

Pour la Science

Juin 1998

■ POUR LA

SCIENCE

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Les muscles,
organes de la perception
Pinces et ciseaux optiques
Le choix
des partenaires sexuels
L'antimatière cosmique
Les Barbares
en Gaule
Les réseaux de satellites
Les télécommunications
au xxi^e siècle
La saturation de l'espace radio

Dossier :
télécommunications

Canada : \$ 8,75



BLOC-NOTES

de **Didier Nordon**

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6

JEU-CONCOURS

Éclipses joviennes

par **Pierre Tougne**

7



SCIENCE ET ÉCONOMIE

La dette publique

par **Bernard Guerrier et Francisco Vergara**

8



MÉTIER DE L'INGÉNIEUR

Ingénieurs et entrepreneurs

par **Yves Farge**

10



POINT DE VUE

Informatique et société

par **Max Dauchet**

11



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le beurre, un faux solide

par **Hervé This**

12



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Une fraude en physique

par **James Evans**

14



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ **Le retour du mildiou** ■ **Les forges gallo-romaines**
■ **Rééducation accélérée** ■ **Suicide nuptial chez les**

20

fourmis ■ **Un vaccin contre le cancer?** ■ **Correction d'erreurs**

■ **Le carbone au corps** ■ **Hydrodynamique lumineuse**

■ **Mutations interdites** ■ **Vocalises de grenouille** ■ **Un tamis à photons** ■ **Peut-on prévoir les krachs?**

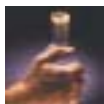


LOGIQUE ET CALCUL

Les conquêtes des polyminos

par **Jean-Paul Delahaye**

116



VISIONS MATHÉMATIQUES

Abrogeons la loi des moyennes

par **Ian Stewart**

122



SAVOIR TECHNIQUE

Les freins hydrauliques

par **Stanley Stokes**

125



ANALYSES DE LIVRES

■ **Le premier homme et son temps**

■ **Il y a 200 ans, les savants en Égypte,**

■ **Une même éthique pour tous?** ■ **Rythmes et formes en chimie**

126



Schering-Plough

Les lecteurs trouveront, pages 35 à 46, un dossier sponsorisé par **Schering-Plough**.

Dossier Télécommunications

Les réseaux de satellites

par **John Evans**

Grâce aux flottilles de satellites de télécommunications, les possesseurs d'un téléphone portable auront accès au réseau téléphonique, à partir de n'importe quel point du Globe.

48

Les télécommunications du XXI^e siècle

par **Joseph Pelton**

Les sociétés de télécommunications préparent un réseau global qui associera des systèmes radio et des réseaux terrestres.

58

Les réseaux radio terrestres

par **Alex Hills**

Les réseaux de téléphonie mobile s'étendent. Bientôt, ils permettront aussi aux ordinateurs d'échanger des données.

64

Les applications des réseaux cellulaires

par **Warren Stutzman et Carl Dietrich**

La téléphonie a bénéficié de la technique cellulaire, mais bien d'autres applications de cette technique apparaîtront prochainement.

70

L'occupation du spectre radio

par **David Hughes et Dewayne Hendricks**

Le regroupement d'informations en paquets numériques et leur transmission à plusieurs fréquences permettent à des millions de personnes d'émettre et de recevoir en même temps.

72



L'intégration des Barbares dans la société gallo-romaine

78

par Michel Kazanski
et Christian Pilet

Contrairement à la croyance populaire, les Huns et autres Barbares venus d'Orient n'étaient pas seulement des barbares sanguinaires.

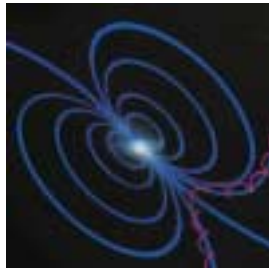


L'antimatière cosmique

86

par Gregory Tarlé
et Simon Swordy

Les astrophysiciens traquent les antiparticules afin de comprendre le mouvement des galaxies. L'existence d'un anti-monde semble exclue.

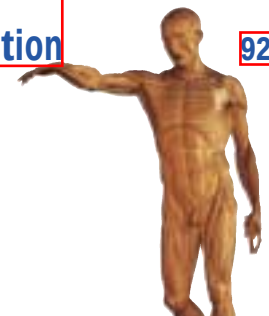


Les muscles, organes de la perception

92

par Jean-Pierre Roll

Les muscles renseignent le cerveau sur nos postures et nos mouvements. L'excitation artificielle de leurs capteurs sensoriels crée des illusions.



Comment les femelles choisissent leur partenaire

100

par Lee Alan Dugatkin
et Jean-Guy Godin

Les femelles s'accouplent souvent avec les mâles les plus visibles. Leur choix semble résulter d'un mélange d'instinct et d'imitation.



Pinces et ciseaux optiques

108

par Michael Berns

Des lasers servent d'étaux de lumière, pour immobiliser des cellules ou de minuscules constituants cellulaires, et de ciseaux pour pratiquer des interventions minutieuses.



Les télécommunications...

... explosent, du moins en quantité. Le philosophe américain Thoreau ironisait. À la nouvelle que le Maine et le Texas avaient été connectés par le télégraphe, Thoreau s'interrogeait : « Je me demande ce que le Maine a à dire au Texas... »

Thoreau avait tort : c'est la diffusion de la Bible au XVI^e siècle, permise par l'imprimerie, qui a donné à l'individu la possibilité de la commenter, d'examiner son interprétation du monde, en d'autres termes lui a conféré l'esprit scientifique. De l'examen de la Bible est né, paradoxalement, l'examen critique, les découvertes de Galilée et les inventions de ses continuateurs scientifiques. C'est l'imprimerie qui a engendré la science, et la dissémination des connaissances est l'un des plus remarquables apanages d'*Homo sapiens sapiens*.

L'information numérisée sous forme de sons et d'images sera bientôt au bout des touches du téléphone portable. L'électricité a supplanté la mécanique, encore qu'il faille toujours lancer des fusées pour qu'elles mettent en place les satellites de communication. Qu'un message téléphonique fasse un aller-retour de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres pour une conversation locale entre deux locuteurs distants de quelques kilomètres étonnerait même Marconi. Cette couverture satellitaire élimine la distinction entre conversations locales et éloignées, et donnera à l'*Internet* une vitesse raisonnable (voir le dossier Télécommunications, pages 47 à 75).

Ce sont les ingénieurs qui ont fondé la science des communications, définissant les concepts fondamentaux tels le rapport signal sur bruit, l'écriture numérique des données et la bande passante (l'ensemble des fréquences nécessaires à la transmission du signal). Sous cet angle, l'écrit est supérieur à la parole : les locuteurs les plus rapides ne peuvent prononcer que 100 mots par minute, alors que le lecteur en assimile 300. La bande passante de l'écrit est trois fois supérieure à celle du langage, mais, grâce aux ingénieurs, cet écrit est aussi véhiculé par les ondes.

Philippe BOULANGER

Le génie n'a pas de bouteille

Certains sociologues rejettent le terme de «génie scientifique». Selon eux, la recherche est une affaire trop complexe pour que pareil terme ait un sens. Mêlant ambitions, chance, jeux de pouvoir, jeux d'influences, jeux d'argent, la recherche est un processus collectif.

Cette théorie a sa pertinence. Mais ceux qui en déduisent que la notion de génie est vide de sens me convainquent qu'ils ont peu l'expérience du travail scientifique. Quelle est en effet l'aventure la plus banale pour un chercheur ? C'est de sécher longuement, puis de voir, écoeuré, un autre surmonter la difficulté en un tournemain. Plus vexant encore : si le premier demande au second comment diable lui est venue l'idée qui débloquent la situation, le second est souvent incapable de répondre. L'intuition ne peut pas être enseignée ou expliquée, comme on expose une méthode. Elle ne sert qu'une fois : face à un autre problème, une tout autre intuition sera décisive.

Comme ce serait agréable, si on pouvait prouver l'inanité de la notion de génie ! Rêvons un instant. Aucun chercheur ne risquerait d'être tenu pour médiocre scientifique. Et les sociologues triompheraient, puisque la sociologie expliquerait tous les phénomènes au sein de la cité scientifique.

Hé bien non, désolé. L'intuition qui pulvérise l'obstacle scientifique, certains l'ont

plus souvent que d'autres, et cela ne relève pas du jeu social. La notion de génie est peut-être ringarde ; elle n'est pas correcte politiquement, car elle reconnaît l'existence d'inégalités entre individus ; elle n'explique pas pourquoi certains ont, entre les oreilles, une meilleure matière grise que d'autres. Elle a mille défauts, mais ils n'autorisent pas à la ranger au magasin des accessoires.

L'ennui cryptographique

Wiles est en train de passer dans l'histoire comme un grand théoricien des nombres. En réalité, la contribution majeure qu'on lui doit n'est pas dans ce domaine, mais dans celui de la cryptographie.

En 1993, Wiles pensait avoir démontré le théorème de Fermat. Pour dépister une éventuelle erreur, il choisit son collègue Nick Katz. «Ce que Wiles devait expliquer était si énorme qu'il ne lui aurait pas été possible de me l'expliquer dans son bureau de manière informelle. Pour une entreprise de cette importance, nous avions besoin de la structure d'entretiens hebdomadaires programmés, sans quoi nous nous serions égarés. C'est pourquoi nous avons décidé d'organiser une série de cours.» Seulement Wiles, redoutant la concurrence, voulait garder un secret absolu tant qu'il n'était pas sûr de

lui. Comment faire ? Il eut une idée de génie : il annonça sa série de cours sous un titre anodin, puis se lança «bille en tête» dans des calculs «incroyablement techniques et ennuyeux» (ce sont les termes de Katz). Seul Katz, sachant où ils menaient, put suivre. Les autres auditeurs, chassés par l'ennui, quittèrent le cours pour ne plus jamais y remettre les pieds. Ainsi, semaine après semaine, Wiles exposa son travail à Katz en public – et dans le plus parfait secret (Simon Singh, *Le dernier théorème de Fermat*, Éditions Lattès, 1998).

On s'échine à inventer des méthodes de cryptographie sophistiquées. Efforts superflus ! Wiles a magistralement démontré que, pour rendre un document impénétrable aux regards indiscrets, il n'est rien de tel que l'ennui, le bon vieux ennui. Évidemment, comme toutes les méthodes puissantes, celle-ci a son revers. Wiles avait fait une erreur devant Katz. Et ce dernier ne s'en est pas aperçu...

Où es-tu donc, Julie Larousse ?

À l'occasion, passez donc au numéro 21 boulevard du Montparnasse, à Paris. Un spectacle curieux vous y attend, sous les espèces d'une plaque fixée dans le mur, ainsi rédigée : «Les Éditions Larousse sont au 17-21 rue du Montparnasse. Vous êtes ici au 21 boulevard du Montparnasse» (souligné sur la plaque).

Ainsi, depuis que la maison Larousse est là où elle est, des dizaines de coursiers tenaillés par l'urgence du message à délivrer, des centaines d'auteurs prestigieux donc pressés, des milliers de confrères surmenés donc hyperpressés ont dû – selon leur caractère – tempêter, pleurer, hurler, interroger les passants, ont relu le papier portant l'adresse sans remarquer qu'il disait rue et qu'ils étaient à boulevard puis ont en désespoir de cause appuyé sur n'importe quelle sonnette, ou se sont au contraire frappé le front en se traitant de tous les noms, ou ont cru à un canular, voire à l'inexistence de la maison Larousse ! Combien sont-ils, les gaillards qui ne savent pas faire la différence entre rue et boulevard ? Assez pour que Larousse ressente la nécessité de visser la plaque susdite.

D'ordinaire, les plaques ont de quoi intimider. Tel fait d'arme héroïque s'est déroulé ici, tel grand homme a habité là. Celle-là, au moins, est reposante.

Existe-t-il d'exacts synonymes ?

Beau sujet de conversation pour les dîners. Il se trouve toujours un convive, plus subtil que les autres, pour faire une distinction entre «sembler» et «paraître» ou entre «craindre» et «redouter», et il s'en trouve toujours un pour assurer que, n'étant pas correct, «par contre» ne peut donc pas être synonyme de «en revanche». D'ailleurs, synonyme a-t-il un vrai synonyme ?

Des synonymes exacts, il en existe pourtant d'indiscutables. Mais il faut les chercher là où ils sont. Par exemple, dans une science exacte ! En mathématiques, il n'y a pas et il ne peut pas y avoir l'ombre d'une nuance entre «la fonction tend vers 0» et «la fonction a 0 pour limite» ; il n'y en a aucune entre «A est inclus dans E», «A est un sous-ensemble de E», «A est une partie de E» ; il n'y en a pas non plus entre «ce système de vecteurs est indépendant» et «ces vecteurs forment une famille libre». Ces expressions jettent exactement le même regard sur le même objet. (Ce qui n'est pas le cas d'expressions comme «un triangle ayant deux côtés égaux» et «un triangle ayant deux angles égaux», lesquelles n'attirent pas l'attention sur la même propriété de l'objet désigné.)

Ces synonymes parfaits ajoutent une difficulté à l'enseignement. Il n'est pas rare de lire dans des copies : «la fonction tend vers 0, donc elle a 0 pour limite». Formellement, ce «donc» est irréprochable ; néanmoins, il peut donner l'impression que l'étudiant croit progresser dans son raisonnement en passant de la première formulation à la seconde. Si vous rayez ce «donc», l'étudiant viendra protester : «Mais c'est juste, ce que j'ai écrit !» Oui, c'est juste. Pourtant, c'est peut-être l'indice d'une pensée fausse...

Billard et simulation

Peut-on écrire un logiciel qui modélise le jeu de billard avec tous les phénomènes décrits par Régis Petit dans *La pratique du billard* (voir *Pour la Science*, avril 1998)?

Jean-Luc FRANTZ

Réponse de Régis PETIT

Concevoir un logiciel de simulation réaliste pour le jeu de billard à trois billes (et plus) n'est pas très complexe du point de vue algorithmique. Les équations vectorielles publiées sur le site Internet (<http://www.pourlascience.com>) le prouvent : elles synthétisent les équations de Coriolis généralisées à des bandes de hauteur quelconque, à des billes de rayons différents, pouvant sauter en l'air suite à un choc ou rouler sans glisser. Parmi les logiciels disponibles, on peut citer les logiciels 3D *VirtualPool* et *VirtualSnooker* de la Société *Interplay*, qui sont téléchargeables, en version démonstration, à partir des sites Internet (<http://www.accessone.com/~mavlon/>) et (<http://www.interplay.com>), et le logiciel 2D *Bilman6* de Guy Grasland (ggrasland@mail.codix.fr), en version prototype, qui est un des seuls à fonctionner avec les équations exactes de Coriolis.

Claude Bernard et Dieu

Dans sa critique du livre de Mirko Grmek *Le legs de Claude Bernard* (voir *Pour la Science*, mai 1998), Michèle Febvre écrit que «Bernard a toujours été agnostique et matérialiste : "La science n'a pas pour objet de prouver ni désapprouver Dieu. Elle est indépendante de cette question."» Il n'y a pas de relation de causalité entre le fait noté par Bernard (l'absence de lien entre la science et la religion) et son éventuel matérialisme. En outre, quoique Bernard ne fût pas un pilier d'église, il se confessa et reçut l'extrême onction à sa demande. Il prit aussi vigoureusement à parti le matérialisme et le positivisme, omniprésents à son époque.

Christian FAYAT, Rennes

Réponse de Michèle FEBVRE

Après la lecture de manuscrits inédits publiés par Mirko Grmek, il n'est plus possible de douter du matérialisme de Claude Bernard. En effet, dans une ébauche de son discours à l'Académie française, il dit avec sincérité : «...je suis matérialiste comme savant, et je ne suis que savant. Si j'étais philosophe, je serais spiritualiste, mais je ne suis pas philosophe.» Les commentaires de C. Fayat soulignent à juste titre les ambiguïtés de la personnalité du grand physiologiste.

Un matérialiste qui rédige «une profession de foi théiste et spiritualiste» pour gagner une élection est un opportuniste ; s'il appelle un prêtre au moment de mourir, c'est un être humain assailli de doutes tardifs!

Labours en question

L'article *La fin des labours* (voir *Pour la Science*, avril 1998) laisse penser que le système de culture décrit est applicable partout sous les tropiques. Ce n'est pas le cas là où la pluviométrie mensuelle dépasse beaucoup l'évapotranspiration pendant un mois ou plus et où il faut drainer l'excès d'eau, ni dans les régions où la saison sèche est trop longue. Ce système de culture n'est économiquement supportable que sur des sols très fertiles ou très fertilisés.

En outre, dans de nombreux pays tropicaux, la demande solvable en produits agricoles est faible et les prix des produits agricoles sont bas. Les rapports entre le prix des produits agricoles et celui des engrais ou des herbicides sont faibles aussi. Le système de culture «sans labours» n'est alors pas soutenable économiquement. Il ne l'est que si l'agriculture est mécanisée et utilise des herbicides, comme au Brésil, ou si l'agriculture est manuelle et qu'aucun herbicide n'est employé, comme au Bénin.

Jacques GILLAIN, Bouziques

Réponse de Lucien SÉGUY, du CIRAD

Les techniques de semis direct permettent la mise en culture permanente de terres jugées impropres à l'agriculture à cause de leurs fortes pentes, de la pauvreté du sol ou de sa faible épaisseur. Là où la pluviométrie est très supérieure à l'évapotranspiration, le drainage de l'excès d'eau est inutile. Ainsi, le Centre-Ouest du Mato Grosso, au Brésil, au Sud du bassin amazonien, où plus d'un million d'hectares sont cultivés en semis direct, était en voie de désertification avec les techniques de travail du sol entre 1976 et 1990 : c'est aujourd'hui l'une des régions les plus productives du Brésil. Le semis direct est pratiqué sur des cultures fortement productrices de biomasse. Le sol est toujours couvert et sa porosité s'accroît grâce aux systèmes racinaires des plantes de couverture. De même, sur les hauts plateaux malgaches, les techniques de semis direct, en culture manuelle, montrent une bonne maîtrise du ruissellement et un arrêt total de l'érosion.

Là où la saison sèche est supérieure à six mois, les techniques de semis direct sont les meilleures options technico-économiques. Les résultats de la recherche menée depuis quatre

ans dans le Sud-Ouest malgache, où la saison sèche dure huit à dix mois, le démontrent.

Enfin, sur des sols très pauvres, les exemples brésiliens et malgaches montrent que les systèmes de culture en semis direct sont les plus productifs en présence d'un minimum d'engrais minéraux ou organiques. Les nutriments sont recyclés, le sol est rechargé en carbone, de l'azote est fixé par les cultures de couverture.

Cladistique et phylogénie

Dans son analyse de *L'Histoire de la paléontologie*, d'Eric Buffetaut (voir *Pour la Science*, mai 1998), Michel Martin écrit que si le cladisme «a imposé plus de rigueur dans la définition des caractères primitifs et évolués, il donne une impression de rigueur absolue qui camoufle la subjectivité». L'un des mérites de l'analyse cladistique est toutefois de mettre la subjectivité en évidence, lors d'une analyse de caractères, de cerner les domaines où elle est présente, d'en être conscient, afin de ne pas «faire dire n'importe quoi» à un fossile.

Par ailleurs, contrairement à ce qu'affirme M. Martin, l'apprentissage de l'analyse cladistique ne fait pas partie des connaissances que les professeurs de sciences de la vie et de la terre doivent exposer à leurs élèves. Certains manuels y font référence, mais ils ne répondent pas aux instructions officielles.

Bruno CHANET, Brest

Réponse de Michel MARTIN

Que tous les manuels ne fassent pas état du cladisme revient à jouer sur les mots : des lycéens m'ont déjà interrogé à ce propos, à cause de leurs manuels. Il en est du cladisme comme d'un fromage : il peut être bien fait ou mal fait. Lorsque le spécialiste d'un groupe travaillant sur du matériel en bon état obtient des résultats cohérents, c'est très bien. Toutefois, que penser de cladogrammes obtenus après des compilations de caractères auxquels on ne comprend rien? Certes, chez les vertébrés inférieurs, le cladisme a précisé la phylogénie. Mais il s'agit souvent de matériel assez complet. Simultanément, si je vois «faire du cladisme» avec des phalanges ou des métapodes de dinosaures isolés, je hurle casse-cou. Je pourrais multiplier les exemples. Le paléontologue doit connaître les limites de son matériel d'étude. Il ne peut éviter la subjectivité qu'à ce prix, et encore. L'expérience montre que bien des auteurs pensent être objectifs, car l'outil, dans l'absolu, est objectif alors que l'homme, qui utilise l'outil, introduit, consciemment ou non, une part de subjectivité.

JEU-CONCOURS N° 48

PIERRE TOUGNE

Eclipses joviennes

La planète Jupiter possède de nombreux satellites (au moins 16) dont quatre ont été découverts par Galilée en 1610. Io, le plus proche des satellites galiléens, a une période de révolution autour de Jupiter T_I de 1,769 jour. À chaque passage de Io dans le cône d'ombre de Jupiter, il y a une éclipse de Io. Quelle relation existe-t-il entre la période T de ces éclipses et les périodes T_J de rotation de Jupiter autour du Soleil et T_I de rotation de Io autour de Jupiter? On suppose que les orbites de Jupiter autour du Soleil et de Io autour de Jupiter sont circulaires et dans un même plan, et l'on considère que le Soleil est ponctuel.

De fait, l'observation de ces éclipses s'accorde assez bien avec la relation trouvée sur une courte période. Cependant si l'on calcule les dates des éclipses de Io au moment où Jupiter est proche

de la conjonction (c'est-à-dire où la distance Terre-Jupiter est maximum) à partir des dates d'observation des éclipses au moment où Jupiter est proche de l'opposition (c'est-à-dire où la distance Terre-Jupiter est minimum), les dates des éclipses au voisinage de la conjonction semblent toutes être en retard d'environ 16,5 minutes par rapport au calcul. Comment expliquer ce phénomène et que peut-on en déduire connaissant la variation de la distance Terre-Jupiter entre l'opposition et la conjonction, soit $2u - a = 3 \times 10^8$ kilomètres?

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

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 46

Par hasard, l'article de J.-P. Delahaye sur les fractions, dans le même numéro, avait quelque rapport avec le problème des fractions curieuses. Examinons la solution «manuelle» de recherche du nombre se terminant par 2 pour le facteur 2. Le produit par 2 étant le multiplicande dont on a fait passer le chiffre des unités en tête du nombre, le chiffre des dizaines est un 4 ($2 \times 2 = 4$), de même, le chiffre des centaines est un 8 ($2 \times 4 = 8$), le chiffre des milliers un 6 ($2 \times 8 = 16$, retenue 1), le chiffre des dix-mille un 3 ($2 \times 6 + 1 = 13$, retenue 1), etc. Quant peut-on s'arrêter? Au moment où l'on retrouve le chiffre des unités, ici 2 sans retenue. Cela se produit au 19^e chiffre, soit le nombre 105 263 157 894 736 842. Si l'on prend 3 comme chiffre des unités, on trouve 157 894 736 842 105 263. En procédant de même avec le facteur 7, il faut 22 chiffres, comme par exemple 1 014 492 753 623 188 405 797 ou 1 159 420 289 855 072 463 768. Mais est-on certain que le processus s'arrêtera? Oui, car si $N = a_{n-1} \dots a_0$ est le nombre de n chiffres cherché pour le multiplicateur k , la multiplication s'écrit $a_{n-1} \dots a_0 \times k = a_0 a_{n-1} \dots a_1$, soit $Nk = a_0 10^{n-1} + (N - a_0)/10$, que l'on peut

réécrire $N = a_0(10^n - 1)/(10k - 1)$, c'est-à-dire qu'une condition suffisante est l'existence de n tel que $10^n - 1$ soit divisible par $10k - 1$. Or pour tout k , il existe une plus petite valeur de n ayant cette propriété (voir l'article de J.-P. Delahaye), mais celle-ci est très variable ainsi pour $k = 2 \dots 9$, $n = 18, 28, 6, 42, 58, 22, 26, 44$. Enfin, la condition $N \geq 10^{n-1}$ implique $a_0 \geq k$ (explication du coup de pouce).

Quelques remarques au sujet de ces nombres : La concaténation d'un nombre avec lui-même possède la même propriété, donc une infinité de multiplications curieuses ; si $10k - 1$ est premier pour les différentes terminaisons possibles, ces nombres sont des permutations particulières de l'un quelconque d'entre eux.

Pour un multiplicateur k donné, les nombres de longueur minimum ont en général le même nombre de chiffres selon la terminaison, sauf pour le facteur 5, auquel cas ces nombres ont 42 chiffres, à l'exception de la terminaison 7 qui conduit à 142 857 (parce que $a_0 = 7$ a un facteur commun avec $10k - 1 = 49$). Enfin, le problème se généralise à un déplacement de plus d'un chiffre, mais les calculs sont pénibles.



La dette publique

BERNARD GUERRIEN • FRANCISCO VERGARA

Les Français seraient-ils de «mauvais parents» qui laisseraient à leurs enfants une grosse dette?

L'existence d'un déficit budgétaire et sa conséquence directe – l'augmentation de la dette publique – seraient moralement répréhensibles, car elles alourdiraient la «charge» que nous laissons à nos enfants. Cette constatation a été formulée par Jacques Chirac (discours du 14 juillet 1997), par Dominique Strauss-Kahn et par Jean-Claude Trichet, gouverneur de la Banque de France. Les références d'autorité ne sanctifient pas l'erreur : la dette publique est une créance des Français sur l'État, qui leur rapporte des intérêts.

Le déficit budgétaire est la différence entre les dépenses et les recettes de l'État (celles-ci provenant des impôts et taxes). Pour pouvoir le financer, l'État émet des titres qui sont achetés – par l'intermédiaire des banques et des institutions financières – par des particuliers (ménages et entreprises) ; ces titres, qui ont l'avantage d'être sans risque (ou presque : les cas de faillite de l'État sont exceptionnels), rapportent des intérêts. La dette des administrations publiques est formée par l'ensemble des titres qui ont été émis par l'État, et qui sont encore en circulation. Ainsi, les critères de Maastricht fixent à 3 pour cent et à 60 pour cent du PIB (valeur de la production annuelle d'un pays) le maximum autorisé pour, respectivement, le déficit budgétaire et la dette publique. Pourquoi de tels seuils ? Il n'est pas de réponse précise à cette question. Comme par hasard, ils correspondent à peu près à la situation prévalant dans les deux pays les plus importants, la France et l'Allemagne.

PAS DE DETTE SANS CRÉANCE

Revenons à notre question initiale, sur la «charge» que la dette de l'État ferait peser sur les générations futures.

Si Jacques Chirac et Dominique Strauss-Kahn achètent des bons du trésor, qu'ils lèguent ensuite à leurs enfants, ils leur donnent un droit sur des ressources futures. Ils sont donc «de bons parents», même si par

ailleurs leur politique budgétaire laisse une dette publique plus élevée que celle qu'ils ont trouvée en arrivant au pouvoir. Le seul effet direct de la dette et de la créance correspondante est de modifier la répartition des ressources disponibles à un moment donné entre les membres d'une même génération. Si les enfants de J. Chirac et de D. Strauss-Kahn ont des revenus suffisamment élevés pour que les impôts qu'ils payent compensent les intérêts et le remboursement des titres d'État qu'ils détiennent, alors l'État leur prendra d'une main ce qu'il leur donnera de l'autre !

Bien entendu, le niveau du déficit des administrations publiques n'est pas sans importance. Mais il ne peut être envisagé sans une réflexion sur la forme et les conséquences des dépenses de l'État à l'origine de ce déficit. Car si l'État s'endette en construisant des routes et des stades, en réhabilitant des cités délabrées ou en rénovant l'infrastructure scolaire des banlieues défavorisées, alors il contribue au bien-être des «générations futures», qui ne peuvent qu'être reconnaissantes devant des «parents» aussi prévoyants.

Il est vrai que ceux-ci leur laissent le soin de régler la question de la redistribution d'une partie du revenu qu'implique tout système de dettes et de créances, ce qui n'est pas simple : les enfants de Chirac et de Strauss-Kahn seront contents de toucher des intérêts ou de se faire rembourser les titres qu'ils détiennent, mais pas du tout d'avoir à payer des impôts

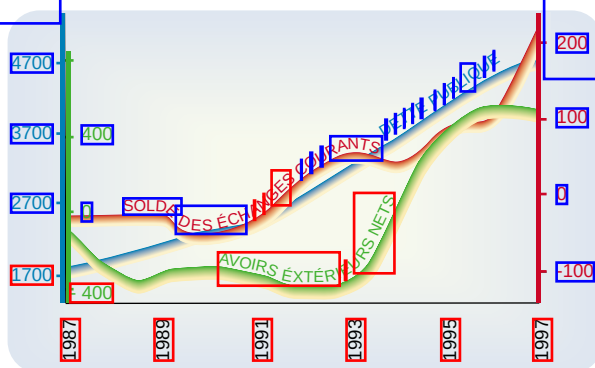
pour cela ! Ainsi, la perspective d'une hausse des impôts peut avoir un effet négatif – désincitation au travail ou à investir, fuite des capitaux ou même de certaines personnes –, dont doit tenir compte toute réflexion sur les conséquences des déficits budgétaires.

LA «MAISON FRANCE»

Si l'on veut garder la métaphore des «mauvais parents», on doit considérer la France entière comme «une grande famille», la «maison France». Si celle-ci a des dettes, ce ne peut être que par rapport à des entités autres qu'elle-même, c'est-à-dire par rapport aux résidents d'autres pays. Sa dette ne peut augmenter que si elle consomme plus qu'elle ne produit – si elle importe plus qu'elle n'exporte ; si tel est le cas, ses enfants («la France de demain») devront alors produire plus qu'ils ne consommeront, pour rembourser la dette laissée par leurs parents, dont on peut dire qu'ils sont «mauvais» (ou «moralement répréhensibles»).

La dette publique ne joue là aucun rôle. Quant à la «maison France», en tant qu'entité globale, elle n'est nullement endettée ; bien au contraire, puisque les échanges de biens et services de la France avec l'étranger sont, depuis plusieurs années, largement excédentaires (la «maison France» exporte bien plus qu'il n'importe), comme le proclament d'ailleurs les mêmes qui cherchent à nous culpabiliser. Ce que «notre génération» est en train de laisser à «ses enfants», ce sont des créances et non des dettes : grâce à nous, à notre travail, ils pourront consommer plus qu'ils ne produiront...

Tel n'est pas le cas des États-Unis où le déficit annuel du commerce extérieur est de l'ordre de deux pour cent du PIB, et s'accumule depuis plus de dix ans : les «parents» américains vivent au-dessus de leurs moyens. L'État américain n'est peut-être plus en déficit, mais la «maison États-Unis» laisse à ses enfants une facture. Les «mauvais parents» ne sont pas là où on le dit...



Dette publique française, solde des échanges courants et avoir extérieur net français, en milliards de francs.



Ingénieurs et entrepreneurs

YVES FARGE

Comment aménager, en connaissance de cause, le tissu social et éducatif, pour augmenter les chances de succès des nouvelles entreprises ?

La formation des ingénieurs les prépare-t-elle à créer une entreprise ? Mal. L'ingénieur passé par les Grandes écoles est prêt à travailler dans les grandes entreprises, à augmenter la productivité, éventuellement à innover, mais toujours dans le sein de l'entreprise ; rares sont les jeunes ingénieurs qui abandonnent la sécurité du salariat pour se lancer dans la mêlée industrielle et commerciale en fondant leur propre société. Attitude dommageable pour l'emploi : c'est par le foisonnement de multiples entreprises de haute technologie que les États-Unis ont, en partie, résolu le problème du chômage.

L'entrepreneur et l'ingénieur ont des cultures et des tempéraments distincts. L'entrepreneur est singulier, caractériel, monomaniacal, d'une énergie farouche. Comme les très bons sportifs, c'est un conquérant qui fonde sa carrière sur la performance individuelle. Le malheur est que les entrepreneurs français qui ont ces qualités partent à Cambridge ou dans la Silicon Valley au lieu de développer leurs talents en France. Les sirènes de la délocalisation ne chantent pas que pour les pays du tiers-monde...

Cela étant, il est heureux que tous les ingénieurs ne soient pas des entrepreneurs, dans une certaine mesure inaptes au travail en équipe et au suivi des programmes indispensables à la survie des grandes sociétés industrielles.

Revenons sur un point d'importance : l'innovation n'est pas que technique. Le *Club Méditerranée*, le *Livre de poche*, les *Eaux de table* ont été des créations génératrices d'emplois sans base technique particulièrement novatrice. La création d'entreprises ne passe pas nécessairement par une merveille innovante, et toutes les nouvelles sociétés performantes ne sont pas fruits de la recherche. Le lobby de la recherche tente de nous faire accroire qu'en dehors d'elle, point de salut. Ce discours est biaisé. Même quand elles ont pour moteur une invention, les entreprises

nouvelles n'ont parfois pour assise qu'une incrémentation dont la commercialisation est menée au son du canon par un entrepreneur astucieux. La quasi-totalité des innovations correspondant à des améliorations incrémentables, et la création d'entreprises peuvent surgir d'un petit perfectionnement. *Moulinex* est un exemple de l'après-guerre. Il en est bien d'autres.

