux études sur l'art, notamment par l'utilisation, que propose l'auteur en conclusion, du concept de «monde» tel qu'il est perçu par le sujet et qui pourrait donner des normes communes à la science cognitive comme au vécu artistique.

Les neurosciences cognitives sont donc bien, on le voit, à l'origine d'un renouvellement important de la pensée épistémologique. Outre son intérêt didactique pour tous, le présent ouvrage sera d'une grande utilité pour en convaincre ceux qui en douteraient encore.

Georges CHAPOUTHIER

Environnement

L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau

Édité par C. Riou, R. Bonhomme,
P. Chassin, A. Neveu et F. Papy.
INRA Éditions. 1997.

Nous le savons aujourd'hui, le manque d'eau maintiendra les productions agricoles à des niveaux insuffisants dans un nombre croissant de pays, au cours des prochaines années. Globalement, les dernières prévisions font état, pour 2025, de besoins en eau d'irrigation plus de trois fois supérieurs à ce qu'ils étaient en 1995. En France, où la consommation en eau agricole a augmenté de 45 pour cent au cours des dix dernières années, les périodes de sécheresse sont de plus en plus vivement ressenties. Nous le savons aussi, le remède à la pénurie annoncée passe par une adaptation toujours plus précise des besoins à la ressource, par une nouvelle gestion agronomique de l'eau.

Faire découvrir les clés de cette nouvelle gestion, telle est l'ambition de cet

ouvrage fort de 24 chapitres, regroupés en deux parties et proposés par 52 chercheurs, en majorité de l'INRA. Les deux parties montrent une double préoccupation, quantitative et qualitative. D'une part, on doit valoriser la ressource en eau, connaissant le fonctionnement hydrique des plantes et leurs régulations (trois chapitres), les possibilités offertes par l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse (un chapitre) et, à l'échelle de l'exploitation, le fonctionnement et la gestion des cultures (deux chapitres).

D'autre part, on veut protéger la ressource à l'échelle du bassin versant, en s'appuyant sur une compréhension plus précise des cycles biochimiques (cinq chapitres) et de l'influence des pratiques agricoles (trois chapitres), pour définir une politique de la qualité de l'eau (un chapitre). Chaque partie comprend, en outre, de courts chapitres qui exposent les méthodes à l'origine de progrès marquants dans le domaine : mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique du sol, des flux de sève, de l'état hydrique des plantes, des flux de vapeur d'eau ; localisation de la profondeur moyenne d'absorption par les racines ; modélisation du bilan environnemental d'une culture, du ruissellement et de l'érosion ; dosage des pesticides ; estimation des flux de gaz-traces.

Un glossaire et un index facilitent l'utilisation de cet ouvrage dont on appréciera l'organisation d'ensemble, la clarté et la qualité des informations sur un enjeu majeur des années à venir, celui de la maîtrise de l'eau dans l'espace rural.

Henri DÉCAMPS

Astronomie

Annuaire du Bureau des Longitudes, Éphémérides astronomiques 1999

Éditions Masson.

Le 7 messidor an III (25 juin 1795), l'abbé Grégoire lit, devant la Convention nationale, un rapport établi par le Comité de la marine et par le Comité d'instruction publique : la France doit prendre la maîtrise des mers aux Anglais, grâce à une meilleure détermination des longitudes en mer, notamment par des techniques issues

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Bernadette Bensaude-Vincent, Gilles Clément, Paul Decaix, Sylvie Dugeay, Évelyne Host-Platret, Claude Lehman, André Lemaire, Yves Marfaing, Alessandro Morbidelli, Claude Olivier, Moïse Namer, Guy Paulus, Pascale This, Frédéric Thomas.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hays, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher: Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer: John Hanley. Co-Chairman: Rolf Grisebach. Corporate Officer: Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : Servioli - 5, rue des Chaudronniers - 15 Postale 3663 - CH 01211 Genève

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront dans ce numéro un encart publicitaire Newsweek et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.

de l'observation astronomique. Près d'un siècle plus tôt, en 1714, les Anglais avaient déjà créé un Comité de la longitude (*Board of Longitude*), chargé de récompenser l'auteur d'un moyen fiable et précis pour résoudre ce très difficile problème, vital pour la navigation, et, en 1767, Nevil Maskelyne, directeur de l'Observatoire royal de Greenwich, éditait le *Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris* pour les besoins de la marine anglaise.