La grande entreprise est mal adaptée à l'innovation radicale : elle ne recrute pas d'entrepreneurs en son sein, car ils pourraient perturber son équilibre. Comme un lourd navire qui court sur son aire, les changements de cap sont lents, et les diversifications rares. Périodiquement, elle se recentre sur ses activités de base et a pour objectif d'être parmi les premières entreprises mondiales. Ses soucis sont la gestion, l'incrémentation des améliorations techniques, le suivi technique de ce que fait la concurrence. Ses petites innovations dans le commercial, le marketing, les produits et les procédés de fabrication permettent de gratter mètre par mètre les augmentations du chiffre d'affaires et des bénéfices.

L'innovation rentable, où qu'elle soit développée, n'est pas nécessairement une avancée révolutionnaire. Or, la culture française n'incite pas les ingénieurs à s'inspirer des avancées de ses compétiteurs, et parallèlement, elle ne leur enseigne pas assez à protéger leurs inventions par des brevets ou des marques. L'ingénieur français, remarquable technicien et dont la formation est l'une des meilleures au monde, pêche par individualisme et par esprit de clocher. Moi tout seul, disent les enfants et trop d'ingénieurs français : il n'est rien qui ne soit inventé ailleurs dont je n'ai pas eu l'idée, pensent-ils, souvent sans le dire. Hélas, cette attitude narcissique a empêché les ingénieurs de saisir au vol les innovations qui flottent dans l'air embaumé des succès industriels. Dans les gels absorbants des couches pour bébé, dans les cristaux liquides pour les écrans,

dans les micro-ordinateurs, les ingénieurs français n'ont pas pu ou su mettre en œuvre leurs avancées. Cela parce que nous n'avons pas toujours su remettre en cause nos méthodes de travail.

Dans la nature, les nouvelles espèces apparaissent grâce à une invention qui est le fruit du hasard, et elles prospèrent quand elle sont adaptées à un changement de l'environnement. Entre deux changements notables, les espèces se perfectionnent à l'intérieur d'un biotope inchangé. Il n'en va pas autrement des changements technologiques.

D'où notre incapacité à évaluer un perfectionnement en termes économiques : l'URSS est morte en partie de ses réussites techniques qu'elle n'a pas transformées en succès économiques. Le goût de la technique pour la technique peut perdre une entreprise. Combien de destructions d'emplois engendrées par le *Concorde* ? Il faut soutenir les projets qui créent de la valeur, car ce sont eux qui créent de l'emploi. Trop peu de gens ont conscience qu'une activité qui détruit de la valeur finit toujours par détruire de l'emploi.

Peut-on enseigner la culture de l'entreprise à l'école, doit-on changer parallèlement le tissu social ? Grandes questions non résolues. Les faits sont là : les méthodes d'enseignement sont trop axées sur le vrai et le faux et pas sur le pratique. Les habitudes sociales, trop frileuses, ne récompensent pas le succès à la hauteur des risques, le monde marchand est méprisé par les techniciens comme le dédaignaient les nobles du Grand siècle. En cela, les doctorales qui initient à l'économie d'entreprise les futurs docteurs ès science sont une remarquable initiative, qui, avec le temps, donnera des résultats, si leur action se poursuit dans la durée...

Yves FARGE est directeur scientifique auprès du directeur général au CNRS.



Informatique et société

MAX DAUCHET

Faut-il qu'un système soit ouvert ou fermé ?

Les nouvelles techniques de l'information se constituent en «système nerveux de la société», aime à clamer Bill Gates, le célèbre fondateur de la Société Microsoft. Dans cette révolution numérique en cours, deux conceptions des logiciels s'affrontent. Cette lutte n'est pas seulement technique : ce sont deux approches de la société qui sont opposées. D'un côté, les systèmes informatiques commerciaux, encore dits fermés, ou propriétaires, ont pour champion Windows, de Microsoft ; le logiciel est une boîte noire pour l'utilisateur. De l'autre, les systèmes ouverts, ou libres, souvent gratuits, dont le champion est Linux, qui compte ses adeptes principalement dans les milieux scientifiques ; l'utilisateur a ici accès aux «programmes sources» qu'il peut contrôler et modifier à sa guise.

Les deux approches correspondent à deux visions du monde. La Société Microsoft, par sa position hégémonique, focalise les critiques. Elle garde ses clients captifs en créant des relations exclusives entre ses systèmes d'exploitation et ses programmes d'application. Cette stratégie rend l'éditeur seul maître du développement de l'informatique et impose aux clients de Microsoft de le rester, malgré les défauts des programmes commercialisés.

Au contraire, le système d'exploitation Linux, diffusé gratuitement sur le réseau Internet, est perfectionné par les efforts permanents et bénévoles de milliers de spécialistes, qui ont tous intérêt à disposer du meilleur système. Cette seconde approche mène à une qualité supérieure, même si ses produits demeurent moins conviviaux que leurs homologues fermés. Elle est promue en France par l'AFUL (Association francophone des utilisateurs de Linux et des logiciels libres). Des chercheurs, tels Bernard Lang et Roberto Di Cosmo, ont bien expliqué comment des services décentralisés et concurrentiels d'adaptation et de maintenance locales de logiciels libres peuvent se développer, conjuguant activité économique, qualité et évolution des produits, et indé-

pendance. L'approche permet un darwinisme informatique qui est gage de diversité, donc de robustesse.

L'enjeu n'est pas seulement l'utilisation des programmes, mais la formation des étudiants. La Société Microsoft propose notamment un programme de formation nommé «Compétences 2000» pour «le grand public, l'éducation et les entreprises». Il propose des «cours officiels Microsoft» dispensés «uniquement par des instructeurs qui ont passé avec succès les examens MCP» (*Microsoft Certified Professional*), sur la base des supports de cours «conçus selon une méthodologie rigoureuse par les équipes d'experts techniques et pédagogiques de Microsoft» et dont on n'est «pas autorisé à supprimer des passages». Voici donc des professeurs d'informatique contrôlés par une société privée ! La Société Microsoft édite également des CD-ROM historiques : à quand les professeurs d'histoire certifiés Microsoft et qui dispenseront les «cours officiels Microsoft» dont on ne sera «pas autorisé à supprimer des passages» ?

L'actuelle opposition entre les systèmes ouverts et fermés est plus qu'un avatar de la sempiternelle opposition entre le monde des savants et celui des marchands ; elle est exemplaire des interrogations de société, que nos repères traditionnels appréhendent mal, face à cette informatique qui, avec ses produits immatériels, duplicables à coût nul, commande un monde bien concret. Le dernier des nombreux rapports sur l'informatique, celui du sénateur RPR René Trégouët, cherche la lumière dans l'histoire. Intitulé éloquentement «Des pyramides du pouvoir aux réseaux de savoirs», il conclut au «trop d'État», ce qui est devenu un lieu commun. Et s'il s'agissait surtout d'un «mal État» ? J'ai le sentiment qu'il y a «mal État» quand Dominique Strauss-Kahn déclare au début de 1998 : «Nous avons décidé de coordonner nos efforts avec Microsoft en matière de recherche, de formation, de financements conjoints en capital-risque» ; il y a également un «mal État» quand

l'Élysée accueille Bill Gates en sauveur. En revanche, il y a un «trop peu d'État», quand ni le ministère de l'éducation nationale, ni le ministère de l'industrie ne proposent de perspectives et de débats face aux problèmes que pose l'enseignement de l'informatique.

Dans cette éprouvette du futur que sont les techniques de l'information se dessinent de nouveaux rapports de l'homme au travail, du public au privé, des sciences à la société. Aux États-Unis un emploi créé sur deux est dans ce secteur, où les ingénieurs feront pourtant défaut, en l'an 2000 ; en France, la faiblesse de l'industrie informatique inquiète autant que les offensives de Microsoft déjà évoquées. C'est ainsi que l'association française des universitaires et chercheurs en informatique (SPECIF) œuvre pour un dialogue permanent avec les différents acteurs : nous revendiquons, dans la formation initiale des étudiants, un équilibre entre l'enseignement des systèmes ouverts et des systèmes fermés, mais aussi une adaptation des flux d'étudiants et des contenus des programmes ; nous voulons adapter aux sollicitations du marché de l'emploi des actions de formation élaborées avec les professionnels et les tutelles. L'indépendance de la France et de l'Europe, la pérennité des emplois, exigent aussi des ambitions publiques et privées en matière de recherche et de développement technique.

Des initiatives associatives élargissent la réflexion aux problèmes de société posés par l'explosion du traitement planétaire d'informations. C'est peut-être à ce niveau de réflexions et de propositions que l'État doit hisser son rôle.

Utopie ? Notre vieux continent en a besoin, pour espérer, dans la révolution numérique qui est en cours, autre chose qu'un rôle de second plan.

Max DAUCHET est professeur d'informatique au Laboratoire d'informatique de Lille et président de SPECIF.



Le beurre, un faux solide

HERVÉ THIS

Comment le rendre tartinable.

Le beurre est un solide étrange : quand on le sort du réfrigérateur, on doit parfois attendre une quinzaine de minutes avant de le tartiner facilement. Pourquoi ? Comment éviter cette attente ? Pourrait-on fabriquer un beurre tartinable dès sa sortie du réfrigérateur ?

La question se pose depuis 1988 : la législation accorde l'appellation de beurre aux produits qui, comme le beurre, sont des dispersions de gouttelettes d'eau dans la matière grasse laitière, à condition que ces produits aient été séparés par des méthodes physiques. Aussi pouvait-on concevoir de vendre des beurres de qualités variées, préparées par mélange de diverses fractions qui auraient été d'abord isolées du beurre.

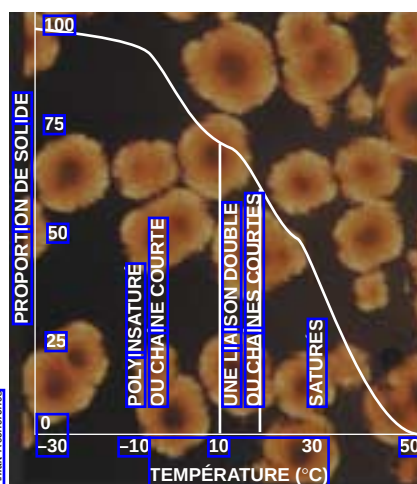
Comment séparer ces fractions ? Comment les recombiner ? En 1992, le groupe de recherche de l'industrie laitière Arilait a confié à plusieurs laboratoires la tâche d'analyser la matière grasse laitière et d'identifier des règles de composition des beurres tartinables. L'étude était difficile, parce que les molécules qui composent la matière grasse laitière sont variées et « polymorphes » : chaque type de molécules cristallise de plusieurs façons, selon le type de traitement qu'il a antérieurement subi, et les cristaux n'adoptent leur forme d'équilibre qu'après un long repos.

Dans le lait, cette matière grasse est sous la forme de gouttelettes dispersées dans de l'eau ; chaque gouttelette, de quelques micromètres de diamètre, est enrobée de micelles de caséine, chaque micelle étant un assemblage de plusieurs protéines, cimentées par du phosphate de calcium. Des arômes sont dissous dans les matières grasses des gouttelettes, tandis que des molécules variées (vitamines, sucres, tels que le lactose, sels minéraux, protéines) sont en solution dans l'eau.

L'équipe commanditée par Arilait a d'abord étudié la matière grasse, dont la composition change même selon les saisons. En revanche, une unité règne : les matières grasses du lait sont essentiellement des molécules de triglycérides, composées d'une molécule de glycérol à laquelle sont liées trois molécules

d'acides gras. Le lait contient plus de 500 acides gras différents. Comme chaque acide gras peut être lié à n'importe quel atome de carbone du glycérol, le nombre de triglycérides possibles est supérieur à plusieurs milliers.

Une des conséquences majeures de cette diversité est le comportement étrange du beurre à la fusion : contrairement à un corps pur tel que l'eau, qui fond à une température fixe (0 °C), la fusion du beurre



Les diverses molécules de la matière grasse du lait cristallisent (en fond) en trois étapes principales.

commence dès -50 °C, et elle s'achève vers +40 °C. Les divers triglycérides du lait fondent par familles chimiques homogènes en trois étapes principales : de -50 °C à 10 °C, on observe la fusion des molécules dont les acides gras sont courts ou comportent des liaisons chimiques doubles, entre les atomes de carbone ; puis, entre 10 °C et 20 °C, vient le tour des molécules ne contenant qu'une seule liaison double ou bien une chaîne courte ; entre 20 °C et 40 °C, fondent les molécules où les trois acides gras sont saturés (avec seulement des liaisons chimiques simples entre les atomes de carbone).

Les physico-chimistes ont plutôt étudié le phénomène inverse de la fusion : la cristallisation, à partir de beurre fondu. Pour séparer les diverses fractions, on effectue ainsi une « cristallisation fraction-

née » : on refroidit lentement le beurre fondu et l'on isole les cristaux qui apparaissent à une même température, tous composés des mêmes types de molécules.

Ayant ainsi isolé des fractions qu'ils ont identifiées, Frédéric Lavigne, Michel Ollivon et leurs collègues ont alors cherché un moyen de former des mélanges tartinables dès la sortie du réfrigérateur : ils préconisent de mélanger des triglycérides à température de fusion élevée, qui restent donc solides à la température ambiante, avec une proportion appropriée de triglycérides à basse température de fusion, liquides à température ambiante. On obtient ainsi un corps apparemment solide qui, comme le beurre classique, contient une proportion de molécules sous la forme de liquide (même dans le lait, les « gouttelettes » de matière grasse sont partiellement solides : la proportion de solide atteint 70 pour cent à 4 °C, mais seulement 10 pour cent à 30 °C). L'enrichissement en molécules à basse température de fusion facilite le tartinage. Les fractions à point de fusion élevé sont utilisées en pâtisserie (encore sous le nom de beurre, puisque la réglementation l'autorise) notamment pour la réalisation de pâtes feuilletées.

Pourquoi un solide qui contient du liquide reste-t-il apparemment solide ? À cause des cristaux qui s'enchevêtrent quand ils croissent. Raclé par un couteau, le beurre semble s'amollir non pas parce qu'il s'est échauffé, mais parce que les cristaux sont séparés.

Comment utiliser ces découvertes en cuisine ? Je vous propose de tester la cristallisation fractionnée : fondez le beurre et récupérez la partie solide à mesure qu'elle se forme, tout comme l'ont fait les physico-chimistes. Vous aurez ensuite la possibilité de composer votre beurre, par des mélanges, et d'obtenir les textures appropriées au plat où vous voudrez placer votre produit.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 25 juin 1998, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



VERMOREL

Une fraude en physique

JAMES EVANS

L'arrière garde antinewtonienne a utilisé des moyens peu scientifiques pour combattre la théorie de la gravitation.

En juin 1769, un article paraît dans le *Journal des Beaux-Arts et des Sciences* qui attaque la théorie de la gravitation universelle de Newton. L'auteur, Jean Coultaud, a enseigné la physique à Turin, et passe sa retraite dans la maison familiale de Samoëns. Il y décrit des expériences qu'il a réalisées durant les étés 1767 et 1768, dans la montagne, près de Samoëns.

Coultaud a acheté deux horloges à balancier chez l'un des meilleurs horlogers de Genève. Il place l'une des pendules dans sa maison, à Samoëns et l'autre dans une cabane, à 2 000 mètres d'altitude. Un de ses amis, M. Andrier, «homme intelligent, actif et instruit», est chargé de la pendule de la station supérieure. Il entretient un feu dans la cabane, pour que la température soit maintenue à «12 degrés sur l'échelle de Réaumur» (15 °C). Cette précaution garantit que la pendule ne ralentisse ni n'accélère à cause de changements de température. Il s'agit de faire démarrer les deux pendules simultanément : le frère de Coultaud se place à mi-chemin entre Jean et Andrier. Le 1^{er} juillet 1767, à zéro heure, le frère de Coultaud enflamme de la poudre à canon : c'est le signal pour mettre en route les deux pendules. Deux mois après, les pendules sont arrêtées selon le même procédé.

Selon la théorie de la gravitation de Newton, la pendule supérieure doit être plus lente, car l'accélération de la pesanteur diminue avec l'altitude (la période d'un pendule simple étant inversement proportionnelle à la racine carrée de l'accélération de la pesanteur, elle augmente avec l'altitude et, par conséquent, l'horloge à pendule avance moins vite). Quand Andrier descend de la montagne avec ses notes et les relevés horaires, Coultaud est stupéfait : contre toute attente, la pendule supérieure a avancé plus vite et pris 28 minutes d'avance sur la pendule inférieure.

Coultaud conclut ainsi son article : «L'attraction et les lois qu'on lui prête trou-

vent leur cercueil dans ces mêmes faits.» L'article se termine par : «À Samoëns en Faucigni, Province de Savoye, ce 15 Novembre 1768» et est publié au cours du mois de juin suivant. Les résultats de Coultaud sont bientôt confirmés par un certain Mercier, qui reproduit l'expérience à Sion, dans le Valais, et publie son compte rendu dans le *Journal des Beaux-Arts et des Sciences*. Les articles de Coultaud et de Mercier sont à l'origine d'une controverse qui dure une dizaine d'années et suscite de nouvelles expériences dans toute la France. Ils sont critiqués par de nombreux scientifiques, notamment par d'Alembert et Lalande, tandis que l'arrière-garde antinewtonienne y voit une preuve inattaquable de la validité de son propre système.

Qui étaient Coultaud et Mercier, les auteurs des premiers articles ? En fait, ils n'ont jamais existé ! Les expériences

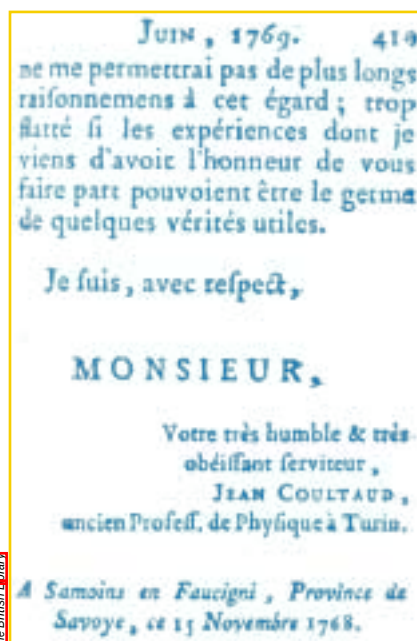
décrites n'ont jamais été réalisées ! Cet épisode des fraudes scientifiques illustre les passions qu'a déclenchées la théorie de Newton, les antinewtoniens étant prêts à tout pour détrôner Newton.

LES ENJEUX

L'histoire commence en 1687 avec la publication des *Principes mathématiques de philosophie naturelle*, où Newton déduit, des lois du mouvement des planètes, que tous les objets s'attirent, et que la force de gravitation entre deux objets diminue quand leur distance augmente. De surcroît, la Terre tournant rapidement sur son axe, Newton pense qu'elle n'est pas parfaitement sphérique, mais aplatie aux pôles.

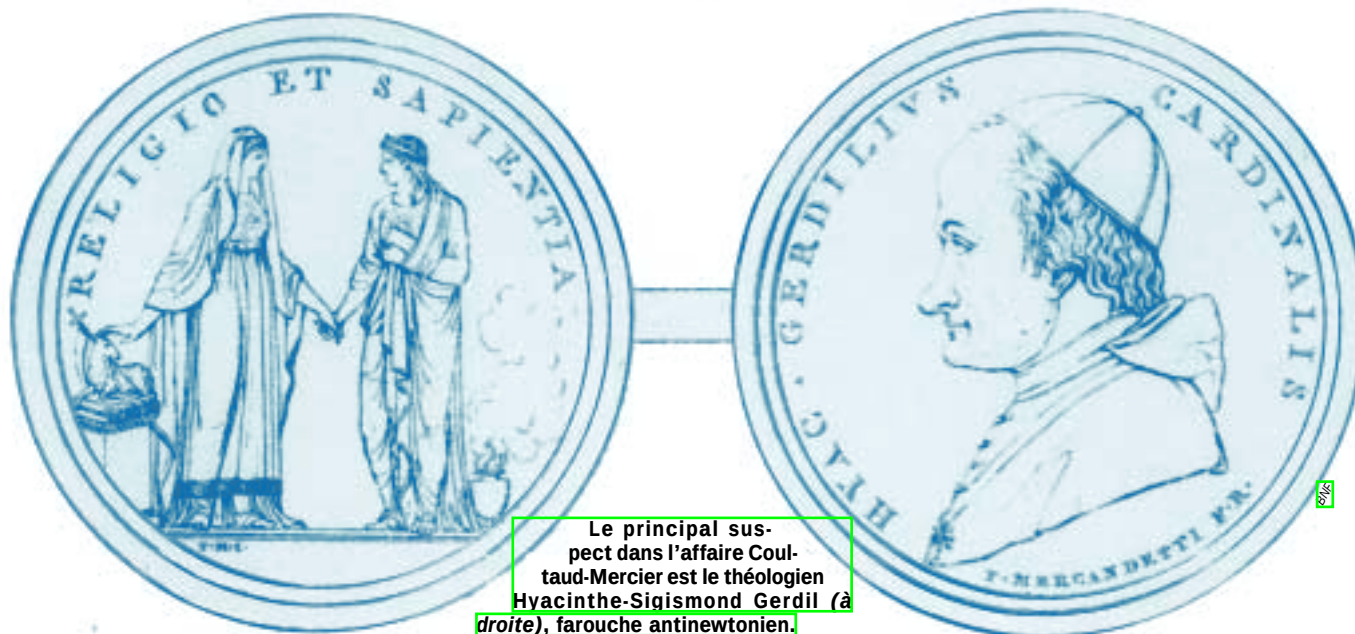
Cette hypothèse sur la forme de la Terre n'était pas totalement théorique, mais reposait sur quelques observations, notamment celles de Jupiter qui, au télescope, apparaît aplatie aux pôles. On pouvait raisonnablement supposer que la Terre avait la même forme. De plus, on savait depuis 1672 qu'une horloge à balancier observée à Cayenne (au Nord de l'Amérique du Sud) est un peu plus lente que la même pendule à Paris. Ces constatations sont compatibles avec la théorie de Newton : si la Terre est effectivement renflée à l'équateur, le pendule de l'horloge de Cayenne est plus éloigné du centre de la Terre que celui de l'horloge de Paris, de sorte que l'accélération de la pesanteur y est inférieure ; sa période est supérieure et l'horloge avance moins vite.

Newton n'avait pas proposé d'explication mécanique de la gravitation. Il lui suffisait que sa loi permette de calculer le mouvement des corps, sans que l'on ait à se préoccuper de l'origine de la gravitation. Cet aveu de faiblesse fut l'un des principaux arguments utilisés par les adversaires de Newton. Pour les disciples de Descartes, la théorie de Newton apparaissait comme un retour aux pensées obscurantistes. Une des principales



The British Library

Fin de l'article de Coultaud publié dans le *Journal des Beaux-Arts et des Sciences*, en juin 1769.



Le principal suspect dans l'affaire Coultaud-Mercier est le théologien Hyacinthe-Sigismond Gerdil (à droite), farouche antinewtonien.

contributions de Descartes avait été de lutter contre les «explications» obscurantistes des phénomènes naturels qui avaient caractérisés les écoles moyen-âgeuses. Au Moyen Âge, on disait qu'un aimant attirait un morceau de fer parce qu'il avait un «pouvoir» d'attraction. Ces explications qui attribuaient pouvoirs, puissances, vertus et autres forces aux objets, estompaient la frontière entre le monde vivant et le monde inanimé.

Plus de trente ans après la publication du livre de Newton, les philosophes continuaient à s'interroger sur la validité de la théorie de l'attraction universelle. Certaines observations semblaient même infirmer la théorie. En 1713, Jacques Cassini, qui travaillait à établir une nouvelle carte de la France, prétendait que les mesures les plus récentes indiquaient que la Terre était légèrement renflée aux pôles. C'est à cause des arguments de Cassini que la Terre fut alors représentée comme un citron, Newton prétendant qu'elle ressemblait plutôt à une citrouille. Ainsi, vers 1730, deux conceptions du monde s'affrontaient, celle de Newton et celle de Descartes (selon Descartes, les corps ne s'attirent pas, et la pesanteur résulte d'une pression exercée par une «matière subtile», dont les tourbillons exercent une pression sur les objets). Pour les newtoniens, la pesanteur diminue avec l'altitude et la Terre est aplatie aux pôles ; pour les cartésiens, la Terre est aplatie à l'équateur et, pour certains d'entre eux, la pesanteur augmente avec l'altitude.

En 1735, l'Académie des Sciences propose un test décisif : des expéditions seront envoyées en Laponie et au Pérou pour mesurer la longueur d'un degré de méridien. Ces expéditions confirment que la Terre est aplatie aux pôles et, vers 1750, la quasi totalité des physiciens français adhèrent à la théorie de Newton. Pourtant quelques uns résistent.

Quand Jean Coultaud publie ses expériences c'est un combat d'arrière garde. Les troupes antinewtoniennes sont clairsemées. Deux arrière gardistes, Joseph-Etienne Bertier et Jean-Pierre David ont élaboré des théories incompatibles avec les principes de Newton et se servent des expériences de Coultaud pour réfuter la théorie de l'attraction universelle.

Joseph-Etienne Bertier (1702-1783) est prêtre de la congrégation de l'Oratoire qui enseigne la philosophie et la physique aux adolescents. Il est correspondant de l'Académie des Sciences. Quand il cesse d'enseigner, il est envoyé à Paris, dans la maison de l'Oratoire, rue Saint-Honoré. Il est viscéralement convaincu de la validité du système de Descartes. Il entreprend un traité des *Principes physiques, pour servir de suite aux «Principes mathématiques» de Newton*. Il rassemble en trois volumes tous les phénomènes physiques et chimiques. Il décrit comment ces phénomènes sont expliqués par les newtoniens et par les cartésiens. Il rassemble également les arguments de chacun des deux camps contre la théorie adverse. Bertier prétend être neutre et se contenter de rassembler objectivement les arguments des deux camps. Pour ne pas attaquer de front Newton, il distingue entre «l'attraction physique» qu'il récuse et «l'attraction mathématique». Selon Bertier, Newton a utilisé l'attraction seulement comme un outil mathématique qui facilite les calculs.

Bertier publie le quatrième volume de ses *Principes physiques* en 1770, un an après la parution de l'article de Coultaud, et indique, sur la page du titre : *La nature, consultée par des expériences nouvelles, décide les questions qui partageoient tous les physiciens modernes*. Dans le quatrième volume, l'expérience de Coultaud est présentée comme une nouvelle évidence contre la théorie de Newton. Bertier continuera à défendre le système

cartésien et à attaquer les newtoniens qui «Auteurs de systèmes opposés à la Nature, voudroient nous enlever notre Père et notre Dieu, en soutenant que les Corps s'attirent et se meuvent d'eux-mêmes sans premier moteur.»

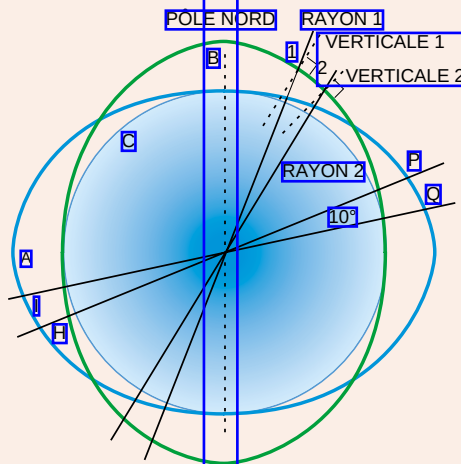
Le deuxième antinewtonien, Jean-Pierre David (1737-1784) enseigne la chirurgie à Rouen. En 1769, il publie *Dissertation sur la figure de la Terre*, ouvrage qui le classe dans le camp des antinewtoniens. Il continue à prétendre que, contrairement aux résultats des expéditions envoyées par l'Académie, la Terre est aplatie à l'équateur. Il affirme même que les observations des académiciens «valident» sa propre théorie. Les expériences de Coultaud apportent une «preuve» à David : la pendule de la vallée avait été plus lente que la pendule en altitude ; ainsi, plus la pendule est proche du centre de la Terre, plus elle est lente ; or on avait montré qu'une horloge à balancier située à l'équateur est plus lente qu'à Paris ; on en déduisait que les points, à la surface de l'équateur, sont plus près du centre de la Terre, qui a donc une forme de citron...

L'ENQUÊTE ET LA RÉVÉLATION

Pendant ce temps, Georges-Louis Le Sage vit modestement de leçons de physique et de mathématiques. Il habite Genève, là même où les pendules de Coultaud ont été fabriquées. Le Sage décide d'enquêter sur ces pendules et fait le tour des horlogers genevois : aucun n'a fabriqué ces pendules, aucun ne connaît Jean Coultaud. Dans son article, Coultaud s'était prétendu être un ancien professeur de physique à Turin : après enquête, Le Sage apprend qu'aucun professeur de ce nom n'a jamais enseigné à Turin. Enfin, aucun Jean Coultaud n'habite Samoëns ! Il montre, de même, que

Des expériences mal interprétées

La Terre est-elle aplatie aux pôles? Sur la figure, A est une Terre aplatie aux pôles, C une Terre sphérique et B une Terre aplatie à l'équateur. Sur C, un rayon, tel H ou I, coïncide avec la verticale en chaque point de la Terre. Au contraire, sur B, les rayons, aux points 1 et 2, ne coïncident pas avec les verticales, perpendiculaires à la surface. Le rapport de la distance 1-2 sur l'angle entre les verticales 1 et 2 est constant pour la Terre sphérique. Que devient-il sur la Terre réelle? Lors de leurs expéditions au pôle et à l'équateur, les Académiciens trouvèrent que le rapport est inférieur à l'équateur, d'où ils conclurent que la Terre est aplatie aux pôles, comme l'avait prévu Newton. Toutefois, l'antinewtonien Jean-Pierre David prétendit que les Académiciens avaient mal défini la verticale. Pour lui, la verticale passait toujours par le centre de la Terre, et n'était pas nécessairement perpendiculaire à sa surface. Sur la Terre aplatie aux pôles (A), un angle au centre découpe un arc PQ dont la longueur augmente quand on se rapproche de l'équateur. David conclut que, sur A, le rapport entre PQ et l'angle au centre correspondant *augmente* vers l'équateur; donc la Terre doit être aplatie à l'équateur, en forme de citron (B). En fait, David utilisant une définition erronée de la verticale, son rapport était surévalué, car l'angle des «vraies» verticales, en P et



1. Les newtoniens voyaient la Terre comme une citrouille aplatie aux pôles (A), tandis que les antinewtoniens y voyaient un citron (B).

Q était supérieur à 10 degrés. Une autre expérience a été utilisée par les antinewtoniens contre la théorie de la gravitation.

Dans le temple de l'Oratoire, Joseph-Étienne Bertier avait placé une balance à fléau à 25 mètres du sol. Dans le plateau de gauche, il posait un poids. Dans celui de droite, il plaçait une corde et une masse pour équilibrer la balance. Ensuite, il déroulait la corde attachée sous le plateau de droite et y suspendait le poids qui équilibrait la balance avant le début de l'expérience. Quand la corde était déroulée, la balance penchait vers la gauche. Bertier en conclut

que les objets pesaient plus lourd quand ils étaient plus haut. La querelle s'envenima entre Bertier et ses adversaires. L'expérience fut reproduite dans d'autres églises. On finit par comprendre, en utilisant des objets plus ou moins denses que l'effet résulte de la diminution de la densité de l'air avec l'altitude (quand l'objet suspendu est dense et peu volumineux, la poussée exercée par la masse d'air déplacée est faible et l'équilibre peu perturbé). Bertier publia à regret un article où il se rétractait, mais il continua à être convaincu que la pesanteur augmente avec l'altitude, jusqu'à une altitude qui n'avait pas encore été déterminée.

Mercier est aussi un mythe. Ce travail de détective met au jour la fraude et est publié non dans le *Journal des Beaux-Arts et des Sciences*, mais dans celui, plus prestigieux, de l'abbé Rozier, *Observations sur la Physique*. Le Sage ne fait aucune hypothèse sur l'identité réelle de l'auteur des faux.

Les principaux suspects sont Bertier et David, mais ils ont fait d'autres expériences dont les résultats ne sont pas compatibles avec ceux de Coultaud. S'ils étaient les fraudeurs, ils auraient sans doute falsifié tous leurs résultats. Qui était Jean Coultaud? Peut-être était-ce Hyacinthe-Sigismond Gerdil (1718-1802) un théologien et prêtre barnabite qui, en 1777, fut nommé cardinal et qui postula pour être pape à la fin de sa vie. Gerdil était un philosophe conservateur, cartésien convaincu et opposé à la théorie de Newton. De surcroît, Gerdil avait une maison familiale à Samoëns et au moment de la fraude, il vivait à Turin où il était professeur de théologie morale et tuteur du fils du roi de Sardaigne. Enfin, le style des articles de Coultaud et Mercier ressemble beaucoup à celui des traités de physique de Gerdil. En 1754, il avait publié une *Dissertation sur l'incompatibilité de l'attraction avec les phénomènes*. Il tentait d'y réfuter la théorie

de l'attraction universelle en utilisant les phénomènes de capillarité. Il notait que si l'on applique un peu de graisse à l'intérieur d'un capillaire, l'eau ne monte pas dans le tube. Or l'attraction du verre pour l'eau ne disparaît pas par la seule présence de la graisse. Il en déduisait que l'attraction n'existe pas non plus en l'absence de graisse et, donc, qu'elle n'existe jamais.

GERDIL : LE COUPABLE?

Ainsi Gerdil faisait aussi partie des antinewtoniens, connaissait Turin et Samoëns : il a pu écrire l'article sur les horloges à balanciers. Pourquoi aurait-il envoyé cet article en 1768, 14 ans après avoir rédigé son traité? Il a sans doute été motivé par la publication d'un article de Lalande, en 1768. L'auteur mettait en doute les interprétations de Gerdil sur la capillarité et refusait ses arguments contre l'attraction universelle. Lalande expliquait qu'une goutte d'eau placée au sommet d'un tube graissé ne descend pas, ne pénètre même pas dans le tube. On ne pouvait pourtant pas en déduire que la gravitation n'existe pas. Pour lui les expériences sur la capillarité tendaient même plutôt à confirmer qu'à infirmer la réalité de l'attraction : «L'élévation du fluide

qu'on observe dans ces tuyaux me paroît de tous les phénomènes de la Physique expérimentale celui qui prouve le mieux l'attraction.» Le texte de Lalande renversait tous les arguments de Gerdil, ce qui l'aurait incité à trouver d'autres preuves expérimentales pour réfuter la théorie de Newton. Un mois plus tard, le mystérieux Coultaud publiait son article.

Nous ne saurons jamais avec certitude qui a écrit les articles signés Coultaud et Mercier. Cette affaire n'est pas caractéristique des fraudes en science. Habituellement, les fraudes sont commises par des personnes qui y voient un moyen de faire progresser plus rapidement leur carrière, d'enjoliver leur renommée ou encore de tirer un bénéfice financier. Dans ce cas, il ne s'agissait vraisemblablement ni de renommée, ni de profits, mais plutôt de conviction philosophique. Jean Coultaud – quelle que fût son identité – n'admettait pas la théorie de Newton qui attribuait une force d'attraction à la matière inanimée. Il craignait que la conception classique du monde, qui conciliait si bien la physique de Descartes et la doctrine de l'Église, ne s'effondre.

James EVANS est professeur de physique à l'Université de Puget Sound, à Tacoma.

Le retour du mildiou

Le champignon qui provoqua la grande famine irlandaise frappe de nouveau.

En 1845, le mildiou se répandit dans les cultures de pommes de terre de l'Europe entière. La famine qui s'ensuivit tua, notamment, plus d'un million d'Irlandais. Aujourd'hui, de nouvelles souches de *Phytophthora infestans*, le champignon responsable du mildiou, se propagent à travers le monde et remplacent les anciennes populations du parasite. Nombre de ces souches pathogènes résistent au métalaxyl, l'un des seuls fongicides capables de ralentir la dissémination du mildiou.

Le champignon, originaire de la vallée de la Toluca, au Mexique, existe sous deux formes sexuellement compatibles (qui peuvent se reproduire de manière sexuée), nommées A1 et A2. Pour des raisons mal comprises, seul le type A1 est sorti du Mexique au XIX^e siècle, probablement sur une plante malade. Depuis cette première migration, l'utilisation de divers fongicides, mais aussi de programmes de lutte combinant les outils génétiques et culturels, ont maîtrisé le parasite de manière satisfaisante dans la plupart des régions.

Toutefois, depuis le milieu des années 1980, une recrudescence des attaques de mildiou s'est manifestée en Amérique du Nord, où la maladie ne sévissait auparavant que de façon sporadique, mais aussi dans d'autres parties du monde. Alors qu'en dehors du Mexique, seul le type A1 avait jusqu'alors été observé, le suivi des populations du champignon révèle désormais

la présence sur les différents continents d'un mélange de souches A1 et A2. La présence simultanée des deux types sexuels A1 et A2 permet au champignon, du moins théoriquement, de se reproduire de manière sexuée, alors qu'il ne peut se multiplier que de manière asexuée lorsque seul l'un des deux types est présent.

Existe-t-il une relation entre cette nouvelle possibilité de reproduction et l'apparition de nouvelles souches de champignon du mildiou? C'est possible, mais pas encore démontré. Certains chercheurs, dont William Fry et ses collègues de l'Université Cornell, pensent que l'augmentation de diversité relevée chez le parasite aux États-Unis et au Canada résulte d'apports migratoires répétés, mais aussi de recombinaisons sexuées entre souches présentes localement. Ils attribuent le remplacement rapide des populations à la résistance au métalaxyl des souches nouvellement introduites, mais aussi à une augmentation de leur pouvoir pathogène sur la pomme de terre.

Cette explication ne s'applique cependant pas aux changements observés en Europe : les apports migratoires s'y sont vraisemblablement limités à une seule introduction récente en provenance du continent américain, en 1976-1977, lors d'importations de quantités importantes de pommes de terre pour compenser la disette de cette année de sécheresse. Des phénomènes complémentaires – voire indépendants – de la reproduction sexuée, comme des effets de dérive génétique (extinction aléatoire de certaines souches) lors de la survie du parasite durant les périodes hivernales, auraient aussi contribué aux modifications des populations.



Les champignons du mildiou ont des sacs de 35 micromètres de longueur, remplis de spores.

Au cours des dernières années, le champignon, qui nécessite un climat humide pour se développer, a causé des pertes annuelles de plus de 14 millions de tonnes sur les récoltes mondiales de pommes de terre. Si la gravité des attaques dépend pour une grande partie du climat (1997 a été une année particulièrement favorable au mildiou en Europe, alors que les attaques ont été beaucoup plus modérées en 1996), elle dépend également de la vigilance des producteurs et, en particulier, de l'application préventive de fongicides, qui bloquent la germination des spores du parasite.

Toutefois, les applications de fongicides coûtent cher, et elles ne sont pas sans conséquences sur la santé des agriculteurs et sur l'environnement. Les biologistes préconisent donc une stratégie globale, faisant plus largement appel aux capacités de résistance de la plante. Ainsi, depuis 1996, le Centre international de la pomme de terre, basé à Lima (Pérou), coordonne un programme mondial destiné à lutter contre le mildiou. Son but est la mise au point de variétés de pommes de terre résistant à l'ensemble des souches du champignon. L'une des voies poursuivies est le croisement avec des espèces résistantes apparentées. Certaines variétés, déjà disponibles, sont utilisées principalement pour des cultures vivrières. Les agronomes cherchent maintenant à adapter ces variétés très résistantes aux exigences des marchés européens ou américains de produits frais, ainsi qu'aux exigences de la transformation industrielle ; dans ces deux cas, d'autres caractéristiques que la résistance au mildiou (comme le goût ou le rendement) sont primordiales. Outre cet effort d'amélioration génétique de la plante, une stratégie globale requiert aussi des moyens de prévision des épidémies, afin de minimiser l'utilisation des pesticides.



Les pommes de terre infectées par le mildiou sont recouvertes d'une pourriture sèche brunâtre.

Forges gallo-romaines

Les déchets renseignent sur l'organisation des forges et sur le savoir-faire des forgerons.

Les forgerons gallo-romains étaient réputés pour leur savoir-faire. Comment travaillaient-ils ? Les rares produits finis découverts dans les ateliers des sites archéologiques apportent peu d'informations sur les étapes de leur fabrication. En revanche, l'analyse physique et chimique des déchets produits lors du forgeage a permis de reconstituer l'activité d'ateliers du I^{er} siècle de notre ère. L'étude fine de ces déchets nous informe même sur le niveau technique des forgerons qui travaillaient là.

Lors du chauffage d'une pièce en acier, un oxyde, la calamine, se forme au contact de l'oxygène de l'air. Les contraintes mécaniques exercées sur la calamine par le forgeage la détachent de la surface sous forme de petits éléments, nommés battitures. La composition physico-chimique, la forme et la structure cristallographique des battitures renferment des informations sur l'opération de forgeage qui les a engendrées : température, martelage et technique.

Nous avons produit un ensemble de battitures pour plusieurs opérations associées au forgeage définies à partir de données archéologiques et ethnographiques et dans des conditions variées et bien caractérisées. La comparaison, avec ces battitures de référence, des battitures découvertes sur les sols d'ateliers qui ont fonctionné entre 15 et 80 de notre ère, sur le site de la Cité judiciaire, à Bordeaux, a révélé

que des forgerons-charrons y avaient principalement fabriqué des bandages de roues.

Nous avons localisé, sur une importante aire d'activités, des ateliers correspondant à sept étapes successives de fabrication : fabrication d'ébauches par étirage de lingots de métal brut ; réalisation de profilés à section rectangulaire ; assemblage des profilés en bandages de longueur désirée ; calibrage des bandes ; traitement thermo-chimique ; formage et cintrage sur un gabarit ; fermeture du cercle par soudage localisé à chaude portée (les deux extrémités à souder sont portées à 1 250 °C environ par martelage, puis des minéraux projetés réduisent la température de fusion du métal en surface et empêchent la formation d'oxydes).

Des analyses qualitatives de battitures produites par deux ateliers d'une même zone, donc par des opérations semblables, révèlent des structures microscopiques et des compositions chimiques légèrement différentes : ces variations résultent du savoir-faire des forgerons. Ceux-ci évaluent en effet la température de chauffe en fonction de la couleur du métal. Cette perception varie d'un individu à l'autre et peut produire un écart de 40 à 70 °C, suffisant, par exemple lors d'une opération de soudage, où l'on ajoute des fondants minéraux, pour modifier la constitution physique ou chimique des battitures. De même, une frappe plus ou moins régulière du forgeron laisse des stigmates reconnaissables dans les battitures. L'observation et la comparaison des battitures sur ces critères permet ainsi de distinguer les productions de plusieurs forgerons.

Jean-Claude LEBLANC, Lab. de minéralogie et de cristallographie, Université Paul-Sabatier, CNRS UMR 5563, Toulouse

BRÈVES

Cosmologie ancienne

Dans le Sud du Sahara égyptien, sur le site de Nabta, des archéologues ont découvert un alignement de mégalithes plus ancien que tous ceux qui étaient connus. Ces pierres, dont certaines ont près de trois mètres de hauteur, ont été érigées il y a 6 000 à 6 500 ans (1 000 avant Stonehenge), alors que la région, moins aride qu'aujourd'hui, était peuplée de bergers. Ces alignements avaient-ils une fonction astronomique ? Vraisemblablement, car plusieurs d'entre eux sont orientés selon les points cardinaux. En outre, un cercle de ces mégalithes est ouvert dans la direction du lever du Soleil au solstice de juin de cette époque. Il y a 5 000 ans, la désertification de la région la dépeupla. L'exode de ses habitants vers la vallée du Nil aurait favorisé le développement économique et culturel de la Haute Égypte.



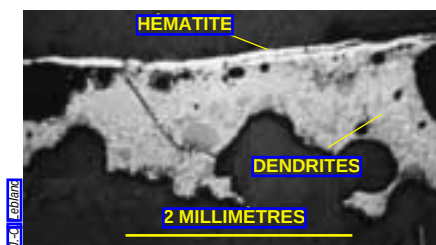
Nuit de labour

La nuit est propice aux labours : les graines de la plupart des mauvaises herbes requièrent de la lumière pour la germination, alors que les graines de semis comme le blé germent dans le noir. Aussi, quand on laboure de jour, des graines de mauvaises herbes sont amenées à la surface où elles germent avant d'être enfouies à nouveau. À l'inverse, les labours de nuit ne permettent pas la germination des mauvaises herbes, de sorte qu'une quantité inférieure d'herbicide est requise.

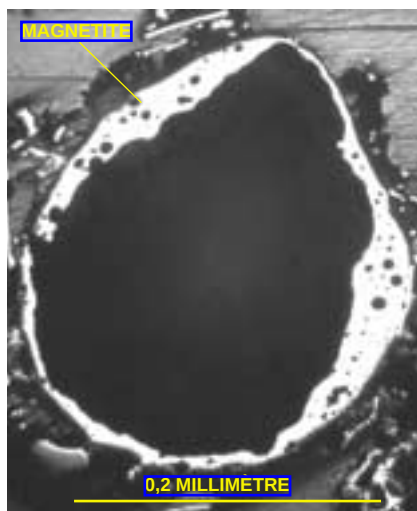
De nouveaux antibiotiques

De plus en plus de bactéries résistent aux antibiotiques, et plusieurs souches sont déjà multirésistantes. Pour éviter d'être démunis face aux maladies bactériennes, on doit utiliser avec parcimonie les antibiotiques encore efficaces ou trouver de nouvelles classes de ces précieux médicaments. Une équipe de Boston a synthétisé de la myxopyronine, une substance qui inhibe la multiplication des bactéries résistantes, et que, jusqu'à présent, on n'avait isolé qu'en quantité infime, dans certaines bactéries. La myxopyronine inhibe l'enzyme ADN polymérase bactérienne, indispensable à la réplication cellulaire, sans agir sur l'enzyme correspondante humaine.

Suite page 22



La structure microscopique et la composition chimique des déchets, nommés battitures, produits par le forgeage sont caractéristiques de l'opération réalisée. Une battiture lamellaire (à gauche), avec un liseré d'hématite et des dendrites en oxydes de fer cristallins, a été produite lors du forgeage et du soudage d'une grosse pièce. Une petite battiture globulaire creuse (à droite), entourée d'une pellicule de magnétite, est un résidu du soudage d'une petite pièce.



Viagra : les premiers doutes

Une étude conduite sur 532 hommes, la moitié prenant la pilule *Viagra*, qui rétablit la fonction érectile, l'autre moitié recevant un placebo, vient d'être publiée dans le *New England Journal of Medicine* : les hommes prenant *Viagra* ont eu deux fois plus d'érections. Toutefois, les hommes qui ont participé à l'étude n'étaient pas tous impuissants. En outre, la pilule ne traitant pas la cause de l'impuissance, les patients risquent d'augmenter les doses, ce qui inquiète les ophtalmologistes : *Viagra* dilate les vaisseaux, augmentant l'afflux de sang dans le pénis en inhibant une enzyme qui, par ailleurs, est indispensable au bon fonctionnement des cellules de la rétine responsables de la vision des couleurs. Or les personnes ayant un déficit congénital de cette enzyme finissent par souffrir de lésions irréversibles de la rétine. Une surconsommation de *Viagra* aura-t-elle les mêmes conséquences?



MUSSES DU VITRAGE

Le «star system»

Une société de l'Illinois qui, en échange de quelques centaines de francs, attribue à des étoiles les noms choisis par ses clients est poursuivie pour publicité mensongère : les astronomes n'utilisent, outre les coordonnées stellaires, que les noms attribués par l'Union astronomique internationale, qui ne commercialise pas ces noms.

Riches gallo-romaines

Deux sépultures du Bas-Empire romain (IV^e siècle de notre ère), exceptionnellement conservées, ont été découvertes à Naintré, dans la Vienne. Deux caveaux accolés contenaient chacun des vases, de la vaisselle, divers autres objets familiaux, et aussi un sarcophage en pierre et un cercueil en plomb. À l'intérieur de ces derniers, qui n'ont été qu'entrouverts, les restes de deux femmes de classe aisée sont couverts de leurs vêtements et reposent sur des étoffes. Le Centre archéologique régional de Poitiers installe un laboratoire en atmosphère contrôlée (80 pour cent d'humidité et 5°C) avant de rouvrir les cercueils et d'en entreprendre l'étude.

Suite page 24

Rééducation accélérée

L'injection de stimulants facilite la récupération de chats paraplégiques

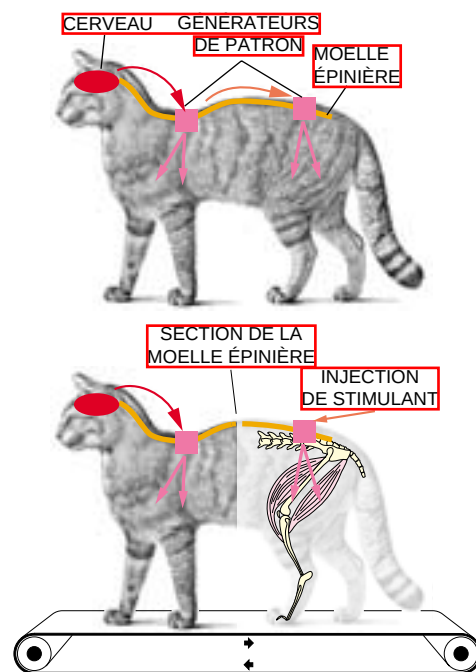
Une lésion de la moelle épinière, due à un traumatisme vertébral ou à une maladie, entraîne souvent une paralysie des membres inférieurs. Saura-t-on un jour faire remarquer les personnes atteintes? Nous avons rééduqué les membres postérieurs de chats paraplégiques en combinant un entraînement sur tapis roulant et l'injection temporaire d'un produit stimulant.

Comment marchons-nous? Chez les mammifères supérieurs, comme chez les invertébrés et chez les vertébrés primitifs, le «patron locomoteur», séquence d'activation coordonnée des muscles qui produit les mouvements alternés des membres, du corps ou des appendices nécessaires à la locomotion, est engendré par un ensemble de neurones nommé «générateur central de patron» qui est situé, pense-t-on, dans la moelle épinière. Les centres supérieurs du cerveau l'activeraient et l'adapteraient aux besoins de l'animal (vitesse, direction...) en libérant des neurotransmetteurs. La peau, les muscles et les articulations transmettent aussi au générateur de patron des informations qui permettent l'adaptation des mouvements aux contraintes de l'environnement immédiat (obstacles, surface inégale, etc.).

Chez des chats dont la moelle épinière est coupée au niveau de la dernière vertèbre thoracique, le cerveau ne commande plus le générateur central de patron des membres postérieurs, car les neurotransmetteurs qui activent la marche sont synthétisés par des neurones situés au-dessus de la moelle épinière, dans le tronc cérébral. Le train arrière reste donc paralysé.

Nous avons injecté dans l'arrière-train de tels chats, près de la moelle épinière, de la clonidine, une molécule qui imite certaines actions des neurotransmetteurs et qui active des neurones de la moelle épinière. L'enregistrement de l'activité musculaire montre l'apparition d'une activité rythmique alternée dans les deux membres quelques minutes seulement après l'injection de la clonidine. Placé sur un tapis roulant, l'animal commence à marcher.

En outre, l'injection quotidienne de clonidine, les jours qui suivent la lésion, permet l'entraînement quotidien du



Chez les vertébrés supérieurs, les muscles responsables de la marche sont activés (flèches roses) par des générateurs de patron locomoteur (carrés roses) situés dans la moelle épinière (trait orange) ; ces générateurs sont activés lorsqu'ils reçoivent des neurotransmetteurs (flèches rouges) émis par le cerveau. Chez un chat dont la moelle épinière est coupée (en bas), la commande volontaire de la marche du train arrière est impossible. L'injection d'un stimulant (clonidine) près du générateur de patron facilite la marche sur tapis roulant : après une semaine d'entraînement, le chat marche seul sur le tapis.

chat à la marche sur un tapis roulant (cet entraînement précoce serait impossible sans la drogue). La récupération locomotrice semble ainsi accélérée : en une semaine environ, au lieu de plusieurs, le chat peut marcher sur le tapis roulant avec son train arrière sans injection préalable de clonidine.

Une telle approche combinant l'entraînement locomoteur et la pharmacothérapie, de même que la stimulation électrique fonctionnelle des membres, est en cours de validation chez l'homme dans des laboratoires québécois et français. Elle faciliterait une certaine récupération fonctionnelle. Elle ne rétablit toutefois pas la commande volontaire de la marche. D'autres thérapeutiques sont aussi explorées : la greffe de cellules libérant des substances analogues à la clonidine dans la moelle épinière, ou de cellules qui rétablissent des connexions entre les parties lésées de la moelle épinière et le générateur central de patron qui commande les jambes.

Serge ROSSIGNOL
Centre de recherche en sciences neurologiques, Université de Montréal

Suicide nuptial chez les fourmis

Le mâle est tué par la femelle juste après l'accouplement.

L'organisation des sociétés de fourmis est variée : certaines se répartissent rigoureusement les tâches, d'autres non. C'est du moins ce que l'on pensait, car Christian Peeters, du Laboratoire «Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques», et Thibaud Monnin, du Laboratoire d'éthologie expérimentale et comparée, ont montré que, même dans certaines espèces non spécialisées, seules quelques fourmis assurent la reproduction de la colonie.

Dans la plupart des sociétés de fourmis, deux catégories de femelles adultes cohabitent. D'une part, les ouvrières, sans ailes et généralement stériles, accomplissent les tâches sociales, telles que l'élevage du couvain, l'approvisionnement ou encore la défense. D'autre part, les reines, ailées et reproductrices, s'envo-

lent à la recherche d'un partenaire étranger à la colonie et fondent une nouvelle société.

Au contraire, parmi les quelque 1 500 espèces de fourmis, dites primitives, qui ressemblent à des guêpes, le dimorphisme entre reines et ouvrières est peu marqué ; dans certains groupes dépourvus de reines, toutes les ouvrières peuvent s'accoupler ; elles ont une spermathèque fonctionnelle, un organe où le sperme du mâle est stocké.

Pourtant, chez certaines espèces de ces groupes sans reine, seule certaines fourmis se reproduisent (comme dans les sociétés hiérarchisées). La stratégie des mâles dépend alors du nombre de femelles capables de s'accoupler. Chez une fourmi indienne, par exemple, où toutes les ouvrières peuvent se reproduire, le mâle s'accouple à plusieurs jeunes femelles : seules les fourmis où la concentration en hormones de la reproduction augmentera jusqu'à stimuler l'activité ovarienne seront fécondées et pondront des œufs. L'espèce *Diacamma australe* a adopté une autre stratégie, où la régulation intervient avant l'accouplement : une ouvrière dominante castré les autres ouvrières en leur arrachant leurs ébauches d'ailes. Cette ablation inhibe le cycle hormonal qui aboutit normalement à l'ovulation. Seule l'unique ouvrière ailée est fécondable.

C. Peeters et T. Monnin ont également observé que toutes les ouvrières de l'espèce brésilienne primitive *Dinoponera quadricaps* – la plus grande fourmi du monde, puisqu'elle mesure environ trois centimètres – ne s'accouplent pas. Chez *Dinoponera quadricaps*, la régulation a lieu avant l'accouplement. Chaque groupe compte au maximum une centaine d'ou-

vières, toutes identiques. À la mort de l'ancienne reproductrice ou après scission de la colonie, des affrontements ritualisés établissent très vite une hiérarchie sociale où se détache une ouvrière dominante qui, campée sur ses pattes, a un maintien arrogant. Seule cette ouvrière, nommée alpha, s'accouplera. Les sécrétions d'hormones sexuelles d'une fourmi dépendent de sa position hiérarchique, et elles sont maximales chez l'ouvrière alpha.

Cette fourmi est la seule à faire de brèves sorties, chaque soir, aux abords du nid, à la recherche d'un prétendant étranger à la colonie. Sitôt accouplée, la femelle fait basculer son abdomen vers l'avant ; elle entraîne le mâle devant elle et lui sectionne l'abdomen. L'acte dure une à deux minutes. Elle met ensuite près d'une demi-heure à se débarrasser des pièces génitales de son partenaire qui sont restées engagées dans son propre appareil sexuel. Elle n'est alors plus réceptive aux avances d'autres prétendants potentiels.

Dans cette espèce, les mâles, qui ne vivent qu'un à deux jours, meurent pour assurer leur descendance. Un mâle n'a guère de chances de trouver une deuxième fourmi alpha vierge au cours de sa brève vie et se sacrifie pour empêcher un rival de s'accoupler. Selon C. Peeters, le «bouchon d'accouplement» est une garantie de paternité. Puisqu'au bout d'une trentaine de minutes, la femelle n'est plus sexuellement réceptive, le mâle kamikaze aura fécondé tous les œufs de la fourmi alpha pendant la période où elle est fécondable. Un tel bouchon d'accouplement existe chez d'autres fourmis primitives, notamment chez *Diacamma australe*, où des ouvrières stériles viennent sectionner l'abdomen du mâle après l'accouplement de la fourmi qui pondra les œufs de la colonie.

Marie-Thérèse LANDOUSY



La femelle (à gauche) a basculé son abdomen vers l'avant et entraîné le mâle qui la couvrait. Elle sectionne alors l'abdomen du mâle avec ses mandibules.

Un vaccin contre le cancer ?

De petites vésicules sécrétées par l'organisme stimulent le système immunitaire, qui détruit certaines tumeurs chez la souris.

Les cellules tumorales portent des molécules nommées antigènes qui devraient les signaler à l'attention du système de défense de l'organisme : ces cellules expriment, par exemple, des protéines anormales codées par un gène muté ; or le système immunitaire est activé quand il reconnaît des

molécules étrangères, et il détruit les cellules qui les portent. L'idée est née, il y a quelques années, qu'en stimulant le système immunitaire contre les protéines portées par les cellules tumorales – les antigènes tumoraux –, on disposerait d'un moyen de lutter contre le cancer : c'est l'immunothérapie adoptive. Travaillant dans cette voie, l'équipe de Laurence Zitvogel, à l'Institut Gustave Roussy, et celle de Sebastian Amigorena, à l'Institut Curie, viennent d'isoler des particules qui activent suffisamment le système immunitaire pour que, chez des souris, certaines tumeurs régressent, voire disparaissent.

Le système immunitaire est activé quand les antigènes étrangers sont absor-

bés par des cellules dites présentatrices d'antigènes, qui les découpent en morceaux (les peptides antigéniques) et les exposent correctement à leur surface. Les cellules dendritiques sont de telles cellules présentatrices d'antigènes. Tant qu'elles sont immatures, elles ne sont pas capables d'activer directement les lymphocytes T, mais absorbent les antigènes, les découpent et les associent aux molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe I et II. Ces paires peptides-molécules du complexe majeur d'histocompatibilité sont transportées à la surface des cellules dendritiques en cours de maturation, lesquelles deviennent capables de présenter les antigènes et d'activer les lymphocytes T.

Moustique et épizooties

La fièvre de la vallée du Rift est due à un virus transmis par les moustiques. Ce vecteur, lointain cousin d'Ebola, est notamment responsable de fièvres hémorragiques. Des équipes de l'ORSTOM et de l'Institut Pasteur de Dakar ont identifié deux nouveaux moustiques porteurs du virus. Jusqu'en 1970, le virus ne faisait pas de victimes chez l'homme, mais la situation a changé après la mise en eau du barrage d'Assouan. En cas de fortes inondations ou de création de barrages, les moustiques pullulent, transmettant une quantité de virus notable aux hommes et au bétail. Une étude a montré que 15 pour cent des ruminants des troupeaux près du fleuve Sénégal portent des anticorps contre ce virus, ce qui prouve que le virus circule régulièrement parmi les troupeaux et que de nouvelles épizooties sont à craindre.

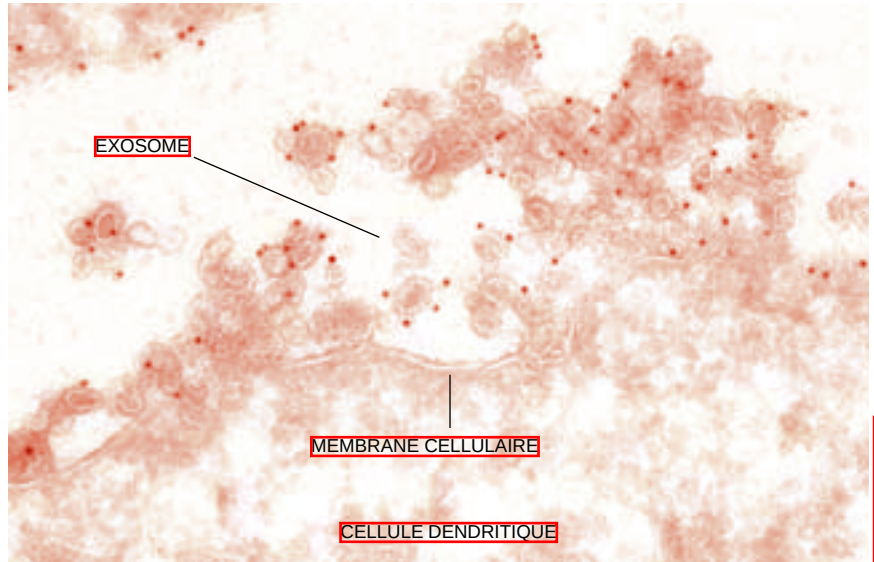


Dent intermédiaire

Deux nouvelles espèces d'australopithèques (*Australopithecus anamensis* au Kenya et *Australopithecus Bahrelghazali* au Tchad) et un nouveau genre d'hominiidés, *Ardipithecus*, ont été découverts ces quatre dernières années. Selon l'équipe de Meave Leakey, du Muséum national du Kenya, la première molaire de lait d'*Australopithecus anamensis*, qui vivait il y a 4,1 millions d'années, a une structure intermédiaire entre celles d'*Ardipithecus ramidus* (4,5 millions d'années) et d'*Australopithecus afarensis* (3,5 millions d'années). D'autres filiations entre ces trois espèces seront bientôt possibles, lorsque les squelettes d'*Ardipithecus* découverts en Éthiopie par Tim White seront enfin présentés.

Le coût des voyages dans le temps

Le retour vers le passé n'est facile que dans les romans de science-fiction. La réalité est plus amère, car les retours dans le temps, bien que possible selon les lois de la physique, sont incroyablement difficiles : pour revenir en arrière d'une microseconde il faudrait passer au voisinage d'un trou noir dont la masse serait un dixième de celle du Soleil. Sans compter le danger notable d'être aspiré à jamais dans les entrailles du trou noir.



Une cellule dendritique a libéré une multitude de petites vésicules, les exosomes. Ce sont ces particules qui, injectées à des souris, ont fait régresser des tumeurs. Sur cette photographie en microscopie électronique, le grossissement est égal à 50 000.

Cette association des peptides antigéniques et des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité prend place dans des compartiments des cellules dendritiques, nommés endosomes, pour les molécules de classe II, et dans le réticulum endoplasmique, pour les molécules de classe I. Les endosomes sont transportés jusqu'à la surface des cellules dendritiques, leur membrane fusionne avec celle des cellules et leur contenu est libéré à l'extérieur. Les endosomes ressemblent à des sacs contenant des billes, de petites vésicules nommées exosomes. Les exosomes sont donc libérés hors des cellules dendritiques. L'analyse d'une culture de cellules dendritiques a montré que les exosomes portent des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité associées à des antigènes tumoraux.

Ces exosomes activent-ils le système immunitaire ? Oui : les biologistes de l'Institut Gustave Roussy et de l'Institut Curie ont prélevé des cellules dendritiques à des souris saines, ils ont stimulé leur prolifération, *in vitro*, au moyen de facteurs de croissance, et ils les ont exposées à des antigènes de tumeurs prélevées à des souris ayant une tumeur mammaire ou un cancer de certaines cellules sanguines (un mastocytome). Les cellules dendritiques ont libéré des exosomes que les biologistes ont injectés aux souris atteintes de tumeurs : les mastocytomes ont disparu dans 60 pour cent des cas, et la croissance des tumeurs mammaires a ralenti. On en conclut que les exosomes portaient les peptides antigéniques spécifiques des tumeurs, qui ont activé le système immunitaire.

Les biologistes continueront à tester les exosomes chez l'animal, puis ils éva-

lueront leur efficacité chez l'homme. Même si l'activité se confirme, une difficulté notable demeurera avant qu'un traitement soit mis au point : jusqu'à présent, on a isolé très peu d'antigènes spécifiques des cellules tumorales. Or, pour activer les lymphocytes T, les cellules dendritiques doivent leur transmettre une information essentielle : la nature de l'antigène contre lequel ils doivent lutter. Pour leur faire produire des exosomes présentant les antigènes tumoraux, on met les cellules dendritiques immatures en présence, soit de l'antigène tumoral (quand on le connaît), soit d'un mélange des constituants des cellules tumorales. Les exosomes portent alors toute une panoplie de peptides antigéniques, dont certains sont spécifiques de la tumeur et activent le système immunitaire.

Bien que les cellules dendritiques semblent avoir les qualités requises pour faire des cellules présentatrices d'antigènes efficaces, les exosomes seraient des agents «vaccinants» encore plus performants : ils sont stables et on peut en produire de grandes quantités dans des cultures de cellules dendritiques sensibilisées à l'antigène tumoral. Cette méthode, efficace chez la souris, n'a pas été testée chez l'homme, mais on espère stimuler le système immunitaire de certaines personnes atteintes d'un cancer en prélevant, dans leur sang, des cellules dendritiques et en les plaçant en culture : on recueillerait les exosomes produits, lesquels porteraient les antigènes stimulant le système immunitaire contre la tumeur et on les réinjecterait au patient. Des «vaccinations» répétées entretiendraient l'activation du système immunitaire et devraient éviter les rechutes.