La Convention nationale institue donc le Bureau des Longitudes, en le chargeant de poursuivre la rédaction annuelle de la *Connaissance des Temps* (créée en 1679 sous Colbert) et de rédiger l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, «propre à régler ceux de toute la République». La *Connaissance des Temps* (sic) à l'usage des astronomes et des navigateurs fournissait ainsi des tableaux de nombres relatifs aux positions quotidiennes dans le ciel du Soleil, de la Lune, des planètes alors inconnues (y compris la planète Herschel, pas encore nommée Uranus, découverte par William Herschel en 1781) ainsi que certaines étoiles très brillantes.

La mesure précise de la position de la Lune par rapport à ces étoiles permettait d'obtenir la longitude du lieu d'observation par la méthode des «distances lunaires», à condition de disposer de bonnes éphémérides de la Lune, c'est-à-dire de tableaux donnant pour tous les jours de l'année et toutes les trois heures, la position calculée de la Lune dans le ciel. Au cours du XIX^e siècle, le coût des chronomètres de marine diminue fortement, et ces instruments vont faire partie de l'équipement des navires, rendant inutile l'emploi de la méthode des distances lunaires pour faire le point en mer ; depuis 1905, la *Connaissance des Temps* ne publie plus ces tables de distances calculées.

Le premier volume de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, celui de l'an V (1796-1797), un petit livre de 40 pages, indiquait seulement, pour chaque jour, les heures de lever et de coucher du Soleil et de la Lune à Paris, ainsi que l'instant de passage du Soleil au méridien, information très utile pour régler les horloges en temps moyen. Pour les planètes, ces données étaient calculées pour chaque décade du calendrier républicain.

Depuis plus de deux siècles, l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* a grossi : plus de 300 pages de tableaux mensuels ou annuels fournissent les coordonnées célestes des principaux astres du Système solaire, des satellites de Jupiter et Saturne, ainsi que de nombreux astéroïdes et comètes

dont le retour visible est attendu dans l'année. Aujourd'hui, ces tableaux sont calculés grâce à des modèles mathématiques performants et précis, établis au Bureau des Longitudes, par le Service des calculs et de mécanique céleste, unité de recherche associée au CNRS.

En plus des tables éphémérides, cet ouvrage contient des informations utiles sur différents calendriers traditionnels ou religieux et leur correspondance avec le calendrier grégorien, le seul officiel dans le monde. Les définitions du siècle et du millénaire rappellent que les prochains commenceront le 1^{er} janvier 2001, et non 2000. Un chapitre résume des notions d'astronomie fondamentale concernant le temps ou les calculs des coordonnées des astres, et dresse des tableaux des caractéristiques physiques et orbitales des planètes et de leurs satellites.

Cette édition pour 1999 comporte également un long développement sur la prochaine éclipse totale de Soleil, qui sera visible dans le Nord de la France, le 11 août 1999, vers midi (heure légale d'été). Des cartes aident à choisir le bon site pour observer ce phénomène, et des tableaux détaillés donnent, au dixième de seconde près, les instants intéressants de l'éclipse partielle ou totale, pour tous les chefs lieux des départements de métropole, ainsi que pour une trentaine de villes situées dans la zone de totalité.

Une autre publication récente du Bureau des Longitudes, *Introduction aux Éphémérides astronomiques* (Éditions de Physique, 1997) est un ouvrage explicatif de référence, destiné aux astronomes, chercheurs et étudiants intéressés par l'astronomie fondamentale, l'astrométrie et la mécanique céleste. Le Bureau des Longitudes anime également deux serveurs, accessibles à tous : le 3616 BDL sur *Minitel*, pour l'actualité astronomique, les heures de lever et de coucher des principaux astres, les prochaines éclipses de Soleil et de Lune, et le serveur *Internet* <http://www.bdl.fr>, qui fournit, en plus des mêmes données astronomiques, des photographies et de très belles cartes détaillées pour ces éclipses.

Michel TOULMONDE

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse :
<http://www.pourlascience.com>