Correction d'erreurs

Des molécules qui se répliquent corrigent les erreurs de reproduction.

La reproduction des organismes semble avoir des particularités qui font, du vivant, un règne à part. Pourtant, des chimistes viennent de montrer que des molécules ont des comportements analogues à ceux des organismes ; même des phénomènes analogues à ceux de l'évolution se retrouvent dans les éprouvettes.

Au cœur du problème étudié par les chimistes, il y a celui de la stabilité des espèces en biologie: si les organismes vivants n'évoluaient pas, ils ne pourraient s'adapter aux conditions changeantes des milieux ; toutefois les mutations, qui sont des «erreurs» de reproduction et qui permettent l'apparition d'individus mieux adaptés à leur milieu, risquent de conduire à des individus non viables, parce qu'elles dérangent un ordre physiologique subtil.

Afin d'analyser le rôle exact des mutations, Kay Severin et ses collègues de l'Institut Skaggs, en Californie, ont étudié un système composé de quelques peptides, c'est-à-dire de molécules formées par l'enchaînement de sous-unités nommées acides aminés. Quand deux peptides *E* et *N*, composés respectivement de 15 et 17 acides aminés, sont mélangés *in vitro*, ils se lient et engendrent un peptide *T*, lequel catalyse la réaction : il se lie ensuite à une molécule *E* et à une molécule *N*, qu'il lie ensemble en une nouvelle molécule *T*.

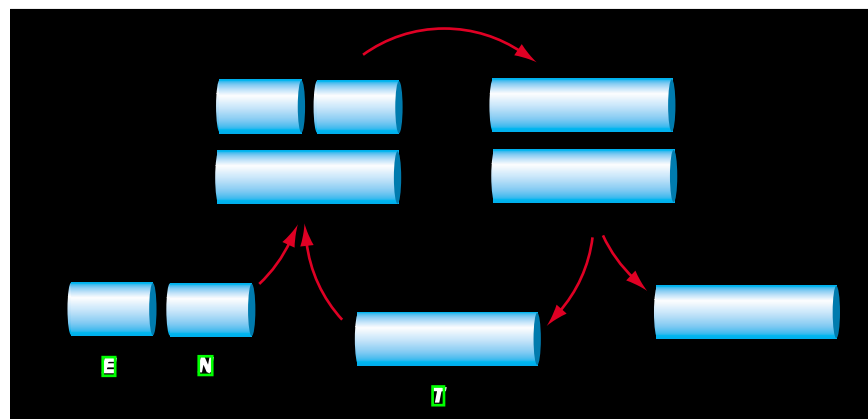
Quand on ajoute dans le milieu deux molécules *E9A* et *N26A*, respectivement identiques à *E* et à *N* à l'exception d'un changement d'un acide aminé

(l'alanine remplace la valine, dans la séquence *E* ; l'alanine remplace la lysine dans la séquence *N*), on observe la formation de quatre produits : le peptide *T*, quand les réactifs *E* et *N* s'enchaînent, et des peptides mutants *T9A*, *T26A* et *T9/26A* quand les peptides mutants sont utilisés.

La réaction s'apparente à une reproduction biologique : les séquences *T* catalysent leur propre production. L'addition de réactifs mutants augmente la proportion de séquences *T* mutantes. Le mélange de *E*, de *N26A* et de *N*, ou le mélange de *E*, de *E9A* et de *N* engendrent plutôt le peptide *T* que les peptides «mutants» *T9A* et *T26A* : ceux-ci ne catalysent pas leur propre formation. En revanche, ces deux peptides catalysent la formation de *T*.

Au total, le système s'organise en un réseau de trois cycles catalytiques connectés, avec un mécanisme correcteur d'erreur : chaque fois qu'un peptide mutant est produit, il catalyse la formation de la séquence non mutante *T*, et, comme les cycles catalytiques sont couplés au cycle original, chaque nouvelle molécule stimule sa propre production. L'effet total est une régulation de la production de la séquence initiale... et des mutants.

Les peptides ne sont pas des molécules anodines, du point de vue biologique, puisqu'elles sont présentes dans les cellules vivantes ; elles catalysent leur propre formation, tout comme les êtres vivants qui se reproduisent ; elles sont en concurrence pour les peptides de base, comme les organismes vivants le sont pour les ressources du milieu ; des mutants peuvent apparaître, mais ils restent en proportion limitée tant que les ressources du milieu ne changent pas. Il y a certainement un fossé entre le monde des molécules et celui des espèces, mais, apparemment, ces mondes ont des mécanismes en commun.



La séquence *T* catalyse sa formation en se liant simultanément aux deux séquences *E* et *N*.



ISMANS

Institut Supérieur des Matériaux du Mans
44, av. F.A. Bartholdi 72000 - Le Mans
33(0)2 43 21 40 00
fax 33(0)2 43 21 40 39
http://ismans.univ-lemans.fr
E-mail : ismans@ismans.univ-lemans.fr

**CENTRE EUROPEEN DE
COMPÉTENCES
GÉNIE NUMÉRIQUE DES
MATÉRIAUX ET INTERFACES
INDUSTRIELS**

⇒ Une École d'Ingénieur (CTI)

Tutelle du Ministère de l'Industrie
(École Consulaire)

sur Concours CPGE (ICARE)
sur dossier : MAÎTRISE (2ème année)

- Option Matériaux et Mécanique
- Option Matériaux Fonctionnels (optique, électronique, magnétique, polymères)
- Année de spécialité (Génie Numérique)
- Master International avec l'Université de Hull (International Project Management for High Tech Start Up 1999)

⇒ Un Centre de Recherche

- Génie numérique des matériaux (CAO/CMAO/Prototypage)
- Mécanique et Dispositifs multiMatériaux
- Matériaux Magnétiques
- Dynamique et Géométries Fractales

⇒ Des Partenariats Scientifiques

et Industriels Internationaux
(entre autres)

- Deutsches Institut für Kautschuktechnologie
- MIT (Nuclear and Chemical Engineering)
- Molecular Simulation Consortiums
(Industries et Universités transnationales)

⇒ Des Références :

- Expériences Industrielles et Brevets
- Publications Scientifiques
- Ouvrages :
- Calcul par éléments finis. Masson 1997
- Flèches du Temps, Hermes 1998
- Management par projet. Ed. Organ. 1997

⇒ Un Placement Industriel :

Salaire 180-210 kF/an

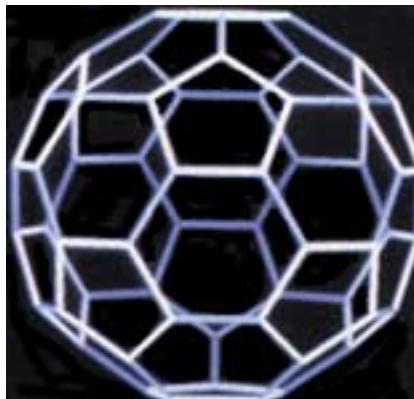
Le carbone au corps

Comment l'organisme assimile les fullerènes.

Il y a quelques années, des chimistes découvraient les fullerènes, ces molécules composées uniquement d'atomes de carbone, dont le représentant le plus connu est la molécule de formule C_{60} , composée de 60 atomes de carbone répartis aux nœuds d'un polyèdre en forme de ballon de football. Rapidement l'industrie explora leurs applications industrielles... et le problème de leur toxicité se posa. Comment ces molécules sont-elles métabolisées par l'organisme?

Une première étude du cheminement du C_{60} dans le corps avait montré que la molécule s'accumulait surtout dans le foie, où elle semblait demeurer sans modification. Nous avons montré que les fullerènes réagissent dans l'organisme.

Afin d'étudier la toxicité des fullerènes, nous avons injecté dans le péritoine de souris une suspension de C_{60} . Sept jours plus tard, les analyses des



La molécule de C_{60} (à droite) forme des solutions dont la teinte rosée dépend de la concentration (à gauche).

extraits hépatiques des souris traitées révélèrent la présence de plusieurs composés absents des foies de souris non traitées. Deux de ces nouveaux composés au moins sont des dérivés de C_{60} : ils proviennent d'une réaction de C_{60} avec la vitamine A et avec l'un des dérivés de cette dernière.

Mieux encore, les composés détectés semblaient résulter d'une réaction classique de chimie organique, nommée réaction de Diels-Alder, qui engendre des molécules contenant des cycles. Étrange observation, en vérité, car on n'a jamais observé une telle réaction *in vivo* ! Pour vérifier la particularité métabolique du C_{60} , nous avons mélangé *in vitro* le C_{60} et la vitamine A, et nous avons retrouvé les mêmes composés que dans les foies de souris. Ainsi la molécule de C_{60} peut réagir en dehors des voies métaboliques admises jusque-là. Nous mettrait-elle sur la piste de réactions métaboliques indétectées ? Peut-être, puisque la molécule de C_{60} est naturellement présente dans la suie... Ces formations sont-elles suivies de l'élimination des produits formés ? Le processus de métabolisation serait alors complet.

F. MOUSSA, Fac. de pharmacie de Tours
H. SZWARC, CNRS, Univ. Paris Sud, Orsay

Hydrodynamique lumineuse

Le plancton éclaire la nage des mammifères marins.

Aux Antilles, dans la partie Sud de Puerto Rico, la baie phosphorescente offre au visiteur une belle illustration de la bioluminescence : l'eau y est riche en dinoflagellés, un phytoplancton bioluminescent ; quiconque nage la nuit dans ces eaux tropicales est entouré d'un halo lumineux. Outre son aspect esthétique indéniable, la bioluminescence informe les biologistes sur les animaux marins, et, en particulier, sur le déplacement des grands mammifères. Grâce à ce moyen d'étude original, des chercheurs de l'Université de San Diego ont montré que le nimbe lumineux autour d'un dauphin renseigne sur la structure du flot hydrodynamique qui entoure l'animal.

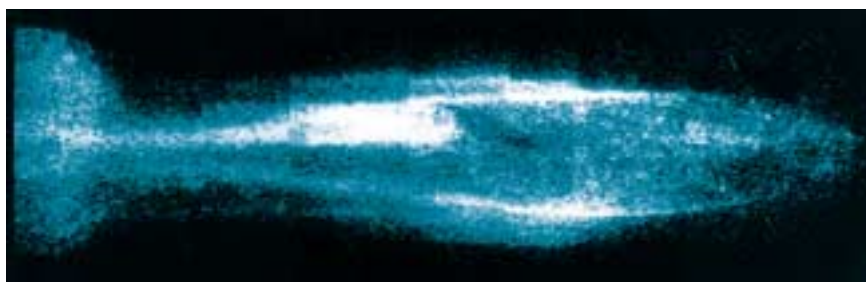
La bioluminescence est un phénomène répandu dans les eaux côtières : les objets qui se déplacent dans de l'eau où la concentration en plancton lumineux est supérieure à une centaine

d'individus par litre sont illuminés. La bioluminescence est activée par la déformation des cellules du plancton, mais l'on ignore encore comment ce stimulus mécanique déclenche finalement la réaction chimique qui produit la lumière.

La bioluminescence des dauphins était curieusement absente de la littérature scientifique. Cet oubli est d'autant plus étrange que les carnets de bord des navires regorgent de descriptions de dauphins fantomatiques qui accompagnent les navires dans leurs voyages. Malheureusement, ces récits sont de peu d'utilité pour l'étude de la nage des dauphins, car les conditions extérieures, comme la quantité de plancton biolumi-

nescent, n'y sont pas notées. Pour combler cette insuffisance, des biologistes et des physiciens ont entrepris une étude systématique de la bioluminescence marine et de son lien avec la nage des dauphins.

Puisque la déformation des cellules du plancton déclenche la production de lumière, la bioluminescence est principalement commandée par le cisaillement, qui caractérise la différence de vitesse entre deux couches de liquide. Pour préciser cette relation, les chercheurs ont placé des dinoflagellés dans un écoulement dont le cisaillement varie. Ils ont ainsi mesuré, pour diverses concentrations en dinoflagellés, l'intensité de la bioluminescence en fonction du cisaillement : la



Vue de dessus d'un dauphin bioluminescent nageant à 2,2 mètres par seconde (le dauphin mesure deux mètres de long).

bioluminescence commence au-dessus d'un seuil et augmente ensuite avec le cisaillement.

Restait à connaître le cisaillement à la surface d'un dauphin. Les chercheurs ont alors modélisé le corps d'un dauphin comme un ellipsoïde allongé six fois plus long que large, puis ils ont simulé l'écoulement à une vitesse fixée autour de cette forme. Ils ont déterminé l'épaisseur de la couche limite, la mince pellicule qui entoure le dauphin et où la vitesse du flot diminue notablement. Selon ces simulations et pour des vitesses de flot comprises entre deux et huit mètres par seconde, le cisaillement près de la surface du dauphin modélisé est toujours supérieur au seuil de bioluminescence.

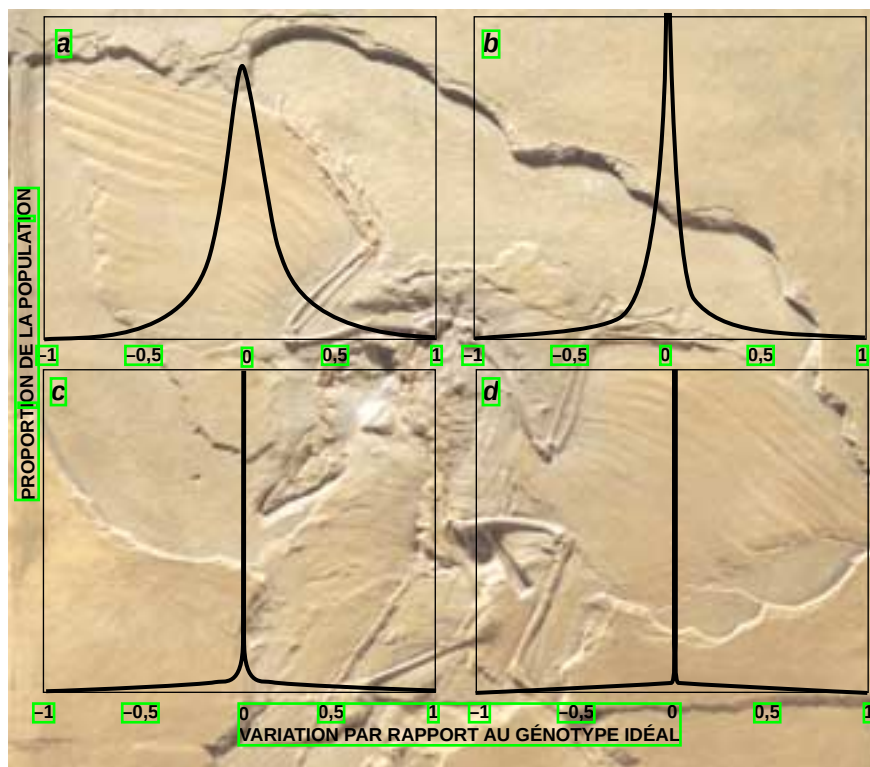
Des films de dauphins nageant près de bateaux ont révélé des phénomènes de bioluminescence tout le long de leur corps, excepté près de leur bosse et des bords avant des nageoires pectorales et dorsale. Ce résultat peut paraître paradoxal, car c'est précisément à l'avant des nageoires que le cisaillement est maximal. La raison en est sans doute que, dans ces régions, la couche limite est très mince et contient trop peu de micro-organismes luminescents stimulés.

Habituellement, on visualise l'écoulement hydrodynamique autour des bateaux grâce à des colorants dans des bassins artificiels. Avec les dinoflagellés, les hydrodynamiciens ont trouvé une visualisation naturelle du flot autour des grands mammifères marins : la bioluminescence est maintenant un outil de recherche.

Mutations interdites

Les gènes qui déterminent beaucoup de caractères n'évolueraient pas sur de très longues périodes.

Tous les caractères d'un organisme évoluent-ils constamment ? La plupart des généticiens des populations le pensent, mais Günter Wagner, de l'Université Yale, fait partie d'une minorité de biologistes qui ont un point de vue plus nuancé : même si de nombreux caractères sont hautement variables, certains semblent être fixés dans des groupes d'espèces qui descendent d'une souche commune. Par exemple, la notocorde, première ébauche de la colonne vertébrale chez les embryons des vertébrés, est identique dans les diverses espèces du groupe. Les protagonistes du débat semblaient irré-



Un nouveau modèle donne la répartition des mutations d'un gène dans une population, en prenant en compte la possibilité qu'un gène contrôle plusieurs caractères. Les courbes «en cloche» indiquent que des génotypes mutants regroupés autour de l'«idéal» théorique (repéré par le 0 de l'axe des abscisses) sont fortement représentés : c'est le cas si le gène détermine un (a) ou deux (b) caractères. En revanche, pour trois (c), quatre (d) caractères déterminés et au-delà, le «pic» signifie qu'une très forte majorité de la population possède le génotype le mieux adapté, et les génotypes mutants disparaissent. Le degré de variation entre deux génotypes est mesuré par une échelle continue qui décrit la proportion d'ADN modifié.

conciliables jusqu'à ce que, récemment, un résultat mathématique de génétique des populations appuie l'hypothèse de la fixation de certains caractères.

L'évolution biologique résulte d'une évolution du patrimoine génétique des organismes. Des variations d'un gène apparaissent accidentellement lors de mutations génétiques. Le plus souvent, elles sont éliminées dans les générations suivantes, mais elles subsistent parfois à long terme, notamment lorsqu'elles favorisent une meilleure adaptation au milieu naturel. Par exemple, des cafards résistants aux insecticides se reproduiront plus et transmettront la mutation qui confère cette résistance. L'équilibre entre mutations et sélection naturelle qui s'établit ainsi conduit, dans une population, à la présence d'un ou de plusieurs variants de chaque gène. Les différences entre individus, pour un même caractère, sont dues à l'existence de multiples variants du ou des gènes qui le déterminent (par exemple la couleur des yeux), ou bien à l'environnement, ou à leur effet combiné (cas de la taille d'un individu).

Les biologistes étudiant ces mécanismes élémentaires considéraient jusqu'à présent qu'ils ne dépendaient pas de

la complexité des organismes. Pourtant, dans l'autre camp, l'Autrichien Rupert Riedl proposait dès les années 1970 que le degré de complexité des organismes était responsable de la fixation de certains caractères, comme dans l'exemple de la notocorde. La «complexité d'un organisme» est la complexité des réseaux génétiques : certains gènes déterminent plusieurs caractères. Par exemple, quand on change le gène qui code une protéine, le développement ou le fonctionnement de toutes les parties de l'organisme où cette protéine intervient sont modifiés. R. Riedl supposait que plus un gène accumule de «responsabilités», moins la conservation d'une mutation est probable : la mutation ne subsiste que si les avantages qu'elle procure l'emportent sur les inconvénients. Si les inconvénients sont excessifs, le variant le «mieux adapté» (c'est-à-dire le plus favorable) du gène se fixe-t-il pour de nombreuses générations dans sa forme la mieux adaptée ?

Encore récemment, cette notion de «génotype le mieux adapté» (le génotype est l'ensemble de l'information génétique portée par les gènes) était généralement mal décrite par les modélisations mathématiques de l'évolution. Les

biologistes avaient construit leurs modèles, tenant compte de mutations accidentelles et de la sélection naturelle, afin de calculer la répartition d'équilibre, dans une population, des divers variants d'un même gène (on parle aussi de différents génotypes même quand on ne s'intéresse qu'à un gène précis). Avec ces modèles, ils obtenaient, au lieu d'un génotype dominant, tout un groupe de génotypes voisins rassemblés autour d'une moyenne, l'optimum théorique.

Toutefois ces modèles tenaient rarement compte du fait que de nombreux

gènes déterminent plusieurs caractères. Le physicien David Waxman et le biologiste Joel Peck, de l'Université du Sussex, proposent un modèle mathématique analogue, mais ils introduisent la possibilité pour un gène d'agir sur plusieurs caractères. Ils montrent qu'à partir d'un nombre limite de caractères déterminés par un gène, celui-ci est fixé (ce nombre limite dépend des données du calcul : il est égal à trois dans le cas présenté sur la figure, mais il diffère selon les cas). Ainsi un génotype particulier est fortement représenté dans la population, tandis que les

génotypes voisins disparaissent quasiment. C'est ce que l'on observe pour les gènes codant plus de deux caractères : seul le génotype « idéal » est fortement représenté. En revanche, pour les gènes commandant seulement un ou deux caractères, les génotypes sont regroupés autour de l'optimum théorique, mais ils ne sont pas confondus avec lui (voir la figure). Ce résultat pourrait expliquer pourquoi de nombreuses protéines varient très peu à l'intérieur d'une même population, et pourquoi certaines protéines n'ont pas changé depuis plus de cent millions d'années !

Vocalises de grenouille

A l'époque de la reproduction, les mâles et les femelles d'amphibiens anoures, c'est-à-dire principalement de grenouilles, de crapauds et de rainettes, se rassemblent autour d'une mare, d'un ruisseau, d'un torrent ou, pour les espèces dont le développement ne nécessite pas un milieu aquatique, sur une branche ou près d'un terrier. Le rendez-vous nuptial est fixé par les manifestations sonores des mâles : coassant régulièrement, le plus souvent la nuit, ils sont repérés par les femelles de la même espèce, qui les rejoignent sur leur site d'appel. Les herpétologues admettaient que seuls les mâles chantent et que les femelles se taisent. Toutefois, nous avons étudié une grenouille mélanésienne, *Platymantis vitiensis*, en captivité, et découvert une exception au mutisme généralement observé chez les femelles de batraciens.

Platymantis vitiensis est une petite grenouille arboricole des forêts humides de l'archipel des Fidji, dans l'océan Pacifique. Elle vit cachée dans la végétation qui borde les cours d'eau. Elle présente des comportements rares chez les amphibiens anoures : la fécondation est interne et la ponte a lieu après l'accouplement ; contrairement aux femelles d'autres espèces qui abandonnent leurs œufs, la femelle de *Platymantis vitiensis* les surveille et les protège ; les œufs se développent sans passer par un stade de têtard aquatique. À cette liste de caractères spécifiques, il faut désormais ajouter le chant de la femelle.

Nous avons d'abord enregistré l'appel sexuel du mâle, perçu par une oreille humaine comme un chant doux et faible, audible à deux ou trois mètres de distance, constitué d'une trentaine de notes brèves, sifflées, légèrement chuintées. Il est composé de trois parties qui diffèrent par leur rythme d'émission.

Une des femelles de l'élevage chanta quatre mois après la mort du mâle avec lequel elle partageait un terrarium. Les notes étaient aussi sif-

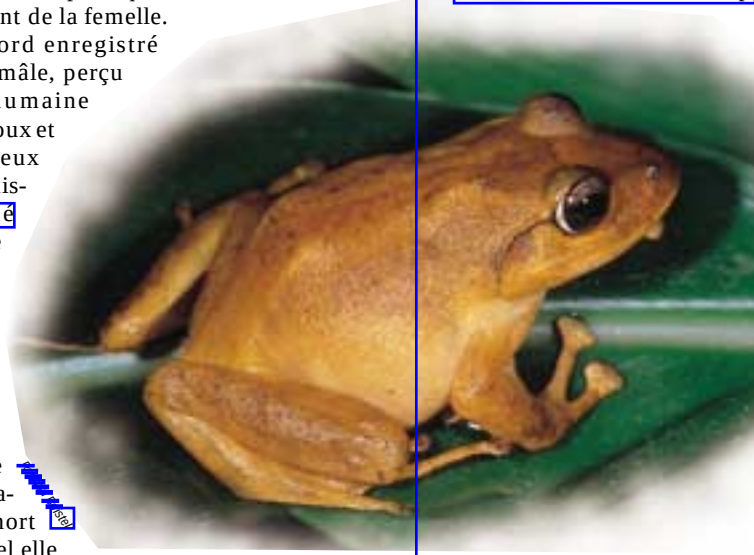
flées et brèves, mais, contrairement à celles du mâle, elles étaient émises par séries de 12 environ, lentement et régulièrement. Elles étaient composées de fréquences plus aiguës que celles du mâle. Nous avons ainsi identifié un dimorphisme des signaux sonores permettant, probablement, la reconnaissance des sexes.

Le chant de la femelle de *Platymantis vitiensis* est un appel sexuel : cette vocalisation, qui n'a pas les propriétés d'un cri agressif, ni celles d'un cri de détresse, n'est jamais produite dans les circonstances de la défense d'un territoire et ne nécessite pas la présence d'un mâle.

Par ailleurs, une équipe de biologistes de l'Université de New York a récemment découvert une activité sonore chez une femelle de *Xenopus laevis*, une grenouille qui se reproduit dans les mares turbides de l'Afrique australe. Cette espèce est remarquablement adaptée à la vie aquatique. Elle n'a pas de cordes vocales : les sons qu'elle émet sous l'eau résultent du choc de deux cartilages du larynx. L'équipe américaine a décrit un signal sonore produit par la femelle en réponse à l'appel sexuel du mâle. À l'écoute de cette émission sonore, le mâle s'agite et modifie son appel. Les deux individus engagent alors une sorte de duo qui leur permet de se retrouver dans l'eau trouble et de s'assurer que la grenouille rencontrée appartient bien à la même espèce et qu'elle est du sexe opposé.

Ainsi, le chant des femelles de batraciens, longtemps ignoré des herpétologues, semble nécessaire à la reproduction de ces deux grenouilles dont la morphologie, les comportements et l'habitat diffèrent notablement. Sans doute, beaucoup de grenouilles femelles chantent-elles ; il reste à identifier ces chants, à les analyser, à les décrire et à en déterminer le rôle.

Jérôme SUEUR
et Renaud BOISTEL
École pratique des hautes études, Paris.



Contrairement aux femelles d'autres espèces de grenouilles, la femelle de *Platymantis vitiensis* chante pour appeler le mâle.

Un tamis à photons

Transmission optique inattendue à travers un réseau troué

Peut-on faire passer des boules de pétanque à travers une passoire ? Le bon sens dit que non, mais, en électromagnétisme, l'expérience met parfois le bon sens en défaut : Thomas Ebbesen, de l'Université Louis-Pasteur, à Strasbourg, et ses collègues, ont montré qu'une lumière émise à travers une plaque métallique percée d'une multitude de trous est transmise perpendiculairement à la plaque, même lorsque la longueur d'onde de la lumière est supérieure à la taille des trous et à la distance entre les trous.

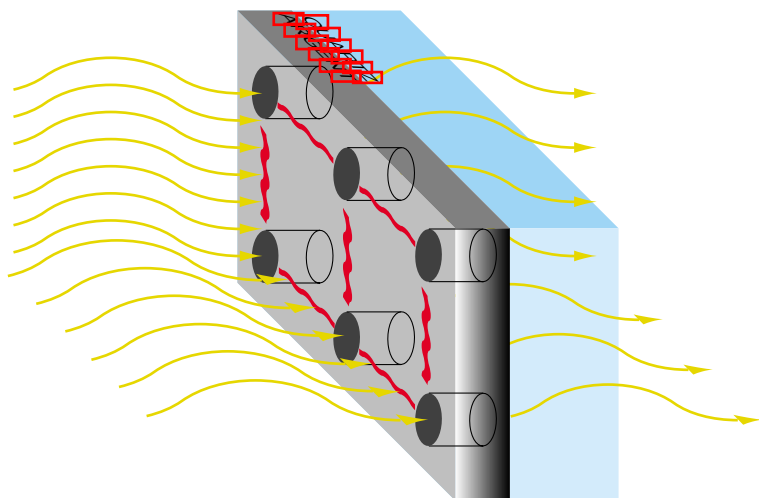
Pourtant les lois de la physique sont formelles : un trou microscopique ne laisse passer que très difficilement le rayonnement électromagnétique de longueur d'onde supérieure à son diamètre. Pourquoi, alors, ce comportement qui étonne les physiciens ? Parce que des « plasmons », des ondes électromagnétiques qui se propagent à la surface du métal, dues à des oscillations de ses électrons libres, sont créées par le réseau de trous. Ainsi, cette transmission ne se produit ni pour un trou isolé, ni pour un réseau de trous percés dans un isolant.

Les chercheurs ont utilisé un film d'argent de 0,2 micromètre d'épaisseur, déposé sur un substrat de quartz transparent. Dans ce film, ils ont percé des trous de 0,15 micromètre de diamètre,

disposés régulièrement en un réseau carré ou hexagonal. Une source de lumière de longueur d'onde ajustable émettait perpendiculairement à la plaque argentée. Derrière la plaque, un détecteur mesurait la lumière reçue dans la direction d'émission.

Lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente est égale à 1,37 micromètre, la transmission de la lumière est efficace : l'intensité lumineuse mesurée est plus de deux fois supérieure à ce que l'on mesurerait si les trous émettaient directement de la lumière à la même intensité que la lumière incidente. Or, selon les lois de Bethe régissant le phénomène, l'efficacité de la transmission d'une lumière de cette longueur d'onde par un trou unique de 0,15 micromètre est inférieure à un millième. Ces résultats suggèrent que le réseau est un élément actif de la transmission, et non uniquement un objet géométrique sur le chemin du rayon incident.

Pour comprendre l'origine de ce phénomène, les chercheurs ont fait varier de nombreux paramètres, comme le diamètre des trous, la périodicité du réseau, l'épaisseur et le type de métal. La transmission se produit lorsque l'inverse de la longueur d'onde des plasmons excités, est égale à l'inverse de la longueur d'onde de la lumière incidente plus ou moins l'inverse de la distance entre les trous. Ainsi, la périodicité du réseau détermine la longueur d'onde transmise. De plus, la transmission décroît linéairement avec la surface des trous et avec leur profondeur, alors que la théorie prédit une quantité de lumière transmise inversement proportionnelle au carré de la surface des trous.



Sur une mince plaque d'argent posée sur un substrat de quartz, on perce des trous régulièrement espacés. La longueur d'onde de la lumière incidente est supérieure au diamètre des trous et à leur écartement, ce qui, habituellement, prévient la transmission. Pour certaines longueurs d'ondes de la lumière incidente, des ondes de surface (des plasmons) sont excitées. Ces plasmons (en rouge) « aident » les photons incidents à traverser les trous. L'efficacité de la transmission est ici 2 000 fois supérieure à ce qu'elle serait avec un trou unique.

Cette situation ressemble à celle de la réflexion par des plaques métalliques, mais c'est la première observation d'une transmission par de telles plaques. Lorsque les photons arrivent sur la surface d'argent avec une longueur d'onde adéquate, ils excitent des plasmons. Ces

plasmons à l'interface air-argent sont alors transformés en plasmons à l'interface argent-quartz, ce qui «aide» les photons à passer par les trous.

Alors, les utilisateurs de fours à micro-ondes doivent-ils s'inquiéter? Non, car cette analyse ne s'applique pas aux

grilles de fours : la périodicité et le diamètre des trous de la grille sont si petits comparés à la longueur d'onde du rayonnement micro-onde que ce dernier ne passe pas. Les boules de pétanque traversent la passoire, mais pas les ballons de basket!

Peut-on prévoir les krachs?

Des physiciens proposent une théorie (controversée) des krachs boursiers.

Au cours d'un krach boursier, les prix sur un marché s'écroulent en quelques jours de plusieurs pour cent (jusqu'à 30 pour cent pour les plus gros krachs du siècle, en octobre 1929 et en octobre 1987). Certains physiciens comparent un krach à ce que l'on nomme un point critique en physique : par exemple, un matériau soumis à une force d'élongation croissante se rompt au point critique. En ce point, la moindre action extérieure provoque une réaction considérable du système. D'où l'analogie avec le marché : par mimétisme, les agents décident simultanément de vendre leurs actions, car un incident a déclenché une panique générale.

En outre, avant les krachs, les prix ont des variations surprenantes. Didier Sornette, de l'Université de Nice, et Anders Johansen, de l'Institut Niels Bohr à Copenhague, ont cherché une fonction qui reproduit, sur plusieurs années, les fluctuations apparemment aléatoires des prix (en pointillés sur la figure du krach de 1929). Ils ont obtenu une fonction (en rouge sur la figure), qui oscille régulièrement autour d'une courbe croissante du temps. Ils soutiennent que, dans le cas des krachs, mais aussi dans certains phénomènes physiques (avalanches, tremblements de terre), ce type d'oscillations serait précurseur d'un point critique. La forme connue des oscillations permettrait de prévoir les apparitions de futurs krachs.

Cette idée est controversée : Laurent Laloux, Marc Potters et leurs col-

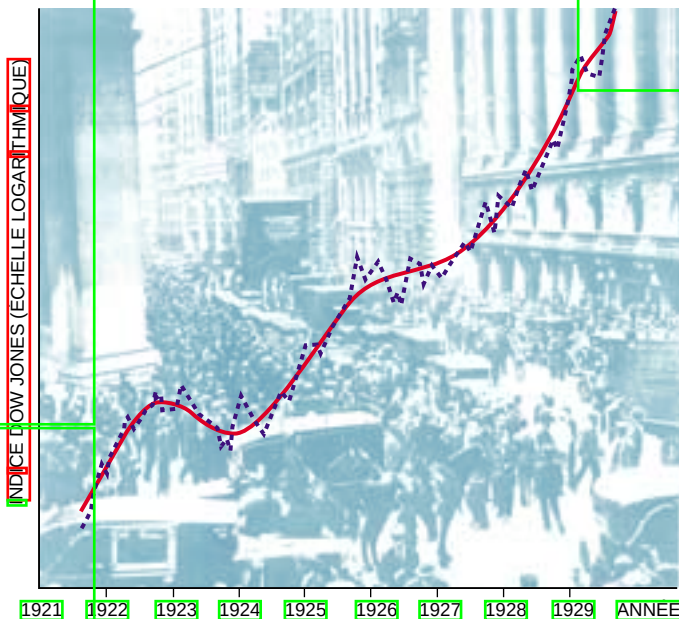
lègues de l'entreprise *Science et Finance* affirment qu'aucun modèle théorique convaincant n'indique qu'un krach serait un point critique ni ne justifie la présence de ces oscillations. D'autre part, la comparaison des krachs à des points critique est testée sur trop peu de données, car les krachs sont rares.

Enfin, des prédictions sur plusieurs années sont contestables : un modèle théorique à cette échelle devrait prendre en compte des facteurs extérieurs (événements ou décisions politiques, catastrophes naturelles, etc.) qui boule-

versent les marchés. Ces événements introduisent une forme de hasard que l'on ne sait pas modéliser.

Le débat est le suivant : sous quelles hypothèses peut-on prévoir les variations boursières? La présence du hasard empêche de prédire de façon certaine la hausse ou la baisse des prix au bout d'une journée ou d'une semaine. Cependant, on peut savoir quelles variations sont très probables, et lesquelles sont peu probables, car la répartition de ces variations est donnée par une loi de distribution connue en théorie financière. En outre, si on se limite à des intervalles de temps compris entre une heure et quelques semaines, cette distribution est universelle : elle est commune à des marchés très différents dans le détail, et indépendante des influences extérieures. C'est pourquoi on utilise, dans ces limites, les méthodes de la physique statistique : on peut déterminer les propriétés collectives d'un grand nombre de particules en interaction en fonction des conditions extérieures (température, pression, etc.) sans considérer le comportement individuel des particules.

Par exemple, pour les intervalles courts, Ramaont et Jean-Philippe Bouchaud, du Centre d'études nucléaires de Saclay et membres de *Science et Finance*, ont construit un modèle inspiré de l'étude des transitions de phase, qui met en évidence deux régimes de fonctionnement du marché : dans le premier, les prix varient peu autour de leur position d'équilibre, ce qui correspond au fonctionnement «normal». Dans le second, les prix se trouvent brusquement un peu trop loin de l'équilibre, puis chutent vertigineusement, comme lors d'un krach, en raison d'une panique collective.



Le rapprochement des fluctuations de l'indice Dow Jones (moyenne des prix de 30 actions américaines représentatives) de juin 1921 à septembre 1929 (en bleu) et de la fonction oscillatoire (en rouge) proposée par D. Sornette et A. Johansen suggère que le krach d'octobre 1929 est analogue à des phénomènes physiques tels qu'avalanches ou tremblements de terre.

versent les marchés. Ces événements introduisent une forme de hasard que l'on ne sait pas modéliser.

Le débat est le suivant : sous quelles hypothèses peut-on prévoir les variations boursières? La présence du hasard empêche de prédire de façon certaine la hausse ou la baisse des prix au bout d'une journée ou d'une semaine. Cependant, on peut savoir quelles variations sont très probables, et lesquelles

L'allergie

à la croisée des sciences

L'évolution
de la recherche
dans l'allergie

Les formes
de l'Évolution

L'universalité
des formes fractales

L'organisation
des formes

À l'occasion
du dixième anniversaire
du premier antiallergique mondial*,
Schering-Plough offre ce dossier
aux lecteurs de *Pour la Science*.



Schering-Plough

* données IMS, sept. 97 (ventes)

L'évolution de la recherche dans l'allergie

Schering-Plough fête les dix ans de commercialisation de son antihistaminique non sédatif, premier antiallergique mondial en termes de ventes (données IMS, septembre 1997).

La civilisation s'est épanouie dans les villes où les interactions entre les hommes facilitent la propagation des connaissances et la synergie des services mutuels. Cette densification de la population a sa Némésis : la contagion des infections, la pollution de l'air, les contacts allergéniques sont la contrepartie de notre vie citadine.

Cette rançon du progrès, darwinienne dans son essence, lamarckienne dans sa transmission humaine, est une caractéristique de l'évolution des organismes vivants. Schering-Plough célèbre cette année le dixième anniversaire de la mise sur le marché de son antihistaminique non sédatif, devenu depuis premier antiallergique mondial en termes de ventes (données IMS, septembre 1997). Ses chercheurs continuent de tirer profit des avancées scientifiques pour mettre au point les futurs médicaments.

Les réactions allergiques, où les éléments du système de défense immunitaire réagissent contre des substances étrangères normalement inoffensives, dégradent la qualité de vie. Près de 15 millions de Français souffrent d'allergies, et 25 pour cent des enfants de moins de cinq ans sont amenés en consultation pour des maladies respiratoires associées à des sifflements. Les dépenses de santé liées à ces affections représentent un pour cent des dépenses totales.

Les affections les plus communes sont les rhinites allergiques (rhume des foins) et l'asthme. Les personnes atteintes de ces troubles respirent difficilement et souffrent de troubles divers quand elles

ont inhalé certains pollens, des résidus d'acariens ou des substances chimiques normalement inoffensives.

Toutes les allergies se traduisent par la sécrétion d'une grande quantité d'anticorps, les immunoglobines E (IgE). Les scientifiques supposent que ces réactions allergiques sont apparues dans l'évolution pour que les individus puissent réagir efficacement contre les parasites. Dans les pays développés, les individus ne sont plus exposés aux parasites, et le système immunitaire réagit outrageusement contre diverses substances telles que les pollens.

Le phénomène allergique comporte trois stades. Dans le premier, la sensibilisation, un allergène pénètre pour la première fois à l'intérieur du corps. Il y rencontre des cellules de voirie, nommées macrophages, qui l'absorbent, le coupent et en arborent les fragments à leur surface. Puis des globules blancs, les lymphocytes T auxiliaires reconnaissent certains fragments exposés sur les macrophages et s'y fixent. Ils sécrètent alors diverses interleukines qui incitent les lymphocytes B du voisinage à se transformer en plasmocytes sécréteurs d'anticorps. Ces plasmocytes sécrètent des immunoglobulines E, molécules en forme de Y dont chaque bras peut se lier à une molécule d'allergène (figure a).

On distingue aujourd'hui deux types de lymphocytes, les lymphocytes Th1 et Th2 ; cette deuxième classe est prédominante et sécrète certaines interleukines, mais pas d'interféron gamma, au contraire de la classe des lympho-

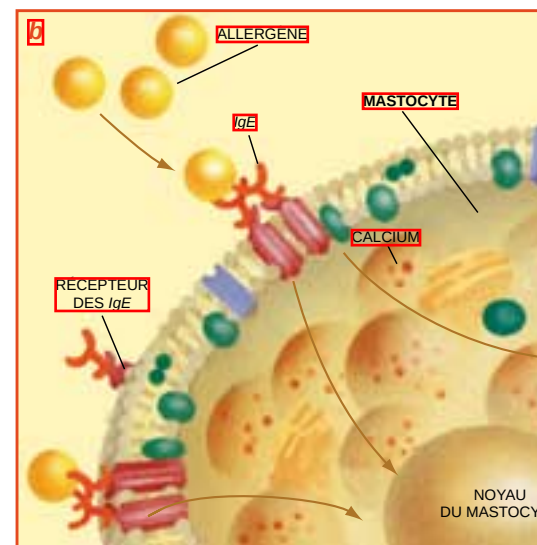
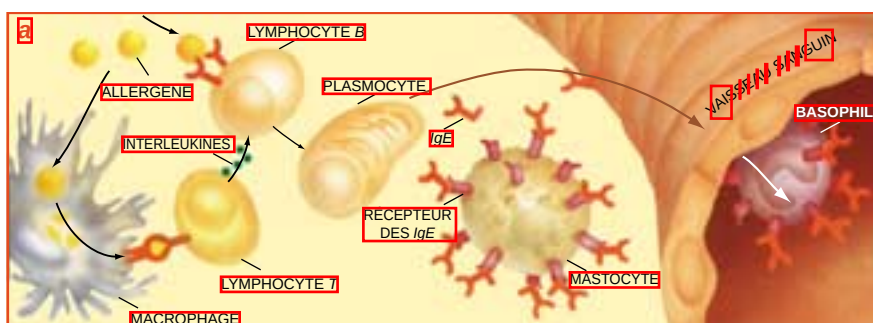
cytes Th1. L'interleukine 4 stimule la production d'IgE par les lymphocytes B, tandis que l'interféron gamma retarde cette synthèse. L'interleukine 10 inhibe les lymphocytes Th1 dont le rôle est déterminant dans la lutte contre les infections. C'est la proportion de lymphocytes Th1 et Th2 qui détermine si les lymphocytes B produisent des IgE ou d'autres types d'anticorps.

Lors d'une infection virale, les lymphocytes Th2 sont activés et sécrètent des interleukines 2, qui induisent la prolifération des plasmocytes producteurs d'immunoglobines G. Une des voies de recherche actuelles chez Schering-Plough est de rechercher des principes actifs capables de bloquer les récepteurs des différentes interleukines.

Les anticorps s'attachent par la base du Y à des récepteurs spécifiques des mastocytes et des basophiles (figure b). La production des IgE étant amorcée, elle persiste pendant des mois : les anticorps restent liés à leur cible et sensibilisent les mastocytes.

Une nouvelle pénétration de l'allergène dans l'organisme déclenche les réactions allergiques. L'allergène se lie à deux IgE situées sur les mastocytes et établit un pont qui active la sécrétion de ces derniers. Les mastocytes libèrent des composés puissants, responsables des symptômes de l'allergie. Le plus

Sensibilisation de l'individu à l'allergène (a), activation des mastocytes (b) et les effets retardés de l'activation du système immunitaire (c).



redoutable de ces médiateurs libérés est l'histamine : cette molécule stimule la production de mucus par l'épithélium et contribue ainsi à la congestion des voies respiratoires. Un antihistaminique empêche la fixation de l'histamine sur les parois cellulaires en bloquant les sites récepteurs de celle-ci.

Les premiers antihistaminiques diminuaient aussi la vigilance : les études conduites par Schering-Plough ont permis la mise au point, il y a dix ans, d'un antihistaminique aussi efficace que les premières générations, mais non sédatif. Une étude a montré que, pour les utilisateurs et les prescripteurs, cette absence de somnolence était la qualité la plus importante. Les effets d'un principe actif ne s'évaluent avec certitude qu'avec le temps : depuis sa création les multiples recherches visant à quantifier les effets de cet antihistaminique ont confirmé son innocuité. La leçon de ces études est qu'il faut choisir le principe actif qui conduit au meilleur équilibre entre efficacité et effets indésirables.

La production d'IgE est dérégulée par divers virus responsables d'infections respiratoires, tels que les rhinovirus, dérégulation qui se traduit par une augmentation néfaste de la concentration des IgE à la surface de la muqueuse. Il s'ensuit une libération accrue de médiateurs pro-inflammatoires qui activent les molécules d'adhésion de l'épithélium, en particulier ICAM-1. Des recherches en cours chez Schering-Plough s'attachent à évaluer leur intérêt dans la prévention de l'hyperactivité bronchique liée à l'inflammation allergique des voies respiratoires et la réduction

des infections récidivantes des voies aériennes supérieures (en conformité avec l'hypothèse actuelle selon laquelle ces molécules sont aussi des récepteurs des rhinovirus).

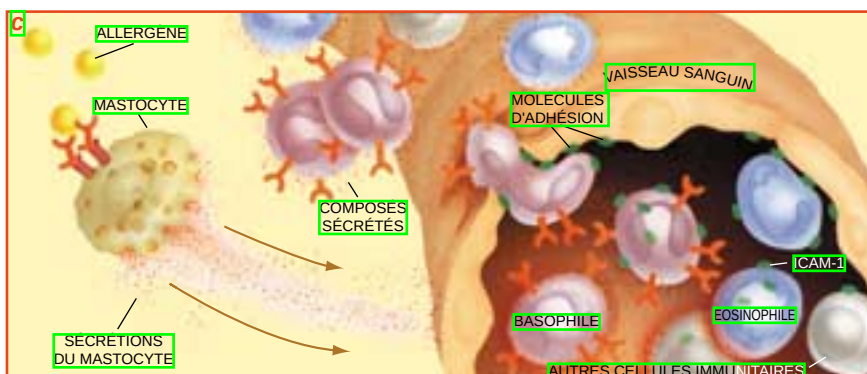
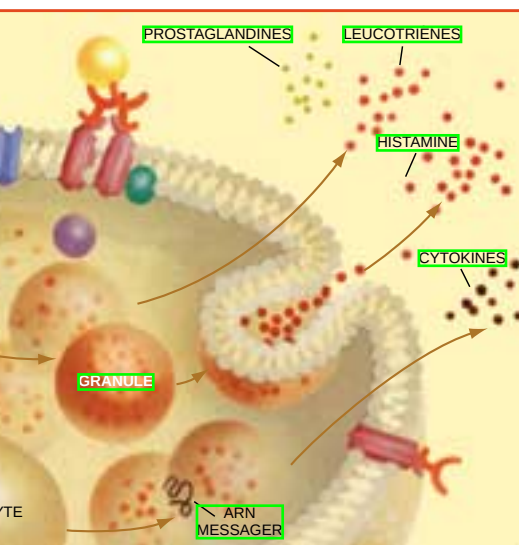
C'est le cas de l'étude baptisée *Pre-ventia* mise en place par Schering-Plough qui inclut 300 patients âgés de 12 à 30 mois. Les premiers résultats seront publiés en 1999. Les infections des voies aériennes supérieures (rhinopharyngites, otites) ne sont pas les seules pathologies associées au terrain allergique. Des études épidémiologiques, de plus en plus nombreuses, montrent que la rhinite allergique est très souvent présente chez des personnes atteintes d'asthme, ou bien de sinusite chronique, ou encore d'apnée du sommeil. Ces syndromes constituent autant de voies de recherche pour Schering-Plough.

Les chercheurs du Centre de recherches de Kenilworth étudient le récepteur des interleukines 5 sur les cellules éosinophiles pour trouver des produits antagonistes ou faire synthétiser à l'organisme des anticorps anti-interleukine 5 bloquant ces récepteurs.

Un second groupe de médiateurs actuellement étudiés sont des lipides, libérés dans l'organisme par les mastocytes après activation par l'allergène (figure c). Comme l'histamine, ces composés provoquent la contraction des bronches et la dilatation des vaisseaux sanguins, et ce de façon durable. Les mastocytes stimulés sécrètent aussi des enzymes variées, certaines toxiques, et des cytokines, petites protéines qui orchestrent les activités d'autres cellules immunitaires. L'activation rapide de ces cellules est responsable des réactions anaphylactiques, telles des crises d'éternuements et les sécrétions de larmes dont sont victimes les personnes allergiques au poil de chat, par exemple.

D'autres médiateurs, la substance P et les neurokinines, sont libérés par les cellules nerveuses des voies aériennes et par les macrophages alvéolaires : ils sont responsables des spasmes bronchiques, de la toux, de l'œdème bronchique, de la production de mucus et probablement d'inflammation. Le programme neurokinines de Schering-Plough vise, là encore, à bloquer les récepteurs de ces substances par des molécules antagonistes. L'existence d'une prédisposition génétique dans l'asthme étant établie, les chercheurs cherchent à présent à établir quelles modifications du ou des gènes induisent une sensibilité accrue aux allergènes. Pour cela, on sélectionne un groupe de patients asthmatiques et l'on identifie les régions spécifiques des chromosomes communes à tous ces individus. On cartographie ensuite ces régions pour dépister les gènes responsables. À long terme, il serait envisageable d'identifier les défauts des protéines produits par ces gènes afin d'administrer les formes correctes dans l'organisme ou, par des techniques d'ADN recombinant, d'insérer des gènes appropriés. Ces recherches ouvrent des perspectives dans différentes affections.

Que de chemin parcouru depuis les premiers traitements de l'allergie par des potions à base d'herbes – *Ephedra* ou *Stramonium* ! En collaboration avec les chercheurs universitaires, les pharmacologues de Schering-Plough poursuivent l'étude des mécanismes de transduction des signaux moléculaires et l'identification des sécrétions qui contribuent le plus aux pénibles symptômes de la réaction allergique ; cela afin de perfectionner les techniques de blocage des médiateurs immunitaires par voie chimique, biologique et, dans l'avenir, génétique.



Les formes du vivant

Claude Combes

Nous parrainerons notre évocation des formes de la nature par un peintre, Paul Gauguin, un naturaliste, Charles Darwin, et un écrivain, Lewis Carroll. Gauguin a inscrit sur un de ses tableaux «D'où venons-nous, qui sommes-nous, où allons-nous», tableau peint à l'époque où Darwin publiait son œuvre majeure : *L'origine des espèces*. Lewis Carroll, en racontant l'aventure extraordinaire d'*Alice au pays des merveilles*, a imaginé une scène qui illustre aujourd'hui le processus de complexification des organismes vivants.

La Reine rouge est une pièce de jeu d'échecs. Alice tient la Reine rouge par la main et elles courent toutes les deux. Soudain Alice s'adresse à la Reine rouge et lui dit : «Mais, Reine rouge, nous sommes en train de courir, nous courons vite et le paysage autour de nous ne change pas.» La Reine rouge a cette réponse devenue célèbre : «Nous courons pour rester à la même place.»

En 1973, un biologiste américain, L. Van Valen, a publié un article intitulé *A new Evolutionary Law* (Une nouvelle loi de l'évolution). L. Van Valen s'interroge : en trois milliards et demi d'années, comment sommes-nous passés des premières formes de la vie, des molécules d'acides nucléiques, à la faune actuelle?

Durant cette longue période, des mutations aléatoires procurant un avantage ont permis que soient sélectionnées de nouvelles adaptations. Ce mécanisme de l'évolution, énoncé par Darwin, a été lar-

gement confirmé dans toutes ses grandes lignes par les découvertes récentes de la biologie moléculaire. Bel et bon, accepte Van Valen, mais comment expliquer la complexification? La qualité de l'adaptation vis-à-vis de l'environnement, s'étonne Van Valen, n'a pas augmenté, l'amibe est aussi bien adaptée à son environnement que les organismes plus complexes.

Imaginons, indique Van Valen, que, parmi plusieurs espèces qui cohabitent, l'une d'elles, par un des hasards qui sont les moteurs de l'Évolution, et pour améliorer son adaptation au milieu, modifie un de ses caractères. Elle change en cela le paysage adaptatif des autres espèces et oblige celles-ci à s'adapter. Et c'est là qu'une sorte de mouvement perpétuel se met en marche, semblable en tous points à la course d'Alice et de la Reine rouge : les adaptations engendrent de nouveaux traits, de nouveaux caractères, en engendrant de la complexité, mais sans gagner de qualité d'adaptation.

A Madagascar vivent des petits papillons et des orchidées : les petits papillons transportent le pollen d'une orchidée à l'autre, et ce transport d'une fleur à l'autre est indispensable à la reproduction de l'orchidée. L'orchidée récompense le papillon en mettant à sa disposition du nectar au fond du nectaire, un tube mince et relativement profond. Le seul «objectif» de l'orchidée est de se reproduire, et le seul «but» du papillon est de se nourrir. Imaginons qu'un papillon ait une trompe un peu plus longue que sa taille habituelle :



1. Charles Darwin (1809-1882)

il va boire le nectar et, comme sa tête n'appuie plus sur les pollinies de l'orchidée, il repartira sans pollen. À l'inverse, si le nectaire de l'orchidée s'allonge, la tête du papillon va buter contre les pollinies d'orchidée et il repartira avec du pollen. Mais comme sa trompe est trop courte, il ne peut la tremper au fond du nectaire et ne peut se nourrir. L'orchidée est gagnante; toutefois, faute de nourriture, le papillon se reproduira moins, et l'orchidée sera perdante.

A chaque génération, il y a sélection d'orchidées au nectaire de plus en plus profond et, parallèlement, de papillons à la trompe de plus en plus longue, puisque ceux qui n'ont pas la trompe assez longue ne se nourrissent pas. D'où la parabole de la Reine rouge, ou l'image plus actuelle d'une course aux armements. Les fleurs d'orchidées de Madagascar ont des nectaires de 28 centimètres de long, les petits papillons, des trompes de 25 centimètres. Ce mouvement auto-entretenu pendant trois milliards et demi d'années a fait que nous sommes plus complexes, et pas mieux adaptés.



2. D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous? Tableau de Gauguin.

Du point de vue de l'évolutionniste, le problème de l'allergie c'est simplement qu'à force de lutter contre le non-soi, parce que le non-soi est, potentiellement, un ennemi, le système immunitaire finit parfois par tirer sur tout ce qui bouge. Il tire sur un grain de pollen, il tire sur un acarien, parce que potentiellement c'est du non-soi. Il est tellement perfectionné que, de temps en temps, comme n'importe quelle nation qui se défend, il souhaite détruire une cible inutile et s'en trouve pénalisé.

Qu'en est-il maintenant de l'homme dans cette longue histoire? Nous distinguerons trois hommes au sens large. L'homme darwinien, puisqu'il est issu d'une évolution darwinienne, l'homme lamarckien qui nous permettra d'évoquer le grand évolutionniste qui avait précédé Darwin, et puis l'homme «humain».

L'homme darwinien est un fruit de l'arbre de l'évolution. Nous sommes le produit d'une évolution darwinienne longue, encore une fois, de trois milliards et demi d'années. La variabilité génétique engendrée par les erreurs de réplication de l'ADN a fait de nous ce que nous sommes, une espèce parmi les 1 500 000 espèces décrites, et parmi les quelque dix millions d'espèces qui restent probablement à décrire.

Nous avons l'intelligence, nous avons la conscience, mais nous sommes un fruit indétachable de cet arbre : toutes nos cellules, toute la mise en place de notre développement, tout notre code génétique fonctionnent exactement comme celui des autres animaux et organismes, même les plantes. Le temps n'est plus d'ergoter, comme les contemporains de Darwin, pour savoir si nous sommes les cousins du singe ou pas. Le problème n'est pas le singe. Nous sommes les cousins de tous les êtres vivants, chimpanzés, souris, bactéries, virus, et nous descendons de la première molécule d'acide nucléique apparue sur Terre et capable d'autoréplication.

Les premiers hominidés, issus de cette évolution darwinienne, sont apparus il y a environ trois millions et demi d'années, l'homme habile, il y a deux millions d'années, l'homme droit, un million, et l'homme savant, c'est-à-dire nous, approximativement 200 000 ans.

Cette évolution darwinienne continue-t-elle aujourd'hui? Cela est très difficile à dire, car même la totalité des temps historiques est très peu de chose au regard de l'Évolution. Mais rien n'indique que le succès reproductif des hommes de notre temps soit en relation avec un caractère adaptatif particulier.

Il y a 2 400 ans, le Grec Ératosthène comprend que la Terre est ronde et donne, 400 ans avant J.-C., la circonférence de la Terre avec une erreur de 40 kilomètres! Il n'est pas très sérieux de prétendre que notre cerveau a évolué depuis Ératosthène.



La Reine rouge entraînant Alice dans un sur place effréné.

Toutefois, nos connaissances ont augmenté dans des proportions considérables. Pensez aux médicaments : les antihistaminiques n'existaient pas à l'époque d'Ératosthène et, pour ce qui est de la circonférence de la Terre, les satellites la mesurent, bien sûr, avec plus de décimales exactes. Pourquoi? Parce qu'à l'évolution darwinienne de l'homme s'est superposée une autre forme d'évolution, l'évolution lamarckienne.

Lamarck pensait que les caractères acquis pouvaient se transmettre d'une génération à l'autre, et que les fils de forgerons auraient des bras plus musclés. On sait aujourd'hui que cela est faux, parce qu'un caractère acquis pendant la vie d'un individu ne passe pas dans l'ADN, qui possède le plan de notre organisme. Les caractères acquis ne sont pas transmis, sauf pour ce qui est de notre acquis culturel, lequel se transmet selon un mode lamarckien. Imaginez par exemple qu'un oiseau abandonne un nid qu'il a fabriqué. Ce nid pourrait être utilisé à la génération suivante par un autre oiseau, sans que l'ADN n'ait été, à aucun moment, concerné. La transmission des biens matériels (les héritages...), des biens intellectuels (les

connaissances...), des biens spirituels (les croyances...) se fait chez les hommes suivant un mode lamarckien. Ce type de transmission des caractères possède un caractère redoutable : elle va très vite et peut aboutir à une distribution très inégale des richesses. Elle rend plus incertaine encore la troisième question de Paul Gauguin.

Le troisième homme, c'est l'homme humain avec ses notions morales. Pour l'ADN, le bien et le mal ne sont déterminés que par l'efficacité reproductrice. Depuis trois milliards et demi d'années, il n'y a eu que de l'égoïsme, une lutte sans merci entre les molécules d'ADN, agissant par l'intermédiaire des organismes qu'elles fabriquaient. Pour l'Évolution, les individus ne comptent pas. L'homme souffre de cette constatation, parce qu'il est conscient et s'aperçoit qu'il vit dans un monde où il ne compte pas. Le mal pour l'homme, c'est la compétition à outrance, le fait que le loup tue l'agneau, que la bactérie tue l'homme. La compétition a existé entre les hommes et joué un rôle dans l'Évolution : personne ne saurait l'affirmer, mais peut-être est-ce la compétition qui a permis aux hommes de Cro-Magnon de supplanter les hommes de Néanderthal.

Mais l'homme moderne rêve d'un paradis où le lion ne mange plus la gazelle, où le loup ne mange plus l'agneau. La fantasmagorie de l'homme humain, c'est de créer de nouvelles lois pour le monde, des lois humaines et, par conséquent, ... contre nature.

Imaginons que je vois le portefeuille de mon voisin qui dépasse de sa poche : si je ne le prends pas, au regard de l'Évolution je suis un imbécile. Si je lutte avec succès contre les lois naturelles, c'est par peur du gendarme, par mon éducation qui valorise le sentiment que je ne dois pas voler ou parce que des sentiments religieux me font espérer que Dieu me le rendra au centuple.

Adam et Eve ont été chassés du paradis, parce qu'ils ont goûté le fruit de l'arbre de la connaissance du bien et du mal. Cette vision de la morale me semble dans le droit fil de la pensée évolutionniste.

Claude COMBES est professeur de biologie à l'Université de Perpignan.



Schering-Plough

L'universalité des formes fractales

Bernard Sapoval

Le physiologiste élucide le fonctionnement des organes en examinant leurs dysfonctionnements ; en biologie moléculaire, c'est en comparant les gènes des personnes atteintes de maladie avec ceux des individus sains que l'on identifie les gènes mutés responsables des affections. La genèse des formes fractales est née aussi d'une considération pathologique : à la fin du XIX^e siècle, le mathématicien allemand Weierstrass a montré qu'une fonction pouvait être continue, c'est-à-dire que l'on pouvait la tracer sans lever le crayon, et n'avoir de tangente en aucun de ses points : la courbe représentant cette fonction avait des «pointes» partout.

Cet étrange objet fut rejeté par une partie de la communauté mathématique ; le mathématicien Hermite s'en «détournait avec horreur». Il était difficile de tracer la courbe représentant la fonction de Weierstrass, et la compréhension de la nature de ces créations mathématiques s'améliora avec une représentation graphique plus intuitive, comme la courbe de von Koch, au début du XX^e siècle.

L'extraordinaire est que Benoît Mandelbrot a découvert que nombre de phénomènes naturels étaient structurés comme ces objets pathologiques que l'on dénomme fractales.

On pense parfois que la géométrie, depuis le temps qu'on l'exploite, a dit son dernier mot. C'est oublier que cette discipline, si l'on s'en tient aux formes traditionnelles de la géométrie

nombre de formes naturelles et, dans un second temps, pour en expliquer le fonctionnement. On baptise universels des comportements et des équations qui apparaissent dans des contextes extrêmement différents. Ainsi les objets de la géométrie grecque étaient universels : la sphère est universelle parce que le Soleil est sphérique, une bulle de savon et une orange aussi. Nous allons voir sur quelques exemples que les fractales apparaissent dans une grande variété de phénomènes.

Une des caractéristiques de ces objets fractals est leur autosimilarité : une partie de l'objet est semblable au tout à plus petite échelle. Ainsi une partie de la courbe de von Koch n'est pas différente d'une partie plus grande, vue à une échelle

sives jusqu'à l'infini, mais seulement sur quelques ordres de grandeur. C'est cette autosimilarité limitée que l'on retrouve dans la nature : regardez une zone des poumons et les ramifications des artères et des artéioles, ou les détails d'un chou-fleur, vous verrez que la structure de détail «ressemble» à l'aspect général.

Prenons un exemple historique, le découpage de la côte anglaise ou de la côte bretonne, étudiée par le mathématicien Richardson. Une des premières questions quantitatives que l'on se pose est : quelle est la longueur de la côte de Bretagne? À cette question apparemment innocente, il n'y a pas de réponse.

En effet, comment pourrait-on mesurer la longueur de la côte entre Brest et Concarneau? On pourrait prendre une carte au 200 000^e, sur laquelle un centimètre représente deux kilomètres et, avec une baguette de cinq centimètres, représentant dix kilomètres, estimer que la longueur de la côte est de 14 baguettes, soit 140 kilomètres.

Avec une photo de la même côte, mais prise au 20 000^e, où un centimètre représente 200 mètres, nous répéterions la même opération avec une baguette de cinq centimètres,

1. Le chou-fleur a une structure fractale. Chaque élément radial est grossi d'un facteur 2 par rapport à l'élément précédent. Les parties sont semblables au tout.

«grecque», est incapable de décrire ou même de penser les objets courants de notre monde, une montagne par exemple. Le miracle, ou plutôt la divine surprise, est que les formes fractales sont un outil privilégié pour reproduire et modéliser

réduite. Il est impossible de connaître l'échelle de l'observation à la vue de l'image. Cette autosimilarité participe de la construction d'autres objets mathématiques comme l'éponge de Weibull.

Bien sûr, lors de la construction d'une fractale, nous ne pouvons, graphiquement, poursuivre les itérations succes-

représentant maintenant un kilomètre. Nous mesurerions alors une nouvelle longueur, plus grande que 140 kilomètres, car nous prendrions en compte plus de détails. Enfin, sur le terrain, avec une petite baguette qui épouserait mieux les irrégularités, la longueur

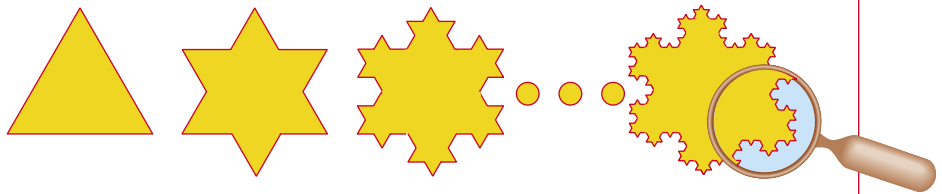
de la côte serait encore supérieure : ainsi, la longueur mesurée dépend de l'échelle. Au contraire, sur une courbe régulière formée de segments de droites ou de portions de courbes en nombre et en taille finis, la longueur mesurée tend vers une limite finie. Aussi l'augmentation de la longueur de la côte se poursuit-elle jusqu'à une certaine limite, où les objets physiques que nous observons finissent par devenir réguliers...

La courbe de von Koch a, quant à elle, une longueur infinie. En effet, à chaque étape de sa construction (voir l'encadré ci-contre), la longueur est multipliée par $4/3$ et, comme ce nombre est supérieur à 1, sa longueur tend vers l'infini. Cette courbe encadre cependant une aire finie : elle pourrait représenter une côte de Bretagne hypothétique, avec des golfes au fond desquels s'ouvriraient des baies, découpées elles-mêmes par des baies plus petites, et cela indéfiniment. Là apparaît l'analogie : l'objet mathématique obtenu par cette suite infinie d'opérations de découpage possède une parenté avec la côte de Bretagne.

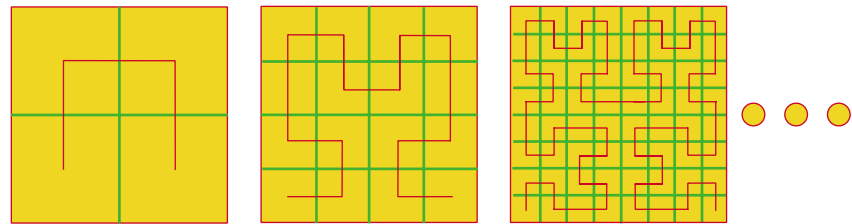
Il subsiste toutefois une nuance essentielle : la courbe de von Koch a été construite en répétant toujours la même opération, déterminée une fois pour toutes. Cette courbe est une fractale déterministe, le hasard n'intervenant nulle part dans l'opération. Or, sur la côte de Bretagne, le golfe du Morbihan n'est pas identique à la baie des Trépassés dilatée, mais la similarité est vraie statistiquement : tel golfe ressemble à telle baie agrandie, qui ressemble à telle anse, aussi agrandie... De même, les branches de chou-fleur ne sont pas exactement identiques, mais, par agrandissement, elles ressemblent au chou-fleur entier sans le reproduire exactement. La côte de Bretagne et le chou-fleur sont des fractales aléatoires.

Avant qu'ils ne soient baptisés fractals les mathématiciens avaient senti l'intérêt de ces objets et avaient étudié une de leurs caractéristiques : leur dimension. Dans la géométrie classique, une ligne est un objet à une dimension, une surface, un objet à deux dimensions, un volume, un objet à trois dimensions. Nous sommes ainsi habitués à des objets dont les dimensions sont des nombres entiers : 1, 2 ou 3. Un géomètre italien, Giuseppe Peano, avait construit, par étapes successives, une courbe de type fractal qui passait par tous les points d'un carré, c'est-à-

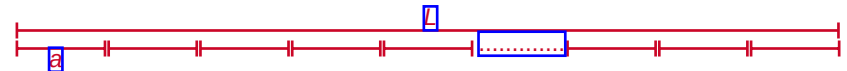
LES DIMENSIONS NON ENTIÈRES



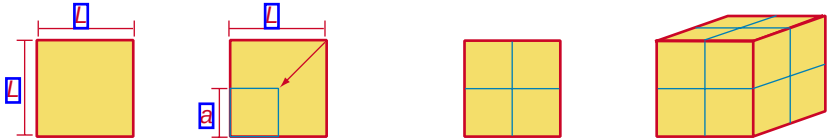
A chaque étape de la courbe de von Koch en flocon de neige, les segments du contour sont divisés en trois parties égales, et deux côtés d'un triangle équilatéral sont construits sur la partie centrale. Une partie grossie à la même structure qu'une partie du tout. La longueur de la courbe est infinie, l'aire finie.



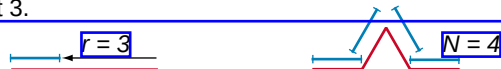
La courbe de Hilbert, après un nombre infini d'étapes, remplit tout le plan : on subodore qu'elle est de dimension 2, ce qui est exact selon la définition généralisée de la dimension, que nous allons examiner.



La longueur L d'un segment mesuré par une règle de longueur a est égale à $N.a$ où N est le nombre de règles mises bout à bout pour recouvrir le segment.

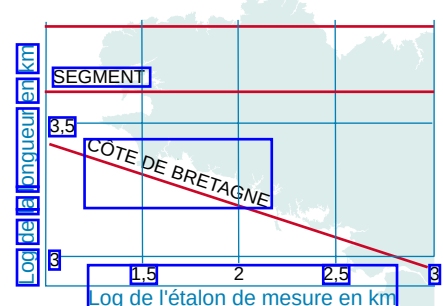


L'aire A d'un carré de côté L est égale à $N.a^2$, où r est le taux de réduction faisant passer du carré de côté L au carré de côté a ($r = L/a$). N est le nombre de petits carrés, de côté a , qui recouvrent le carré de côté L . Plus généralement, si la taille de l'étalon de mesure est réduit dans un rapport r , le nombre d'étalons qui recouvrent la grandeur à mesurer est multiplié par N et la dimension D est égale à $\log N / \log r$. Pour le segment, si l'étalon de mesure est divisé par 2, N est multiplié par 2, et la dimension D , égale à $\log 2 / \log 2$, vaut 1. Pour le carré, si l'étalon de mesure est divisé par 2, N est égal à 4, et la dimension D est égale à $\log 4 / \log 2$, soit 2, ce qui est bien la dimension habituelle d'une surface. De même pour le cube, si $r = 2$, $N = 8$ et D est égale à $\log 8 / \log 2$, soit 3.



Pour la courbe de von Koch, si l'on réduit la taille de l'étalon d'un rapport 3, la règle va mieux épouser le contour et mesurer la longueur du triangle équilatéral central de ce segment, qu'elle ignorait auparavant. Ici $N = 4$, et la dimension D de cette courbe est $\log 4 / \log 3$, soit 1,26... Par ce type de raisonnement, on justifie que la dimension de la courbe de Hilbert est égale à 2.

Historiquement, le mathématicien anglais Richardson a montré que, en mesurant une côte avec des étalons de mesure de plus en plus petits, la longueur de la côte varie linéairement sur une échelle doublement logarithmique : la dimension de la côte est approximativement égale à 1,25. La côte est une fractale.



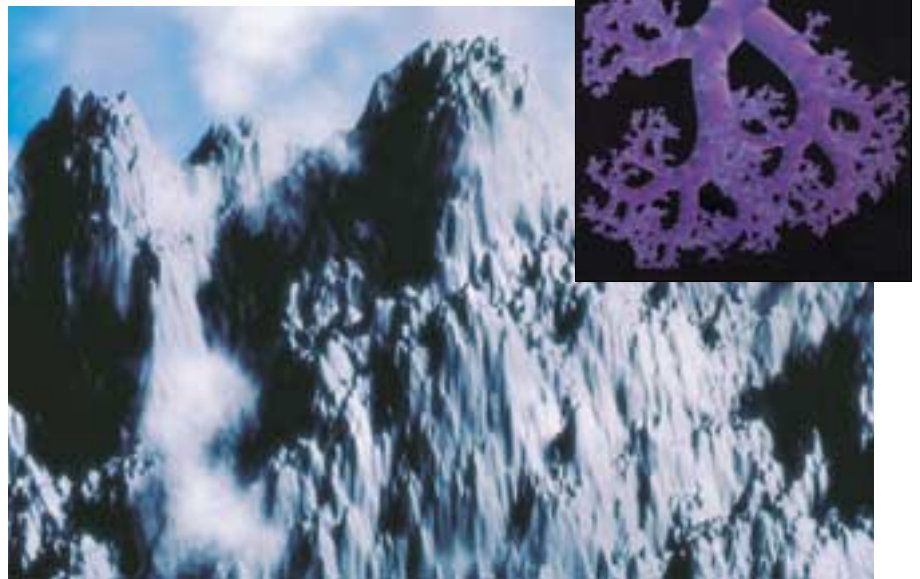
Schering-Plough

dire «remplissait» tout le carré. Était-elle de dimension 1 comme une courbe ou de dimension 2 comme une surface? Une variante de cette courbe conçue par Hilbert est représentée dans l'encadré de la page précédente. Pour élucider l'énigme, les mathématiciens ont généralisé la notion de dimension à des valeurs non entières : la courbe de von Koch a la dimension $\log 4 / \log 3$, soit 1,26. Bien sûr, vous l'avez deviné, la courbe de Hilbert a la dimension 2.

Un autre exemple de fractale est apparu lors de la recherche d'un béton optimisé. Les entrepreneurs veulent un bon remplissage de l'espace, et les fabricants de béton cherchent à remplir un volume par des assemblages de galets, cailloux, gravillons, sables et poudres de plus en plus fins pour diminuer la proportion de ciments. Cette configuration est celle des sphères apolloniennes (figure 5).

Le comportement des objets physiques dépend de leur dimension fractale ainsi définie. Montrons maintenant comment des processus physiques très courants peuvent engendrer des fractales. L'un d'entre eux est le mouvement brownien des molécules et des atomes qui assure la diffusion des particules ; ces phénomènes aléatoires structurent certaines formes, et la géométrie de l'aléatoire est la géométrie fractale.

Des processus de croissance désordonnés se retrouvent partout, dans la forme des arbres, les figures de croissance des arbres ou dans les figures que dessine la foudre. Un exemple est l'agrégation limitée par la diffusion qui donne des agrégats. Imaginons un fluide où sont disséminées des particules ; ces particules diffusent selon les trajectoires aléatoires du mouvement brownien et se collent pour former des agrégats. C'est le phénomène banal de l'obturation des filtres à poussière : des grains de poussière se col-



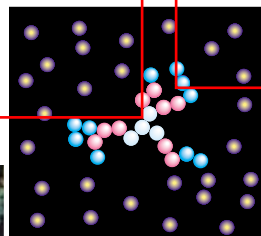
2. Paysage de montagne nuageux. En haut à droite un modèle fractal du poulmon.

lent sur les mailles du filtre, puis des grains se fixent sur les agrégats déjà formés, etc. Ces formations, parfaitement reproductibles par ordinateurs, décrivent aussi la formation des agrégats de noir de carbone utilisés pour augmenter la durée de vie des pneumatiques, la formation des poussières atmosphériques, les croissances de bactéries, la filtration des liquides dans les milieux poreux, et bien d'autres encore. Un processus très simple donne des morphologies extrêmement compliquées, mais hiérarchisées : très souvent l'aléatoire donne des géométries plus simples qu'on ne le croyait.

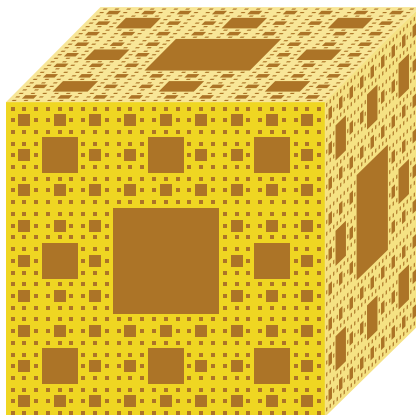
L'universalité des fractales n'est alors plus surprenante : les propriétés de nombreux processus vitaux comme la respiration, l'assimilation des aliments ou l'élimination des toxines, dépendent de ce mouvement aléatoire des molécules et des particules.

«La nature imite l'art», écrivait Oscar Wilde : aussi n'est-il pas étonnant, *a posteriori*, que si les processus naturels donnent naissance à des fractales, les formes naturelles puissent être reconstituées par des fractales. Les logiciels graphiques utilisent les fractales pour reconstituer des paysages. Il serait amusant d'effectuer des tests en double aveugle, pour voir si un observateur peut distinguer les paysages artificiels et les paysages naturels...

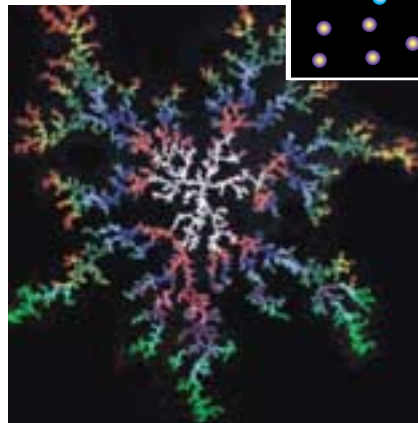
Ces points de vue changent notre approche scientifique. Longtemps nous avons cru que le macroscopique était explicable par une meilleure compréhension du microscopique. L'identité de structure de la partie et du tout modifie notre vision de la physique et dramatise une certaine impuissance du réductionnisme classique à expliquer certains phénomènes naturels.



Bernard SAPOVAL est professeur de physique à l'École Polytechnique



3. L'éponge fractale de Webern.



4. Le résultat d'un processus d'agrégation.



5. Les sphères apolloniennes.

L'organisation des formes

Donald E. Ingber

La nature utilise partout – à l'échelle moléculaire comme à l'échelle macroscopique – les mêmes règles d'assemblage : aussi des motifs tels que spirales, pentagones et formes triangulaires sont-ils omniprésents. Ils apparaissent dans les structures cristallines les plus régulières et dans les protéines les plus contournées, dans des organismes aussi différents que les virus, le plancton, le pollen et... l'être humain. Les fractales, sujet de l'article précédent, nous ont montré cette remarquable «disposition de la nature». Ce constat nous étonne, mais doit-il nous stupéfier? Tout ce qui vit est constitué des mêmes atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de phosphore : aussi n'est-il pas extraordinaire que l'on retrouve souvent les mêmes configurations. Ce que nous allons montrer dans cet article est l'organisation des superstructures qui les rassemble, et pourquoi le monde est fractalisé.

Par auto-assemblage, les constituants se fédèrent pour donner naissance à des structures stables, plus grandes, dont les propriétés, nouvelles, ne pouvaient être prévues par les seules caractéristiques des éléments individuels. Cet auto-assemblage se manifeste à diverses échelles. À l'intérieur du corps humain, de grosses molécules s'auto-assemblent en composants cellulaires, ou organites, lesquels s'auto-assemblent en cellules, cellules qui s'auto-organisent en tissus, et tissus en organes. Le résultat est le corps, organisé hiérarchiquement en différents systèmes emboîtés comme des poupées russes.

L'ADN n'est pas la seule source de structuration : pas plus que la carte n'est le territoire, la connaissance des pièces du puzzle ne donne pas les règles de leur assemblage. Nous pensons qu'un large éventail de systèmes naturels, atomes de carbone, molécules d'eau, protéines, virus, cellules, tissus, et toutes les créatures

vivantes, sont construits sur un même principe architectural, que nous désignons par *tenségrité*. Ce terme désigne la faculté d'un système à se stabiliser mécaniquement par le jeu de forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent. Le concept de tenségrité s'applique à tous les systèmes vivants, du microbe à l'homme, en passant par la cellule, l'unité constitutrice de tous les organismes.

Ainsi la cellule n'est-elle pas une outre pleine de liquide, elle est structurée par un réseau de câbles et de filaments. Ce réseau capte et transporte l'information sur l'environnement cellulaire et commande l'activité des gènes de déplacement et de survie de la cellule. La tenségrité explique comment la forme cellulaire et les forces mécaniques – telles que la pression dans les vaisseaux

sanguins ou la compression dans les os – influent sur l'activité des gènes. Une meilleure intelligence des règles naturelles de l'auto-assemblage nous permet d'intégrer avec plus de pertinence les caractéristiques des molécules, des cellules et des autres constituants biologiques. L'omniprésence de la tenségrité dans la nature ouvre de nouvelles perspectives sur les forces qui régulent l'organisation biologique et, peut-être, sur l'Évolution elle-même.

Dans les structures régies par la tenségrité, les forces sont transmises à tous les éléments : un accroissement de la tension sur l'un des éléments est répercuté aux autres éléments de la structure, y compris les plus éloignés. Cette augmentation globale de la tension est équilibrée par une augmentation de la compression de certains éléments de la structure. Ainsi une structure se stabilise par un mécanisme associant tension globale et compression locale. Dans les élégantes sculptures de Kenneth Snelson, des éléments travaillent en compression, d'autres en traction, reproduisant et expliquant la structuration du corps humain, avec ses 206 os et les muscles qui les relient. Les os sont comprimés par la force de gravité et stabilisés par la traction exercée par les muscles, les tendons et les ligaments.



1. Dans les structures en porte à faux, cou de girafe ou sculpture à tiges et à câbles, les forces sur les organes en extension – les muscles et les câbles – sont équilibrées par les forces sur les dispositifs agissant en compression, les os et les tiges.

Vers la fin des années 1970, les biologistes se représentaient la cellule comme un fluide visqueux délimité par une membrane ; on savait pourtant que les cellules contiennent une armature interne, ou cytosquelette, composée de trois types de protéines, les microfilaments, les filaments intermédiaires et les microtubules. Toutefois, leur rôle dans le contrôle de la forme des cellules était mal compris. On s'interrogeait également sur le comportement des cellules quand elles sont disposées sur différentes surfaces ; les cellules s'étalent et s'aplatissent lorsqu'elles adhèrent à du verre ou au fond d'une boîte de Pétri en matière plastique. En 1980, Albert Harris, de l'Université de Caroline du Nord, montra que, lorsqu'elles sont fixées sur un substrat en caoutchouc flexible,



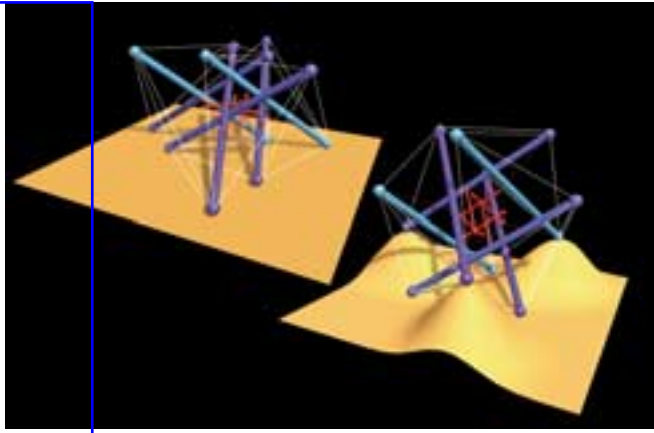
Schering-Plough

les cellules se contractent et s'aplatissent moins. L'aplatissement est réduit par la déformation du caoutchouc.

Ce comportement s'explique si l'on considère la cellule comme une structure de tenségrité. Pour le démontrer, j'ai bricolé une cellule composée de six tiges en bois et d'un jeu d'élastiques. J'ai disposé les tiges – qui subissaient les contraintes de compression – en trois paires (figure 2). Chaque paire était perpendiculaire aux deux autres, sans qu'aucune tige n'en touche une autre. Les élastiques, subissant les forces de tension, reliaient les extrémités de toutes les tiges, tirant sur celles-ci jusqu'à ce qu'elles se disposent en une forme tridimensionnelle stable. Pour simuler le noyau, je plaçai un modèle de tenségrité sphérique plus petit dans la grande structure qui représentait le reste de la cellule. Enfin, pour imiter les connexions du cytosquelette entre le noyau et le reste de la cellule, je tendis des brins élastiques allant de la surface de la grande structure de tenségrité à la plus petite, située à l'intérieur.

Quand on appuie sur ce modèle de tenségrité, il s'aplatit. Dès que la pression exercée est supprimée, l'énergie emmagasinée dans les filaments tendus ramène le modèle, à la manière d'un ressort, vers sa forme d'origine, approximativement sphérique. Pour simuler le comportement des cellules lorsqu'elles sont placées sur une surface, j'ai substitué au substrat de culture, en verre ou en matière plastique, un morceau de tissu tendu solidement épinglé à un support en bois. J'ai fixé le modèle de tenségrité à ce substrat en l'aplatissant et en cousant les extrémités de quelques-unes des tiges au tissu. Ces liaisons simulaient les intégrines, les molécules qui assurent l'adhérence des cellules entre elles ou à leur substrat.

Lorsque les extrémités des tiges étaient cousues sur un tissu solidement épinglé, le modèle restait aplati, exactement comme une véritable cellule sur un substrat rigide (en verre, par exemple). Lorsque je retirais les épingles et libérais le tissu de son support, le modèle de tenségrité retrouvait sa forme sphérique, en plissant le tissu sous-jacent. De plus, quand j'aplatissais le modèle en le fixant au tissu formant le substrat, la cellule et son noyau interne se déformaient



2. Placée sur un support flexible, une cellule est moins aplatie : dans cette configuration, la cellule prend une place plus petite, comme lorsqu'elle est comprimée dans un milieu dense en cellules et se suicide. Elle croit que l'on n'a plus besoin de sa présence.

ensemble : le modèle du noyau se déplaçait vers le bas du modèle de la cellule. Ensuite j'ai montré que les «vraies» cellules et leurs noyaux s'étalent et s'orientent de la même façon lorsqu'ils adhèrent à un substrat : ainsi, les structures de tenségrité imitent le comportement des cellules des organismes vivants.

Le composant externe est la matrice extracellulaire ; les tiges internes comprimées sont soit des microtubules, soit de grands faisceaux de microfilaments entrecroisés à l'intérieur du cytosquelette. Les filaments intermédiaires, le troisième composant du cytosquelette, constituent les organes de liaison de l'ensemble, reliant les microtubules et les microfilaments contractiles entre eux, à la membrane cellulaire et au noyau. En outre, ils

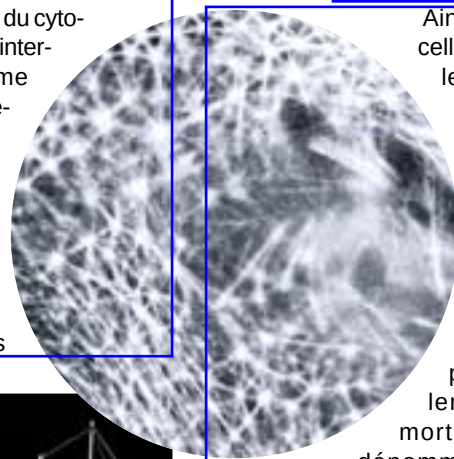


3. Le raidissement linéaire, observé dans les organes tels que les muscles et les cellules, résulte de la réorientation (représenté ci-dessus) des fibres dans les structures de tenségrité. En haut à droite, les fibres du cytosquelette d'une cellule.

constituent des sortes de haubans qui maintiennent en place et immobilisent le noyau, au centre. Bien que le cytosquelette soit entouré de membranes et qu'il baigne dans un fluide visqueux, c'est ce réseau de tiges et de câbles qui stabilise la forme de la cellule.

A. Matus, de l'Institut Friedrich Miescher de Bâle, a fabriqué des cellules où les microtubules sont fluorescents et a ainsi observé la déformation (le flambement) de ces microtubules quand ils sont comprimés.

Le modèle de tenségrité montre que la structure du cytosquelette cellulaire est modifiée par les forces transmises à travers la surface de la cellule. Ce constat est important, car un grand nombre d'enzymes et d'autres substances qui commandent la synthèse des protéines, la conversion de l'énergie et la croissance sont solidaires du cytosquelette ; une modification des caractéristiques géométriques et mécaniques du cytosquelette agit sur les réactions biochimiques, modifie les gènes activés, et donc les protéines fabriquées.



Ainsi la forme des cellules commande les programmes génétiques. Les cellules qui s'étalent et s'aplatissent se divisent mieux, tandis que les cellules rondes que l'on empêche de s'étaler activent une mort programmée, dénommée apoptose.

Quand les cellules ne sont ni trop étalées ni trop contractées, elles ne se divisent pas, elles ne meurent pas, mais se différencient en tissus spécialisés : les cellules de capillaires forment des tubes capillaires creux, les cellules hépatiques sécrètent des protéines que le foie fournit habituellement au sang, et ainsi de suite.

La reconfiguration mécanique de la cellule et du cytosquelette commande le fonctionnement de la cellule. Les cellules très aplaties, dont le cytosquelette est étiré, «sentent» qu'un plus grand nombre de cellules est nécessaire pour couvrir

le substrat – comme lors de la cicatrisation d'une blessure – et qu'une division cellulaire s'impose. Au contraire, la forme arrondie correspond à la situation où trop de cellules sont en concurrence sur la matrice ; certaines doivent mourir pour empêcher une prolifération incontrôlée et la formation d'une tumeur. Entre ces deux extrêmes, le tissu se comporte normalement. Cette commutation ouvre de nouvelles voies pour induire le traitement des cancers ou la réparation des tissus, et peut-être même pour la création de tissus artificiels.

Une propriété capitale des tissus est leur comportement mécanique. Un très grand nombre de tissus distincts, tels que les muscles, le cartilage, les vaisseaux sanguins et la peau, réagissent selon une loi de raidissement linéaire. Quand vous tirez sur votre peau, vous sentez la résistance s'accroître à mesure que vous tirez plus fort. Des travaux récents montrent que même des molécules isolées comme l'ADN manifestent ce raidissement linéaire ; avant le modèle de tenségrité, il n'existait pas d'explication mécanique de ce comportement.

En utilisant un modèle de tenségrité à base de bâtonnets et d'élastiques, nous avons montré que les cellules réagissent comme des structures de tenségrité. Tous les éléments structuraux interconnectés modifient d'eux-mêmes leur disposition en réaction à une contrainte. Le raidissement linéaire s'explique alors : lorsque la force appliquée augmente, de plus en plus d'éléments se disposent dans la direction où s'exerce la contrainte.

Comme une force, même localisée, modifie la forme globale d'une structure de tenségrité, la liaison d'une molécule à une protéine impose un réarrangement complet des différentes régions sur toute la longueur de la protéine. Par exemple, lorsqu'une molécule portant un signal se lie à un récepteur qui traverse la membrane cellulaire, cette liaison peut modifier la conformation à l'extrémité opposée du récepteur. Ces changements déforment à leur tour des protéines adjacentes et déclenchent une série de restructurations moléculaires à l'intérieur de cette

4. Un grain de pollen a une forme de dôme géodésique.

cellule. C'est ainsi que les cellules détectent les informations qui leur parviennent et y réagissent.

Des molécules aux os, aux muscles ou aux tendons, la tenségrité est le système de construction privilégié de la nature. La tenségrité explique, par exemple, comment, chaque fois que vous bougez un bras, votre peau s'étire, comment votre matrice extracellulaire s'étend, comment vos cellules se déforment et comment les molécules interconnectées qui forment l'armature interne des cellules ressentent cette sollicitation.

Peut-être les structures de tenségrité entièrement triangulées ont-elles été sélectionnées au cours de l'Évolution en raison de leur efficacité structurelle qui associe haute résistance mécanique et économie de matériaux. La flexibilité des structures de tenségrité précontraintes est sans doute avantageuse parce qu'elle leur permet de prendre diverses formes. Par exemple, si une molécule ou une cellule est apte à se transformer, à une température ou à une pression données, en une forme plus stable ou plus efficace sur le plan métabolique, sa durée de vie en est prolongée. Elle interagit mieux avec d'autres entités similaires pour donner de nouveaux auto-assemblages.

Les chercheurs sont maintenant convaincus que l'évolution biologique a commencé dans des couches d'argile plutôt que dans la mer primordiale. Il est

intéressant de noter que l'argile consiste en un réseau poreux d'atomes disposés selon les règles géodésiques au sein de formes octaédriques et tétraédriques. Comme ces octaèdres et ces tétraèdres ne sont pas fortement compactés, ils peuvent bouger et glisser les uns par rapport aux autres. Cette souplesse permet à l'argile de catalyser un grand nombre de réactions chimiques, dont celles qui ont produit les premiers éléments de la vie organique.

Avec le temps, différents ensembles moléculaires se sont auto-assemblés pour former les premières structures ayant une fonction spécifique – les précurseurs des organites actuels –, qui se combinèrent pour créer les premières cellules. Ces cellules produisirent des protéines qui s'auto-assemblèrent pour constituer les supports d'ancrage des matrices extracellulaires, qui, à leur tour, se sont auto-assemblées en tissus pluricellulaires. Des organes se développèrent par auto-assemblage de tissus, et des organismes complexes firent leur apparition par combinaison et remodelage progressif d'organes différents. Le développement d'un embryon à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule récapitule ces étapes d'auto-organisation.

L'apparition de l'ADN et des gènes donna naissance à un nouveau mécanisme pour engendrer une diversité structurale qui accéléra l'Évolution. Pendant tout ce temps, les règles définissant le processus d'auto-assemblage hiérarchique restèrent pratiquement inchangées. Il n'est donc pas surprenant que la disposition générale des os et des muscles soit extraordinairement voisine chez *Tyrannosaurus rex* et chez *Homo sapiens*, et que les formes géodésiques telles qu'hexagones, pentagones et spirales soient omniprésentes dans les systèmes naturels.

Comme le suggérait, au début du siècle, le zoologiste écossais D'Arcy Thompson, en se référant à Galilée qui, lui-même, citait Platon : le Grand Livre de la Nature est écrit dans le langage de la géométrie.

Donald E. INGBER est professeur de physiologie à l'Université Harvard (États-Unis).



Schering-Plough

La voie des ondes



Les réseaux de satellites

John Evans

Les télécommunications du XXI^e siècle

Joseph Pelton



Les réseaux radio terrestres

Alex Hills

Les applications des réseaux cellulaires

Warren Stutzman
et Carl Dietrich



L'occupation du spectre radio

David Hughes
et Dewayne Hendricks

Guglielmo Marconi, qui inventa la télégraphie sans fil en 1896, ne reconnaîtrait pas les systèmes de télécommunications. Depuis le début de la révolution micro-électronique, il y a 40 ans, les circuits se sont tant miniaturisés que l'on glisse aujourd'hui un téléviseur ou une radio dans une poche et que l'on a encore de la place pour un téléphone mobile.

Le Globe est en permanence inondé d'ondes électromagnétiques qui transmettent la voix et les images, mais des évolutions encore plus radicales sont en gesta-

tion. Ce dossier montre comment la nouvelle génération de satellites de télécommunications formera un réseau mondial qui offrira, via des terminaux portables situés n'importe où, des services liés à la parole et aux transferts de données à haut débit. Associés aux ordinateurs portables et aux réseaux terrestres, ce réseau de satellites mettra à portée de souris l'intégralité du savoir numérique de notre civilisation. Ces réseaux, qui amélioreront notre sécurité, nous rapprocheront et nous aideront à mieux communiquer.



Les réseaux de satellites

JOHN EVANS

Grâce aux flottilles de satellites de télécommunications, les possesseurs d'un téléphone portable auront accès au réseau téléphonique, à partir de n'importe quel point du Globe.

Le satellite est aujourd'hui la pierre angulaire de notre système de télécommunications. Les débuts furent pourtant modestes : en 1965, le premier satellite de télécommunications placé sur orbite ne comportait que 240 canaux vocaux. Après 35 ans de perfectionnements, les satellites transmettent un tiers du trafic vocal mondial et la plupart des signaux de télévision qui transitent entre les pays.

Le trafic vocal assuré par les satellites est surtout à destination de pays qui n'ont pas de réseau de fibres optiques, le moyen privilégié de transmission des communications téléphoniques : un gros câble à fibre optique transporte dix gigabits par seconde, alors qu'une liaison satellite transporte moins de un gigabit par seconde. Les satellites les plus importants sont sur l'orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres au-dessus du même point du Globe en permanence. À cette distance, un signal électromagnétique met environ un quart de seconde pour atteindre le satellite et revenir, ce qui ralentit la conversation. Bien que la plupart des utilisateurs du téléphone se satisfont de ce délai, les satellites de télécommunications sont de plus en plus utilisés pour transporter des signaux de télévision plutôt que la voix.

Les réseaux de satellites, dont le premier devrait être opérationnel dès la fin de l'année 1998, pourraient inverser cette tendance. Ces nouveaux réseaux fourniront des services de téléphonie mobile par satellites. Ils seront constitués de nombreux satellites placés bien au-dessous de l'orbite géostationnaire, ce qui réduira les délais de transmission. Ces réseaux seront complétés par un ensemble de satellites qui transmettront exclusivement des données, telles celles du réseau Internet. Au cours des sept prochaines années, trois à cinq réseaux de satellites seront dédiés à la voix, tandis qu'une dizaine de réseaux de satellites transporteront des données.

La prévision de l'évolution d'un marché qui n'existe pas encore est impossible. Néanmoins, plusieurs groupes industriels ont investi des milliards de francs dans de nombreux projets, certains déjà bien avancés. Les difficultés et les risques sont

importants : certains projets tablent sur la mise au point d'une nouvelle génération de satellites puissants, capables non seulement d'amplifier et de retransmettre les signaux, mais aussi de les diriger vers des récepteurs spécifiques. De surcroît, ces systèmes fonctionneront à de très hautes fréquences, dans des bandes radio encore inutilisées par des satellites de télécommunications.

Téléphonie numérique

Les nouveaux réseaux satellitaires combineront des caractéristiques des réseaux téléphoniques mobiles terrestres avec celles, plus classiques, des réseaux de télécommunications utilisant des satellites. Aujourd'hui, les téléphones mobiles emploient des ondes radio dont la fréquence est comprise entre 800 et 900 millions de hertz (mégahertz), ce qui correspond à une longueur d'onde de quelques

1. LES SATELLITES DE TELECOMMUNICATIONS du réseau Iridium (représentés ici) ou d'autres réseaux en construction achemineront les communications téléphoniques. Sur cette page, on voit deux des 66 satellites qui seront en place à la fin de 1998. Ces satellites sont sur des orbites terrestres basses ; en réalité, ils sont plus éloignés les uns des autres que cette vision d'artiste ne le suggère. Les panneaux rectangulaires situés à l'extrémité inférieure de l'engin de 4,6 mètres de long sont des panneaux solaires ; les trois autres, articulés, sont les antennes principales.



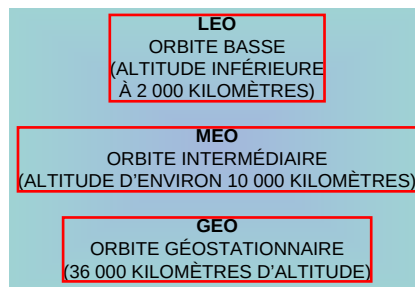
dizaines de centimètres, voisine de la taille des antennes. Les nouveaux réseaux pour les communications personnelles utiliseront une fréquence deux fois supérieure, mais leur fonctionnement restera identique.

Dans les réseaux radiomobiles classiques, la zone couverte est divisée en «cellules», chacune équipée d'une station de base associée à une tour hertzienne terrestre. Pour éviter les brouillages, les téléphones mobiles émettent à une fréquence vers la station et reçoivent à une fréquence différente. La station de base transforme généralement ces signaux radio en micro-ondes (des ondes de fréquence supérieure à celle des ondes radio), qui sont transmises à un commutateur cellulaire, où une seconde transformation restitue des signaux de parole. Cette transformation se fait parfois dans la station de base elle-même, et la parole est alors véhiculée par des lignes téléphoniques classiques avant d'être transmise au commutateur cellulaire.

Ce dernier a deux fonctions : il établit les communications et les transfère à un autre commutateur lorsque l'abonné change de cellule durant la communication. Chaque commutateur cellulaire est aussi relié à un commu-

tateur central du réseau téléphonique public, afin de permettre aux abonnés du téléphone cellulaire de communiquer avec les utilisateurs de téléphones fixes.

Les abonnés aux services cellulaires sont devenus si nombreux que les systèmes numériques se sont imposés. Dans les réseaux classiques, analogiques, la voix est codée par des variations de la fréquence, une technique nommée modulation de fréquence. Ce procédé est coûteux en bande passante : le signal transmis utilise entièrement une bande, ou canal, de 30 kilohertz de large. Afin de réduire l'encombrement de l'espace radio, de nombreuses compagnies utilisent des matériels qui communiquent des messages codés en binaire (les signaux sont composés de séries de 0 et de 1). Les données ainsi numérisées sont alors comprimées



avant la transmission, ce qui réduit la durée d'occupation du canal par chacune des communications, au prix d'une légère baisse de la qualité.

Dans les réseaux téléphoniques classiques, les réseaux commutés, la parole est également transmise sous forme numérique, mais à des débits environ huit fois supérieurs à ceux des réseaux cellulaires (64 kilobits par seconde pour les réseaux commutés). Avec des codages numériques à des débits aussi élevés, la qualité est meilleure, mais la transmission nécessite encore plus de bande passante que si l'on transmettait le signal non numérisé. Pourquoi, alors, utiliser un codage numérique ? D'une part, parce qu'il permet le mélange de plusieurs communications dans une seule fibre optique ou dans une seule ligne micro-onde : les flots de données individuels peuvent être combinés en un seul flot de débit supérieur (multiplexage) qui, à son tour, peut être mélangé avec d'autres dans un flot de débit encore supérieur. D'autre part, la technique numérique est moins sensible aux altérations des signaux dans le réseau : tous les bits ayant la même amplitude, on peut facilement restaurer l'amplitude d'un bit qui aurait été affaibli au cours de la transmission.

CONSTELLATIONS POUR LE TRANSPORT DE LA PAROLE					
	IRIDIUM	GLOBALSTAR	ICO	ELLIPSO	ECCO
SOCIÉTÉ	Motorola	Loral/Qualcomm	ICO Global Communications	Mobile Communications Holdings	Constellation Communications
NOMBRE DE SATELLITES	66	48	10	14	46
PLANS DES ORBITES	6 circulaires polaires (86,5 degrés)	8 circulaires inclinées (52 degrés)	2 circulaires inclinées (45 degrés)	2 elliptiques inclinées (116,6 degrés) 1 elliptique équatoriale (0 degré)	7 circulaires inclinées (62 degrés) 1 circulaire équatoriale (0 degré)
ALTITUDE DE L'ORBITE (EN KILOMÈTRES)	780 (LEO)	1 414 (LEO)	10 355 (MEO)	520 - 7 846 (MEO) 4 223 - 7 846 (MEO)	2 000 (LEO)
NOMBRE DE SATELLITES PAR PLAN ORBITAL	11	6	5	4 par elliptique 6 par équatoriale	5 par inclinée 11 par équatoriale
NOMBRE DE FAISCEAUX PAR SATELLITE	48	16	163	61	32 par inclinée 24 par équatoriale
COUT ESTIME (EN MILLIARDS DE FRANCS)	20	15	27	5,5	17

CONSTELLATIONS POUR LE TRANSPORT DE DONNÉES							
	ASTROLINK	CELESTRI	CYBERSTAR	SPACEWAY	GE*STAR	MORNINGSTAR	TELEDESIC
SOCIÉTÉ	Lockheed Martin	Motorola	Loral	Hughes	G.E. Americom	Morning Star	Teledesic
NOMBRE DE SATELLITES	9	63 LEO/9 GEO	3	20 MEO/16 GEO	9	4	288
PLANS DES ORBITES	Equatoriale (0 degré)	7 inclinées (48 degrés) 1 équatoriale (0 degré)	Equatoriale (0 degré)	4 inclinées (55 degrés) 1 équatoriale (0 degré)	Equatoriale (0 degré)	Equatoriale (0 degré)	12 inclinées (98 degrés)
ALTITUDE DE L'ORBITE (EN KILOMÈTRES)	GEO	1 400 (LEO) et GEO	GEO	10 352 (MEO) et GEO	GEO	GEO	1 375 (LEO)
DEBIT ESTIMÉ (EN GIGABITS PAR SECONDE)	6,0	1,5	9,0	4,4	4,7	0,5	10,0
CAPITAL NÉCESSAIRE (EN MILLIARDS DE FRANCS)	24	77	10	38	24	5	54

Les commutateurs locaux sont reliés par des câbles optiques à des commutateurs plus importants, des routeurs, qui gèrent les appels à longues distances. Les appels internationaux, notamment, sont dirigés vers des centres spéciaux qui les acheminent par des câbles sous-marins ou par des satellites.

Tous les pays du monde ne sont pas reliés par des fibres optiques, mais la plupart sont reliés aux satellites de l'Organisation internationale des télécommunications (*Intelsat*). Cette organisation gère les satellites internationaux qui fonctionnent dans la bande de radiofréquences réservée aux «satellites fixes». Les appels via satellites sont dirigés vers la station terrestre *Intelsat* la plus proche. La séquence de bits codant ces appels module une onde radio qui est amplifiée et transmise au satellite par une antenne parabolique dont le diamètre atteint 15 mètres.

Arrivée au satellite, cette onde est très faible, car l'énergie du signal décroît proportionnellement au carré de la distance parcourue. Ainsi, l'antenne de réception des satellites géostationnaires doit être relativement grande, environ deux à trois mètres de diamètre. Le signal recueilli est amplifié et retransmis à une station réceptrice, sur la Terre, où les signaux individuels de parole sont reconstitués.

Les satellites d'*Intelsat* transmettent simultanément plusieurs dizaines de milliers de conversations. À bord, l'énergie fournie par des panneaux solaires et par de petits réacteurs utilisant un carburant embarqué (comme l'hydrazine) maintient les antennes en direction de la Terre, en rectifiant la position du satellite.

Les satellites, stations de base

Les nouveaux satellites de télécommunications auront les avantages des réseaux mobiles et ceux des satellites classiques. Ce seront des stations de base en orbite, avec lesquelles les téléphones mobiles communiqueront directement. Comme les satellites classiques, ils couvriront de très grandes zones, même des régions qui ne possèdent pas encore de réseaux cellulaires terrestres.

Ces avantages ne seront accessibles qu'au prix d'avancées techniques. Un obstacle fondamental provient de l'impossibilité à équiper les téléphones mobiles d'autre chose que de petites antennes non directives. De surcroît, en utilisation normale, la puissance d'émission doit être inférieure à un watt : à des puissances aussi faibles, les utilisateurs ne devraient plus craindre les effets biologiques des

ondes radio, et les batteries devraient durer plus longtemps.

Le signal émis par les téléphones étant de faible puissance, sa réception par un satellite en orbite géostationnaire nécessiterait une antenne de dix à douze mètres de diamètre. Comme le déploiement en orbite de telles antennes reste difficile, les satellites de ces réseaux seront sur des orbites beaucoup plus proches de la Terre. En rapprochant ainsi les orbites de 36 000 kilomètres d'altitude à 10 000 kilomètres, on multiplie par 13 la puissance du signal reçu du téléphone mobile, de sorte que des antennes de deux à trois mètres, analogues à celles des satellites géostationnaires, suffisent.

La contrepartie de l'utilisation d'orbites basses est une diminution de la couverture. Sur une orbite géostationnaire, un satellite «voit» environ un quart de la surface terrestre, et trois ou quatre satellites suffisent à couvrir le Globe. À 10 000 kilomètres d'altitude, un satellite voit moins de surface, et sa période de rotation est d'environ six heures : pour couvrir le Globe, on devra utiliser une flottille d'une dizaine de satellites, à égale distance les uns des autres, d'où le nom de constellation de satellites.

Le signal émis par un téléphone portable étant faible, la tâche de gestion de la connexion est réalisée par

le satellite. L'installation ne fonctionnera que si le satellite utilise des faisceaux extrêmement étroits, d'environ un degré d'angle, couvrant chacun une cellule au sol d'environ 150 kilomètres de diamètre. De nombreux faisceaux couvriront la surface voulue.

On place généralement les satellites au-dessus ou au-dessous de la ceinture de Van Allen, où les particules de haute énergie endommageraient les panneaux solaires et l'électronique embarquée. C'est pourquoi les satellites évolueront à des altitudes supérieures à 10 000 kilomètres ou inférieures à 1 500 kilomètres. Pour cette dernière orbite, la période est de 100 minutes environ, et la couverture du Globe nécessite alors plus d'une centaine de satellites. Ces deux types d'orbites sont respectivement nommés «orbite circulaire intermédiaire» et «orbite terrestre basse».

Choix de satellites

L'un des avantages des constellations de satellites est l'existence d'un chemin dégagé entre le satellite et tous les abonnés, ce qui autorise l'utilisation de faibles puissances (les systèmes terrestres cellulaires pâtissent du manque de visibilité des tours émettrices, d'où la nécessité d'utiliser une puissance d'émission élevée). Toutefois, les communications entre un satellite et un abonné mobile pourront être perturbées par des bâtiments, des arbres ou d'autres obstacles. Les satellites situés sur des orbites circulaires intermédiaires, qui sont plus haut dans le ciel et qui le traversent plus lentement que les satellites sur des orbites basses, devraient assurer de meilleures transmissions.

Sur des orbites élevées, le Globe est couvert avec moins de satellites, mais les antennes doivent être plus grandes. De plus, comme les faisceaux possèdent la même ouverture, chaque antenne doit former un nombre de faisceaux supérieur pour conserver la même couverture au sol. Les satellites destinés aux orbites basses sont généralement plus petits, plus légers et plus économiques que ceux desti-

nés aux orbites intermédiaires, eux-mêmes moins chers que les satellites géostationnaires.

Les opérateurs de ces constellations de satellites devront également apprendre à gérer les changements de zone de couverture. La situation est inverse de celle du réseau cellulaire terrestre : l'abonné est stationnaire, mais la cellule se déplace. Le changement de faisceau d'un même satellite est relativement aisé. En revanche, la situation est plus complexe lorsqu'il faut transférer la communication entre satellites, ce qui arrivera vraisemblablement avec une constellation sur orbite basse. La difficulté dépendra de la configuration précise de l'ensemble des satellites ; dans le meilleur des cas, le transfert ne devra se produire que lorsque le signal de l'abonné sera reçu par l'autre satellite.

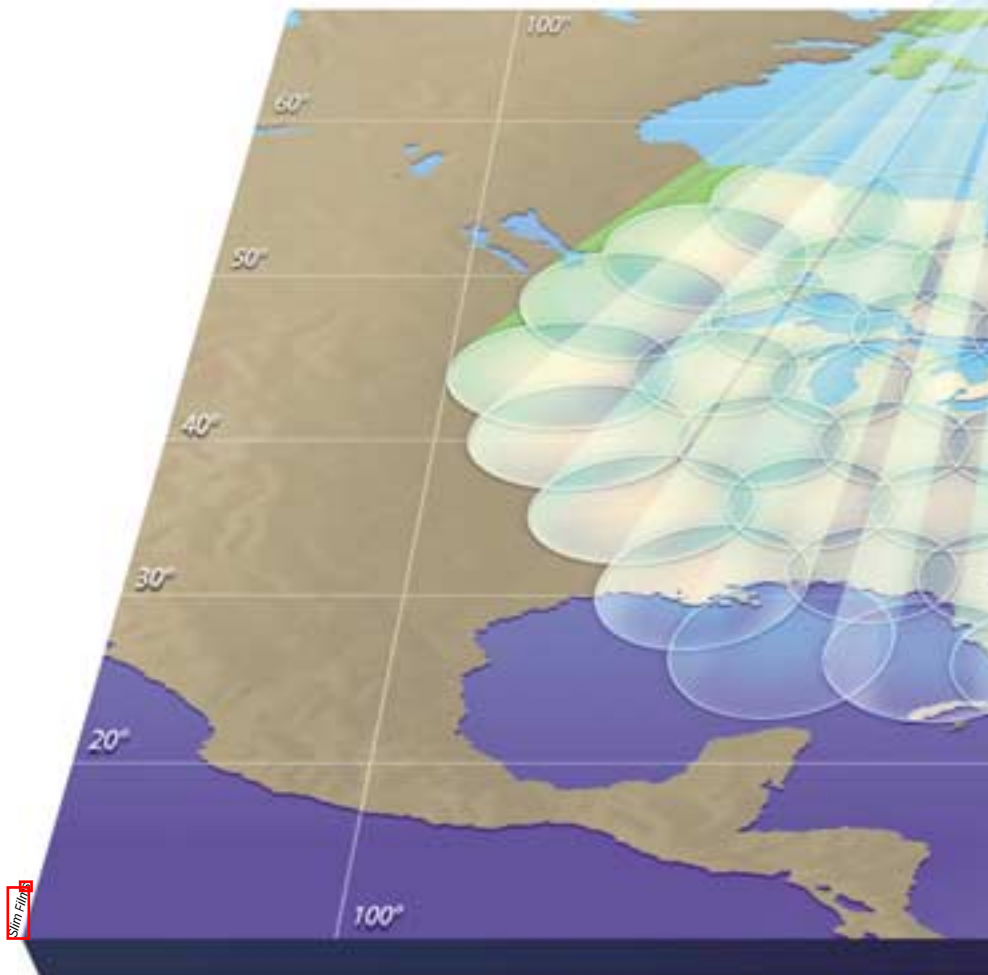
Tous les systèmes décrits ici requièrent une certaine supervision. L'établissement d'une connexion nécessite généralement une demande, effectuée par le téléphone portable, qui utilise alors un canal de signalisation. Tous les réseaux, même terrestres, nécessi-

tent que l'appel soit transmis dans un canal différent du canal de signalisation : le canal de signalisation est alors libéré, de sorte que d'autres communications peuvent ensuite s'établir. Les signaux reçus par un satellite doivent être retransmis à une «passerelle terrestre», qui suit en permanence le satellite dans sa traversée du ciel. Là, le signal est retransformé en signal téléphonique ordinaire, puis introduit dans le réseau public.

Téléphone et voyage d'affaires

Les divers réseaux cellulaires par satellites différeront selon leurs clients. Les utilisateurs potentiels les plus nombreux sont des hommes d'affaires de deux types : ceux des pays industrialisés, qui commercent souvent avec des pays en développement où le réseau téléphonique est insuffisant, et ceux qui utilisent leur téléphone portable dans des zones où les réseaux cellulaires terrestres ne fonctionnent pas. D'autres marchés existent : les compagnies téléphoniques visent les personnes qui vivent en milieu

2. CHACUN DES 40 FAISCEAUX D'UN SATELLITE IRIDIUM couvre, sur la Terre, une surface de 600 kilomètres de diamètre. Cette division en faisceaux étroits est imposée par la faible puissance émise par les téléphones mobiles. Les commutations et les routages nécessaires à la connexion sont gérés par le satellite.



rural, sans connexion au réseau téléphonique, ou divers services publics (police, pompiers, etc.) qui ont besoin d'un réseau de communication qui résisterait à des catastrophes, tels les séismes ou les inondations.

Sur les différents réseaux proposés, cinq aboutiront probablement. Quatre ont été agréés par la Commission américaine des télécommunications (FCC) ; le cinquième est issu de l'organisation internationale *Inmarsat*, semblable à *Intelsat*, mais spécialisée dans la téléphonie cellulaire. Les quatre projets américains sont *Iridium*, construit par plusieurs sociétés, dont *Motorola* et *Lockheed Martin* ; le réseau *Globalstar*, construit par un fabricant de satellites (*Loral Space and Communications*) et un fabricant d'équipements cellulaires (*Qualcomm*), avec une participation européenne (*Alcatel Espace*, *Aérospatiale*, *Alenia Spazio*) ; *ECCO*, proposé par la Société *Constellation Communication* ; enfin, *Ellipso*, qui sera construit par la Société *Mobile Communication Holdings*.

D'un coût de près de 20 milliards de francs, *Iridium* est le

projet le plus ambitieux, mais aussi le plus près d'aboutir. Au total, la constellation *Iridium* sera constituée de 66 satellites, chacun capable de transmettre 1 100 communications simultanées et possédant suffisamment de carburant pour durer huit ans (le projet prévoyait initialement 77 satellites, d'où le nom *Iridium*, un élément chimique qui possède 77 électrons ; pour des raisons budgétaires, ce nombre a été ramené à 66). La Société *Motorola* a déjà lancé deux tiers des satellites et prévoit la mise en service du réseau au dernier trimestre 1998. Ces satellites sont sur des orbites polaires basses circulaires, à 780 kilomètres d'altitude. Six plans orbitaux comprendront chacun 11 satellites équidistants.

Ces satellites transmettront la parole, les données à 2,4 kilobits par seconde et incluront un service de radiomessagerie. Les connexions devraient être de meilleure qualité que dans les réseaux concurrents, car les concepteurs ont prévu que les téléphones seront utilisables à partir d'un véhicule (un taxi, par exemple). Cette qualité est imposée par la cible commerciale visée : les voyageurs d'affaires.

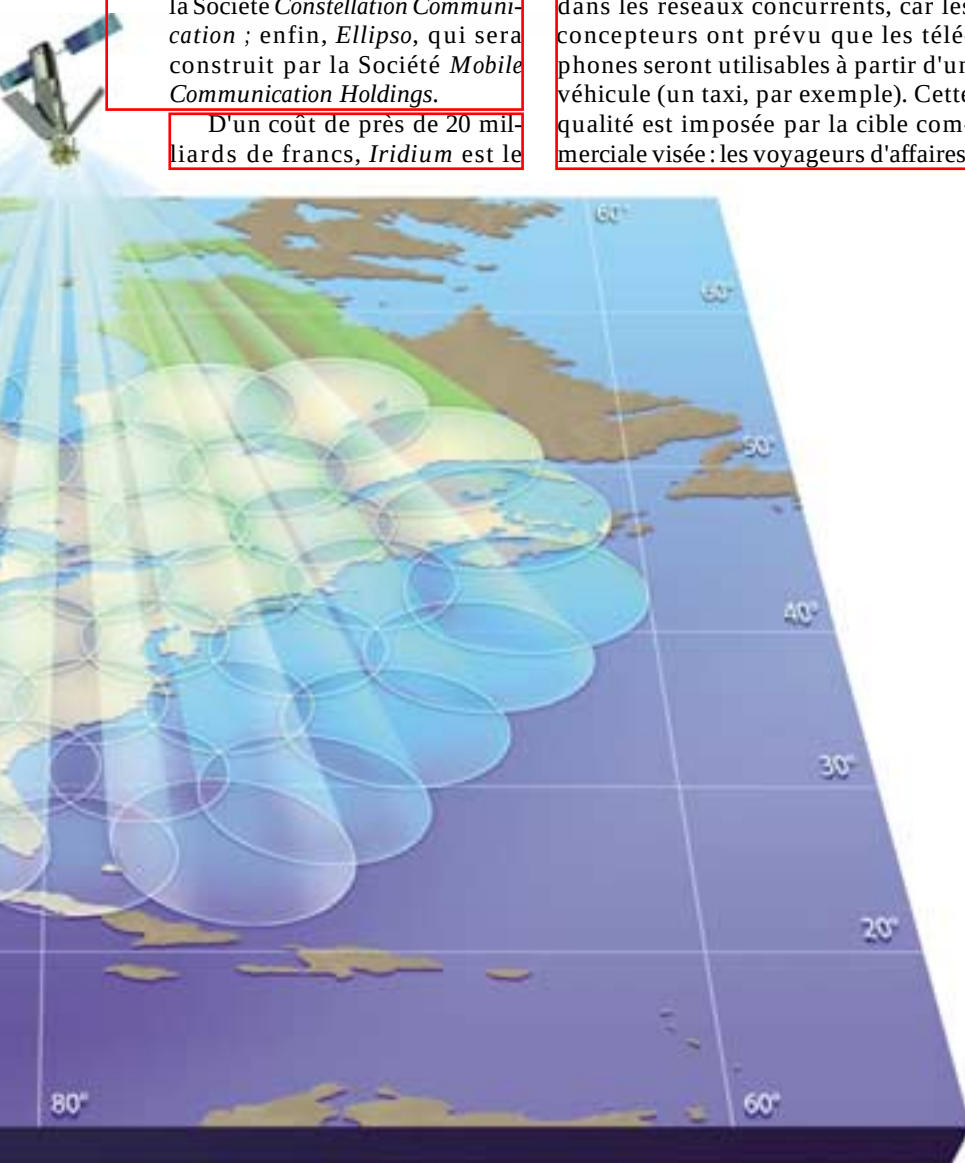
La complexité du système *Iridium* provient principalement de ce que les satellites communiqueront non seulement avec les stations terrestres, mais aussi les uns avec les autres. Pour acheminer le trafic, chaque satellite emporte un ensemble de tables de routage, grâce auxquelles de nouvelles instructions d'acheminement sont décidées toutes les minutes environ. Les signaux provenant du sol seront transmis par paquets (de courtes séquences de bits), dont chacun contient l'adresse du destinataire (comme dans le réseau Internet). Le satellite décode cette adresse et transmet les paquets à la destination indiquée.

Des liaisons entre satellites

Cette destination peut être un autre téléphone portable d'un abonné à *Iridium* ou bien une passerelle terrestre. Si ni l'un ni l'autre n'est accessible, le satellite s'adresse à l'un des quatre satellites voisins, celui placé avant ou après dans le même plan orbital, ou le plus proche à l'Est ou à l'Ouest dans les plans adjacents. Ces liens transversaux compliquent l'ensemble du système, mais réduisent le nombre de passerelles terrestres à une douzaine, tout en fournissant une couverture mondiale.

Le fonctionnement est essentiellement assuré par les satellites. Afin de prévenir les saturations, les ingénieurs ont conçu les liens de manière que chacun ait la capacité de transmettre tous les messages émis par un satellite. Des instructions complémentaires de routage stipulent le fonctionnement à adopter si l'un des liens transversaux tombait en panne.

La constellation *Globalstar* se fonde également sur des satellites en orbite basse, mais les satellites ne communiqueront pas directement. Ce choix simplifie considérablement la conception du système, mais les abonnés n'obtiendront de communication que s'ils sont en vue d'un satellite de la constellation et si ce satellite est aussi en vue d'une passerelle terrestre. De ce fait, les zones couvertes se trouvent toutes à moins de 1 600 kilomètres d'une passerelle terrestre. Pour que le service soit vraiment global, il faudrait plus de 200 stations terrestres, ce qui semble irréaliste. Pour cette raison, *Globalstar* sera destiné aux voyageurs d'affaires qui restent dans un pays plutôt qu'à ceux qui voyagent à l'étranger.



Depuis février 1998, huit satellites de *Globalstar* ont été lancés, et les responsables du réseau espèrent une ouverture au public au début de 1999. Ils ont déjà attribué 100 concessions à des partenaires qui gèreront le réseau dans les différents pays. En plus de la voix, *Globalstar* transmet des télécopies et des données.

La constellation *Globalstar* comportera 48 satellites répartis sur huit orbites. Les orbites seront circulaires, à 1 414 kilomètres d'altitude, et inclinées de 52 degrés par rapport à l'équateur. L'utilisation d'orbites inclinées concentre les satellites aux basses latitudes, où vit la majorité de la population, mais les latitudes supérieures à 70 degrés seront mal desservies.

Le système *ECCO* aura également ses satellites en orbites basses. Il est prévu pour fonctionner avec 46 satellites, 11 sur des orbites circulaires équatoriales situées à 2 000 kilomètres d'altitude, et cinq sur chacune des sept autres orbites inclinées. Ce système assurera des liaisons téléphoniques et des télécopies à 2,4 kilobits par seconde, dans les zones rurales. Les satel-

lites de cette constellation seraient construits par la Société franco-britannique *Matra Marconi Space*.

Orbites intermédiaires

Les deux réseaux de communications personnelles fondés sur des satellites situés sur des orbites intermédiaires sont *ICO*, proposé par la Société *ICO Global Communication*, et *Ellipso*. Le système *Ellipso* est particulier, parce que les orbites seront elliptiques, de sorte que les satellites desserviront mieux l'hémisphère Nord, où vit la majeure partie de la population mondiale : les orbites sont en effet choisies de manière que leurs points le plus éloignés de la Terre (apogée) soient au-dessus de l'hémisphère Nord. Ainsi, les satellites resteront plus longtemps au Nord de l'équateur.

Le réseau *Ellipso* devrait être le moins onéreux de tous : sa construction coûtera six milliards de francs seulement. Les satellites seront analogues à ceux du réseau *Globalstar*, chacun possédant 61 faisceaux, ainsi que de simples répéteurs transpondeurs qui ne font que transmettre le signal reçu, mais sur une autre fréquence. Chaque satellite aura une masse de 700 kilogrammes et une durée de vie comprise entre cinq et sept ans.

Le réseau *ICO* devrait être opérationnel en l'an 2000. C'est la seule constellation sur des orbites circulaires intermédiaires. Les ingénieurs du projet *ICO* ont choisi d'utiliser 163 faisceaux par satellite, afin de fiabiliser la liaison avec les téléphones portables. Un si grand nombre de faisceaux sera assuré par des antennes à conjugaison de phase, où l'on module la phase de l'onde pour créer des interférences constructives qui formeront les faisceaux. Les signaux alimentant les éléments seront calculés par ordinateur, de manière que leur combinaison engendre l'un des 163 faisceaux. L'or-



S. M. F. M.

3. LE SYSTÈME ASTROLINK se composera de neuf satellites géostationnaires placés en cinq positions. C'est l'un des sept projets de réseaux pour la transmission des données, essentiellement pour l'Internet. Six de ces projets prévoient l'utilisation de satellites

géostationnaires que l'on peut joindre facilement avec des équipements ne nécessitant pas de suivre le satellite dans sa traversée du ciel. Moins coûteux, ces équipements pourraient avoir la faveur des utilisateurs.

ordinateur de bord calculera également vers quel faisceau les signaux provenant de la passerelle terrestre doivent être dirigés. Cet ordinateur de bord sera le plus complexe jamais embarqué dans un véhicule spatial et consommera près de deux kilowatts, soit une bonne partie de la puissance disponible du satellite.

Toutes ces constellations fonctionneront-elles? En confiant aux satellites une quantité de calculs importante, les concepteurs des réseaux *Iridium* et *ICO* prennent un risque technique notable. Aujourd'hui, seuls trois satellites ont été équipés d'ordinateurs de puissance respectable. L'un est réalisé par la NASA et les deux autres par des Italiens pour leurs véhicules spatiaux expérimentaux. De surcroît, le projet *Iridium* n'est viable que s'il attire environ un million d'hommes d'affaires... dont les besoins futurs pourraient être satisfaits autrement, par exemple par des téléphones cellulaires qui s'adapteraient aux différents standards nationaux.

Le réseau *Globalstar* semble celui qui a le plus de chances de succès, car sa construction ne coûtera pas trop cher et les stations terrestres seront payées par les opérateurs concessionnaires dans chaque pays. Ces opérateurs aideront l'implantation sur leur marché local. La croissance des autres systèmes pourrait être freinée par la concurrence : ils n'arriveront sur le marché que plusieurs années après. Il sera également difficile à *Ellipso*, ainsi qu'à *ECCO* de trouver les financements nécessaires, ce qui laissera en tête *Iridium*, *Globalstar* et *ICO*.

L'attitude des clients sera naturellement déterminante. Habitué à la qualité des réseaux cellulaires terrestres et à leur importante diffusion, certains pourraient boudier les téléphones par satellites et leurs communications fragiles. D'autres pourraient acheter un téléphone par satellites pour des raisons de sécurité (pour des déplacements dans des endroits reculés, par exemple) et ne les utiliser que rarement.

La transmission de données

Dans de nombreux pays industrialisés, la dérégulation des télécommunications a suscité une activité industrielle considérable. La principale raison de cette croissance d'activité est le succès du réseau Internet : dans le monde, on estime que le nombre de foyers

raccordés au réseau Internet passera de 50 millions aujourd'hui à plus de 150 millions en l'an 2000. À cette époque, le marché de la fourniture d'accès à l'Internet pourrait ainsi s'élever à plus de 50 milliards de francs. L'usage professionnel de l'Internet devrait croître de manière encore plus spectaculaire, car les entreprises se dotent de leurs propres réseaux semi-privés, nommés «intranets». Le marché de la fourniture de bande passante pour les entreprises, qui était de cinq milliards de francs en 1996, pourrait s'élever à 150 milliards en l'an 2000.

Plusieurs réseaux par satellites ont été conçus en vue de répondre à cette demande. En raison de l'encombrement des fréquences, ces réseaux utiliseront des fréquences différentes de celles utilisées dans les mobiles terrestres. Ils opéreront dans une bande de fréquence plus élevée, la bande Ka (cette appellation est issue des désignations codées de la Seconde Guerre mondiale). Le choix de cette bande s'est imposé : quelles que soient les orbites des satellites, l'utilisation de toute autre bande provoque des interférences entre satellites. Plus de 50 projets utilisant près de 170 satellites sur des positions géostationnaires et utilisant la bande Ka ont été proposés. La plupart de ces projets auront une couverture nationale ou régionale.

Dans la bande Ka, les longueurs d'onde sont comprises entre 1 et 1,5 centimètre (fréquence comprise entre 20 et 30 gigahertz). Son principal défaut est l'atténuation du signal par la pluie, et c'est pourquoi cette bande a été jusqu'ici réservée à quelques satellites expérimentaux. Ce problème de l'atténuation devrait être contourné, notamment par des algorithmes de correction d'erreurs, et les ingénieurs prédisent une disponibilité comprise entre 99,5 et 99,9 pour cent.

Sept systèmes américains encore au stade de projet pourraient transmettre des données dans le monde entier. Trois sont fondés entièrement ou partiellement sur des satellites en orbite basse ou moyenne, les quatre autres sur des satellites géostationnaires.

En raison du nombre élevé de satellites à envoyer, les deux projets avec des orbites basses seront les plus coûteux. Ainsi, avec ses 288 satellites tournant à 1 400 kilomètres d'altitude, *Teledesic* sera la constellation la plus nombreuse et la plus onéreuse. Le besoin d'un tel nombre de satellites

résulte de la position de l'orbite, mais également de la nécessité de minimiser l'atténuation provoquée par la pluie. La zone couverte par chaque satellite sera limitée à un cône étroit.

Le projet *Celestri* de la Société *Motrola* est comparable à *Teledesic*, en terme de complexité et de coût. Le système utilisera une constellation de 63 satellites placés à 1 400 kilomètres d'altitude, ainsi que neuf satellites géostationnaires. La partie géostationnaire sera employée par des clients dont le trafic n'est pas pénalisé par les temps de transmission. Le réseau offrira des accès à très haut débit, entre 64 kilobits par seconde et 155 mégabits par seconde ; ce sera un concurrent sérieux du réseau *Teledesic*.

Les autres systèmes fondés sur des satellites géostationnaires sont plus modestes, avec des coûts estimés entre 5 milliards et 40 milliards de francs. Les projets les moins complexes, celui de la Société *Loral* et celui de la Société *Morning Star Satellite*, ne prévoient que la couverture d'une partie du Globe avec trois et quatre satellites seulement. À l'autre extrémité de l'échelle des prix, celui de la Société *Hughes* s'articule autour de 16 satellites géostationnaires, complétés par 20 satellites sur des orbites intermédiaires.

Des sept projets américains proposés, deux ou trois aboutiront. Non pas que les autres soient moins bons, mais ils ne pourront vraisemblablement pas financer leur projet. Comparés aux projets de transport de la parole que nous avons évoqués précédemment, ces projets sont beaucoup plus risqués, car la demande est moins nette : ceux qui ont besoin de trouver des capitaux sont handicapés par rapport aux entreprises capables de démarrer les projets avec leurs propres ressources. Aujourd'hui, les projets les plus avancés sont ceux des sociétés *Loral*, *Lockheed Martin*, *Motrola* et *Teledesic*.

Au-delà de la bande Ka

Alors que la conception des systèmes utilisant la bande Ka commence, les entreprises ont déjà demandé à la FCC des autorisations pour exploiter des systèmes fonctionnant à des longueurs d'onde encore plus courtes, entre six et huit millimètres (entre 37 et 50 gigahertz, aussi nommée la bande Q/V). Plus de 14 demandes ont été faites.

Cette bande de longueurs d'onde inférieures intéresse les opérateurs, même si l'atténuation y est encore plus importante : dans une atmosphère aride, les molécules d'air absorbent ces ondes. Ainsi, les signaux dont la longueur d'onde est de six millimètres sont atténués d'un facteur trois ou quatre pour des trajets dont l'angle au-dessus de l'horizon est inférieur à 20 degrés. Pour ajouter aux difficultés, les circuits électroniques fonctionnant à ces courtes longueurs sont onéreux. La bande Ka sera vraisemblablement utilisée complètement avant qu'un système fonctionnant à ces courtes longueurs d'onde ne soit construit.

Ce développement des constellations de satellites bouleversera notre mode de vie. D'ici l'an 2000, nous pourrions appeler n'importe qui sur la planète à l'aide d'appareils analogues aux téléphones portables actuels. Pour le meilleur ou pour le pire, nous ne pourrions plus être isolés.

Ces services profiteront naturellement au commerce, au tourisme et à ceux qui ont les moyens de les payer, dans les pays où ils n'existent pas encore. On pourra alors vivre loin de tout, mais participer à la vie culturelle du monde, par l'Internet ou d'autres services multimédias fournis à des débits suffisamment élevés pour obtenir de la vidéo à la demande. Le monde sera-t-il aussi plus grand, plus petit ou plus intéressant ? À chacun de répondre.

John EVANS est vice-président de la Société *Comsat*.

Personal and Mobile Radio Systems, sous la direction de R.C.V. Macario, Peter Peregrinus on behalf of IEEE, 1991.

G. MARAL et M. BOUSQUET, *Satellite Communications Systems*, John Wiley & Sons, 1993.

John V. EVANS, *Satellite Systems for Personal Communications*, in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 39, pp. 7-10, juin 1997.

John V. EVANS, *Telecommunication Satellite Systems of the Future*, in *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 16, 1998, à paraître.

Des informations complémentaires sur les projets cités sont accessibles sur notre site Web :

<http://www.pourlascience.com/numeros/pls-248/sommaire.htm>

Les télécommunications du XXI^e siècle

JOSEPH PELTON

Les sociétés de télécommunications préparent un réseau global qui associera des systèmes radio et des réseaux terrestres.

Dans les deux prochaines décennies, des flottilles d'engins spatiaux, de ballons et d'avions changeront nos modes de communications par des téléphones portables ou des terminaux miniatures ; nous aurons accès à des informations variées et des applications nouvelles apparaîtront : jeux en réalité virtuelle, films, musique, statistiques, dispositifs de télé-médecine, télé-enseignement...

Aujourd'hui, 220 satellites de télécommunications sont en service ; dans cinq ans, il y en aura près de 1 000. La plupart de ces commutateurs célestes seront sur des orbites basses, à quelques centaines de kilomètres au-dessus de nos têtes. Toutefois, les satellites géostationnaires classiques, à 36 000 kilomètres du sol, resteront dans le paysage spatial.

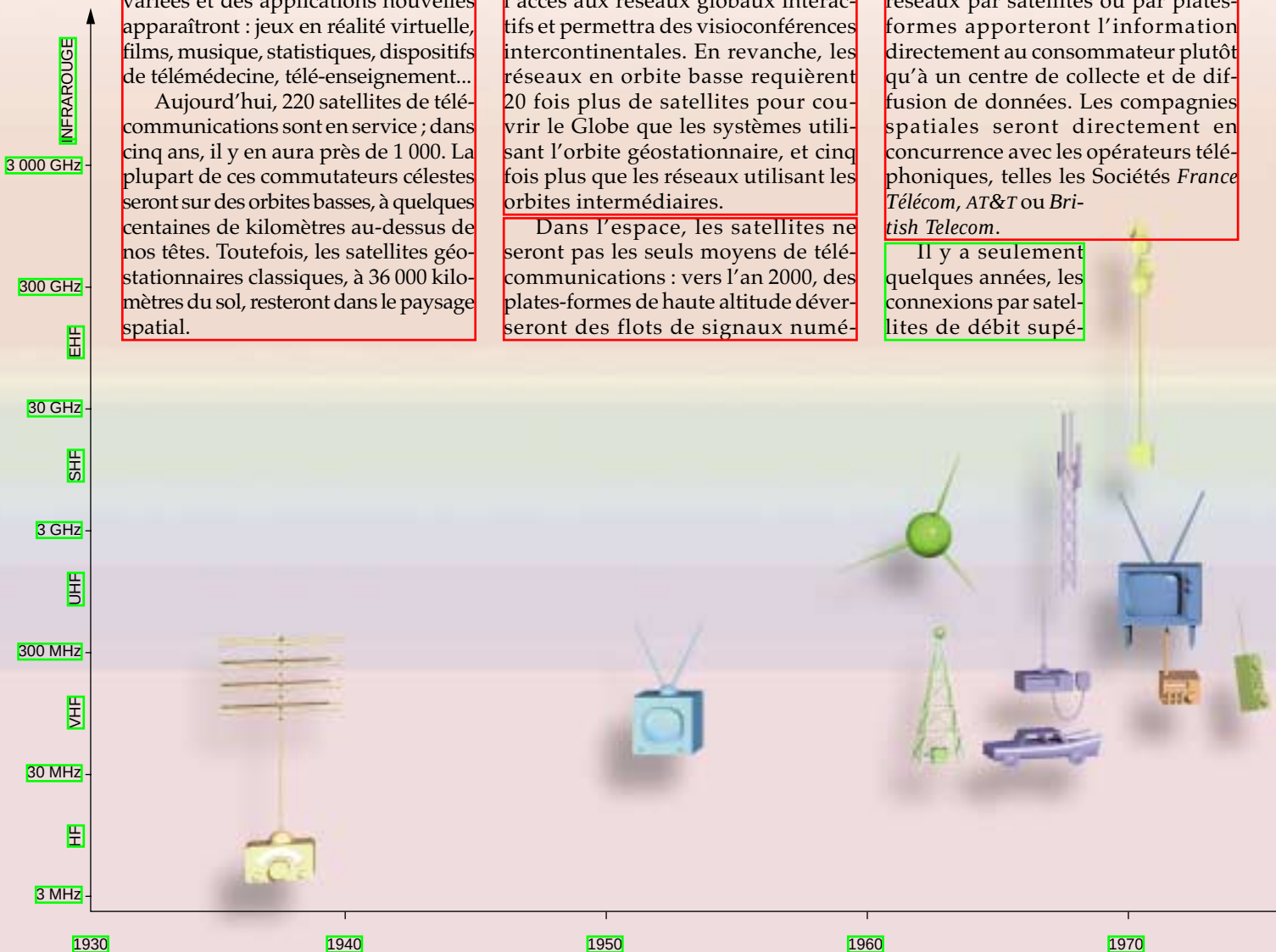
La proximité des satellites en orbite basse est avantageuse : le signal ne met que quelques centièmes de seconde pour faire un aller et retour, contre un quart de seconde pour les échanges avec les satellites géostationnaires. Cette rapidité facilitera l'accès aux réseaux globaux interactifs et permettra des visioconférences intercontinentales. En revanche, les réseaux en orbite basse requièrent 20 fois plus de satellites pour couvrir le Globe que les systèmes utilisant l'orbite géostationnaire, et cinq fois plus que les réseaux utilisant les orbites intermédiaires.

Dans l'espace, les satellites ne seront pas les seuls moyens de télécommunications : vers l'an 2000, des plates-formes de haute altitude déverseront des flots de signaux numé-

riques vers les villes. Ces avions et ces dirigeables sans pilote voleront ou flotteront respectivement des jours durant, à plus de 20 000 mètres d'altitude, bien au-dessus du trafic aérien commercial.

Les changements seront décisifs : réseaux par satellites ou par plates-formes apporteront l'information directement au consommateur plutôt qu'à un centre de collecte et de diffusion de données. Les compagnies spatiales seront directement en concurrence avec les opérateurs téléphoniques, telles les Sociétés France Télécom, AT&T ou British Telecom.

Il y a seulement quelques années, les connexions par satellites de débit supé-



rieur à celui du service téléphonique classique nécessitaient d'encombrantes antennes paraboliques. De surcroît, ces liaisons étaient peu nombreuses et coûtaient environ 60 francs par minute. Aujourd'hui, la qualité et la quantité de données à haut débit en provenance de l'espace s'accroissent. Le progrès profite à de nombreux individus, aux entreprises du monde entier et, plus particulièrement, aux pays qui ne possèdent pas de réseaux denses en fibres optiques, tels la Chine ou le Brésil.

L'antenne, clé du progrès

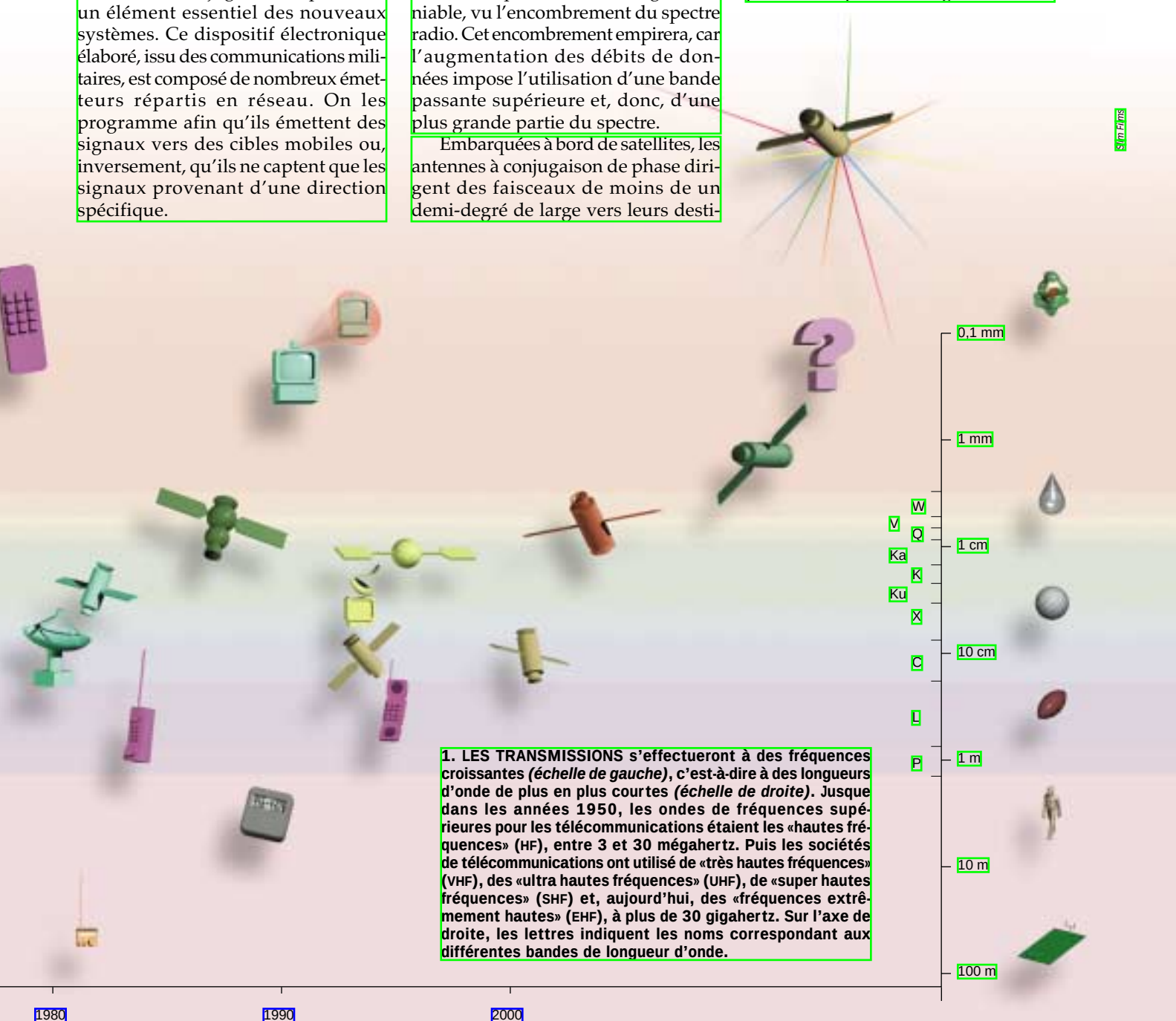
L'antenne à conjugaison de phase est un élément essentiel des nouveaux systèmes. Ce dispositif électronique élaboré, issu des communications militaires, est composé de nombreux émetteurs répartis en réseau. On les programme afin qu'ils émettent des signaux vers des cibles mobiles ou, inversement, qu'ils ne captent que les signaux provenant d'une direction spécifique.

Dans leur principe, ces antennes fonctionnent comme des fentes dans un écran éclairé par une lampe : derrière l'écran, dans des directions spécifiques, les interférences conduisent à des extinctions, ou à des éclaircissements. Pour changer la direction d'émission, les antennes à conjugaison de phase ajoutent électroniquement de courts retards aux signaux qui sont émis par les différents éléments de l'antenne (pour changer la direction de réception, elles ajoutent ces retards aux signaux reçus). Ainsi, en utilisant le phénomène d'interférence, on limite les interférences destructrices entre ondes émises par des sources différentes, ce qui est un avantage indéniable, vu l'encombrement du spectre radio. Cet encombrement empirera, car l'augmentation des débits de données impose l'utilisation d'une bande passante supérieure et, donc, d'une plus grande partie du spectre.

Embarquées à bord de satellites, les antennes à conjugaison de phase dirigent des faisceaux de moins d'un demi-degré de large vers leurs desti-

nataires. Mieux encore, elles s'adaptent aux circonstances : commandées par des superordinateurs embarqués gros comme une boîte à chaussures, elles pourront être continuellement reprogrammées. Cette flexibilité est apparue, il y a une dizaine d'années, avec des antennes paraboliques modifiées, et les ingénieurs l'utilisent chaque jour davantage. Dans les satellites du XXI^e siècle, de multiples faisceaux utiliseront simultanément la même bande spectrale. Déjà, cette «réutilisation» est d'un facteur 100 sur certains satellites et, à terme, elle pourrait atteindre un facteur 1 000.

Les antennes à conjugaison de phase s'imposeront également au



sol, car elles peuvent diriger leurs faisceaux vers un satellite qui se déplace sur une orbite connue. Comme elles peuvent avoir des formes diverses, on les adaptera facilement aux avions ou aux voitures. Dans les cinq prochaines années, même des téléphones portables seront équipés de telles antennes miniatures.

Les concurrents du sol

Dans les pays industrialisés, le principal concurrent des réseaux de satellites sera la fibre optique. En théorie, un satellite transmet les données à un débit inférieur à celui d'un câble de fibres optiques, mais, en pratique, les fibres optiques n'arrivent pas jusqu'au domicile de l'abonné : celui-ci en est séparé par une paire de fils de cuivre ou par un câble coaxial. Ainsi, sur la fin du parcours, les données transitent à des débits inférieurs.

Pour résoudre ce «problème du dernier kilomètre», les ingénieurs ont réussi, en modifiant les installations dans les centraux téléphoniques, à augmenter le débit véhiculé par les câbles coaxiaux et par les paires de fils de quelques dizaines de milliers de bits par seconde à plusieurs millions de bits par seconde. Cette technique, nommée xDSL, est prometteuse, mais elle reste onéreuse, de sorte qu'elle ne satisfera probablement pas tous les besoins pour la transmission des données à hauts débits (les services «large bande»).

Le potentiel des systèmes de transmission de données fondés sur les satellites n'a pas toujours été bien compris. En 1993, Nicholas Negroponte, l'une des personnalités du multimédia, à l'Institut de technologie du Massachusetts, a supposé que la prééminence du satellite ne durerait qu'un temps : après une phase d'engouement pour la transmission par radio, les coûts élevés de ces transmissions et l'encombrement du spectre radio forceraient les sociétés de télécommunications, les services téléphoniques à bande étroite et les services de radiomessagerie à réutiliser les fibres optiques et les câbles coaxiaux.

Je crois que N. Negroponte se trompe. Les sociétés de télécommunications utiliseront à la fois les fibres optiques, les câbles coaxiaux, les réseaux radio terrestres et les satellites pour transmettre la voix, des données multimédias à large bande, des images et des sons. Les fibres optiques, les satel-

lites, ainsi que les réseaux sans fil terrestres auront chacun leur importance dans le système global. Le point technique crucial sera la mise au point de protocoles d'interconnexion entre ces systèmes.

Dans cette hypothèse, les ingénieurs devront élaborer des interfaces entre les réseaux à large bande par des satellites interconnectés et des réseaux de fibres optiques et de câbles coaxiaux. De ce fait, la prochaine génération de satellites de télécommunications devra être 1 000 fois plus rapide que celle des années 1990. La communauté des télécommunications aura alors besoin de protocoles de conversions de données et de standards pour les «systèmes ouverts», des spécifications que les constructeurs utiliseront pour construire de nouveaux équipements compatibles.

Les avancées en matière de satellites crédibilisent mon analyse. Ces cinq dernières années, le nombre de services radio a fortement cru. Aujourd'hui, ils fournissent une communication téléphonique pour moins de 50 centimes par minute. De surcroît, le service de télécommunications dont la croissance est la plus rapide est la télévision par satellite, qui utilise des satellites géostationnaires pour envoyer les signaux à plus de 20 millions d'abonnés dispersés dans le monde entier. Selon les dernières études, ce nombre triplera d'ici à 2005.

L'exploitation d'une ressource limitée

Comment optimiser l'utilisation du spectre radio? Par la compression et le multiplexage. Lors de la numérisation des données, on peut les compresser. Par exemple, les satellites qui diffusent de la télévision numérique utilisent un standard de compression nommé MPEG2. Grâce à cette compression, de la vidéo de haute qualité est transmise sur un canal à seulement six mégabits par seconde. Ainsi le satellite *DirecTV*, dont la bande passante est égale à un gigabit par seconde, transmet 150 canaux de télévision, plus de nombreux canaux de radio numérique. Dans certains réseaux mobiles, on comprime la voix pour les mêmes raisons.

Aux fréquences supérieures, les possibilités de coder le signal augmentent, et on augmente ainsi la bande passante. C'est pourquoi les

fréquences des liaisons radio sont passées de quelques dizaines de mégahertz, au début du siècle, à quelques centaines de gigahertz pour les projets les plus ambitieux. Cependant, le traitement et la transmission d'un grand nombre de données consomment beaucoup d'énergie, ressource rare à bord d'un satellite. Le problème se pose surtout pour les satellites géostationnaires, qui gèrent de nombreux faisceaux et les transmettent sur 36 000 kilomètres.

La gestion de l'énergie est aussi un problème sur les satellites en orbite intermédiaire et en orbite basse, parce que les petites antennes des équipements mobiles ne captent qu'une infime partie du signal émis par le satellite. Afin d'accroître la puissance disponible à bord des satellites, les ingénieurs ont modifié les panneaux solaires, qui délivrent aujourd'hui plus de dix kilowatts (contre deux kilowatts il y a cinq ans). Ces progrès sont dus à une augmentation de la surface des panneaux solaires et à l'emploi de cellules solaires au rendement amélioré : dans les nouvelles cellules, le matériau actif n'est plus le silicium amorphe, mais des combinaisons d'arséniure de gallium et de germanium. Le rendement est de 23 pour cent, soit deux fois celui des cellules au silicium.

D'ici cinq ans, des concentrateurs solaires et des composants multi-jonctions, qui captent l'infrarouge et l'ultraviolet en plus de la lumière visible, amélioreront encore le rendement jusqu'à 30 pour cent. Les panneaux solaires produiront alors plus de 60 kilowatts ; ils seront épaulés par de meilleurs propulseurs à carburant et par des piles à combustible performantes.

Les hauts débits nécessitent de grandes antennes, particulièrement avec les satellites géostationnaires (la puissance nécessaire est proportionnelle au débit). Aujourd'hui, on construit des antennes pour satellite de dix mètres de diamètre, et l'on prévoit des diamètres de 20 à 30 mètres. L'antenne à conjugaison de phase la plus élaborée est destinée au satellite japonais *Gigabits* : pour recevoir les signaux, ce satellite utilisera une antenne d'environ trois mètres de diamètre, constituée de 2 700 antennes indépendantes. Les progrès techniques, en conception comme en fabrication, font envisager des antennes encore plus



XOCC 2011 COMMUNICATIONS 15 mai 2011

2. LES SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS du siècle prochain seront équipés de deux antennes à conjugaison de phase (structures hexagonales de l'image ci-dessus). Elles transmettront et recevront les signaux dans des directions bien définies. Leurs panneaux solaires (*les rectangles allongés*) fourniront l'énergie à l'électronique

embarquée, ainsi qu'aux puissants ordinateurs qui commanderont les antennes et manipuleront les milliers de canaux de voix ou de données. Ce satellite de la constellation ICO est placé sur une orbite intermédiaire, vers 10 000 kilomètres d'altitude. D'autres satellites seront placés sur des orbites basses.

grandes, composées de plusieurs dizaines de milliers d'éléments.

Afin d'être accessibles à un public plus large, les récepteurs devront être moins coûteux qu'aujourd'hui. Une meilleure conception, ainsi que l'adoption de techniques de production en série réduiraient les coûts de fabrication. Certains récepteurs de télévision numérique ont une antenne de seulement 30 centimètres de diamètre, et coûtent moins de 1 500 francs. Dans le futur, des antennes à conjugaison de phase en arséniure de gallium seront moins onéreuses.

Orbite haute ou basse?

La plupart des satellites de télécommunications sont aujourd'hui géostationnaires. Depuis la création d'*Intelsat* (pour *International Telecommunications Satellites organization*, «Organisation internationale pour les satellites de télécommunications»), en 1965, la majorité d'entre eux communique avec des stations fixes au sol. L'organisme *Inmarsat* (pour *International Maritime Satellites organization*, «Organisation internationale pour les satellites maritimes») a lancé, il y a dix ans, la téléphonie avec les mobiles, ainsi que des liaisons numériques pour les navires. En 1997, des sociétés (*American Mobile Satellite Corporation* et *Telesat Mobile*) ont introduit des services similaires pour les mobiles terrestres

d'Amérique du Nord. Ces sociétés ont réduit les coûts de leurs équipements et de leurs services en proposant des antennes plus grandes, mais leurs services ne fonctionnent pas très bien en raison d'une panne et d'une faible pénétration du marché.

Devant la difficulté de mise en œuvre de la téléphonie personnelle en utilisant uniquement des satellites géostationnaires, les constructeurs ont étudié les réseaux de satellites placés en orbite basse (altitude inférieure à 2 000 kilomètres) ou intermédiaire (entre 10 000 et 16 000 kilomètres d'altitude).

D'ici un an ou deux, trois réseaux mondiaux de communication seront reliés aux mobiles terrestres : *Iridium*, *ICO* et *Globalstar*. Ils proposeront des services de téléphonie et de radiomessagerie globaux ; *Iridium* sera le premier en service.

Les services à large bande, tels ceux qui offriront des applications multimédias interactives, ne seront accessibles par des systèmes de bureau que si les réseaux de satellites émettent à des fréquences supérieures à 20 gigahertz. Les antennes à conjugaison de phase autoriseront un important facteur de réutilisation des fréquences, mais même ainsi, ces systèmes utiliseront une grande partie du spectre. Une dizaine de réseaux pour la transmission des données sont projetés, dont *Teledesic* ou *Celestri* (voir *Les réseaux de satellites*, page 48).

3. LES SATELLITES placés en orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres au-dessus du sol, relieront des usagers mobiles séparés de plusieurs milliers de kilomètres, mais les délais dus à la durée du trajet aller et retour seront de l'ordre du quart de seconde.

Techniques de demain

Le coût très élevé des constellations de satellites explique l'intérêt croissant pour les plates-formes de haute altitude, avions ou ballons. Le coût de lancement de ces engins est modeste, et ils peuvent redescendre pour leur entretien. Ces plates-formes peuvent embarquer des antennes à conjugaison de phase de 3 500 faisceaux, qui assurent non seulement les communications montantes et descendantes avec les mobiles, mais émettent aussi des signaux de télévision sur 2 500 kilomètres carrés. Ces systèmes réutiliseront 100 fois les fréquences et seront reliés aux satellites pour effectuer des connexions mondiales.

Quatre types de plates-formes sont envisageables : les ballons gonflés à l'hé-

4. DES SATELLITES EN ORBITE BASSE, à quelques centaines de kilomètres d'altitude, établiront des liaisons rapides entre des usagers séparés par des distances analogues. Pour couvrir toute la Terre, un grand nombre de tels satellites est nécessaire.

5. DANS LES ANNÉES A VENIR, des plates-formes évoluant à plus de 20 000 mètres d'altitude relieront des usagers distants de 500 kilomètres. Certaines seront des dirigeables, d'autres seront munies d'ailes et voleront comme des avions.



lium, dirigés par des robots et stabilisés par des moteurs à propulsion ionique ; les plates-formes alimentées par l'énergie solaire ou par des piles à combustible ; les plates-formes à hélice et les plates-formes à moteurs à réaction. Toutes ces approches ont des limitations différentes : les plates-formes solaires ou à pile à combustible ne seront possibles que si les rendements de la conversion d'énergie augmentent ; celles qui utilisent un carburant ne resteront en l'air que quelques jours, avant de descendre se réapprovisionner.

Pourrait-on envisager l'utilisation de fréquences si élevées que la quantité de données transportées satisfasse les services à large bande, même sans réutilisation ? Malheureusement, aux fréquences élevées, les ondes électromagnétiques sont atténuées, car les longueurs d'onde sont comparables à la taille des gouttelettes d'eau dans l'atmosphère. Le phénomène est identique à celui qui fait paraître opaques les nuages quand la lumière visible interagit avec les microgouttes qui composent ceux-ci. Des techniques de corrections d'erreur ou une augmentation de la puissance éviteront les effets

de cette atténuation ; de même, on éviterait l'atténuation en utilisant plusieurs stations au sol, de sorte que les données suivent plusieurs chemins, mais toutes ces mesures ont un coût.

Avec des longueurs d'onde inférieures au millimètre, les difficultés empirent : les faisceaux infrarouges et visibles sont trop facilement absorbés par l'atmosphère, si bien que, dans le futur, ils seront surtout utilisés à l'intérieur des immeubles. Toutefois, des expériences réalisées avec un satellite japonais, au milieu des années 1990, ont montré la possibilité de communications par faisceaux laser avec des satellites : on transmettrait ainsi à débit élevé, en utilisant plusieurs stations au sol pour minimiser les pertes dues au mauvais temps.

Dans les 20 prochaines années, les systèmes de communications par ondes radio s'imposeront. Les laboratoires privés et publics ont beaucoup à faire pour mettre ces systèmes au point. Les universités, notamment, devront former des ingénieurs capables de résoudre les problèmes nouveaux que poseront les systèmes de télécommunications.

Avec quelques collègues, nous étudions la création d'un institut spécialisé dans le domaine des nouvelles techniques de télécommunications spatiales. Cependant, même si cet institut voit le jour, la rareté de scientifiques et d'ingénieurs compétents handicaperait l'enseignement. Recherchons ensemble des solutions, car les avantages d'une meilleure communication et d'une meilleure éducation sont incalculables pour toutes les nations.

Joseph PELTON enseigne les techniques de télécommunications à l'Université de Boulder (Colorado).

G.D. GORDON et W.L. MORGAN, *Principles of Communications Satellites*, Wiley-Interscience, 1993.

E.W. ASHFORD, *A European Strategy for Future Satellite Communications Systems*, in *Space Communications*, vol. 14, n° 3, pp. 151-154, 1996.

J.N. PELTON, *Overview of Satellite Communications*, in *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 14, Marcel Dekker, 1997.

Joseph N. PELTON et al., *Global Satellite Communications Technology and Systems*, WTEC, Baltimore, à paraître.

6. LES TOURS DU SYSTEME CELLULAIRE (petites structures au sol) couvriront chacune une zone de quelques kilomètres. Certains réseaux de télécommunications combineront les systèmes cellulaires terrestres et satellitaires.

Les réseaux radio terrestres

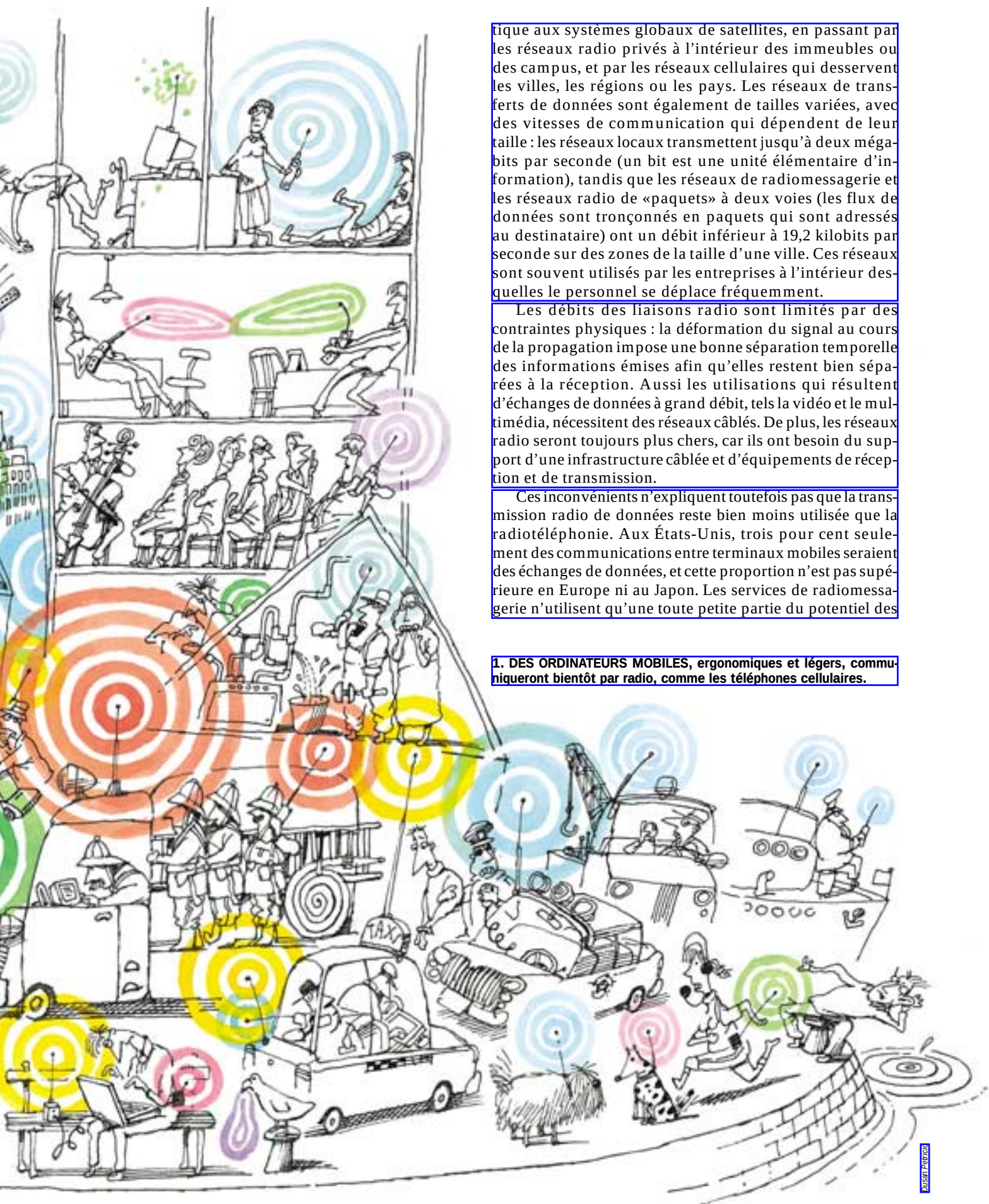
ALEX HILLS

Les réseaux de téléphonie mobile s'étendent. Bientôt, ils permettront aussi aux ordinateurs d'échanger des données.

Rares il y a seulement cinq ans, les téléphones mobiles sont aujourd'hui partout dans les rues, les bureaux, les foyers... Environ sept millions de Français en possèdent un, soit 12 pour cent de la population, et 300 000 en acquièrent chaque mois. Une personne sur 30 est abonnée à un service de radiomessagerie. Dans les pays en développement, encore peu équipés en lignes téléphoniques, la mise en place de systèmes de télécommunications hertziens serait moins coûteuse et plus rapide que la pose de câbles. La demande en moyens de communication transportables, ergonomiques et bon marché semble considérable.

Les réseaux de radiotéléphones se déploient à différentes échelles : du simple téléphone sans fil domes-





tique aux systèmes globaux de satellites, en passant par les réseaux radio privés à l'intérieur des immeubles ou des campus, et par les réseaux cellulaires qui desservent les villes, les régions ou les pays. Les réseaux de transferts de données sont également de tailles variées, avec des vitesses de communication qui dépendent de leur taille : les réseaux locaux transmettent jusqu'à deux mégabits par seconde (un bit est une unité élémentaire d'information), tandis que les réseaux de radiomessagerie et les réseaux radio de «paquets» à deux voies (les flux de données sont tronçonnés en paquets qui sont adressés au destinataire) ont un débit inférieur à 19,2 kilobits par seconde sur des zones de la taille d'une ville. Ces réseaux sont souvent utilisés par les entreprises à l'intérieur desquelles le personnel se déplace fréquemment.

Les débits des liaisons radio sont limités par des contraintes physiques : la déformation du signal au cours de la propagation impose une bonne séparation temporelle des informations émises afin qu'elles restent bien séparées à la réception. Aussi les utilisations qui résultent d'échanges de données à grand débit, tels la vidéo et le multimédia, nécessitent des réseaux câblés. De plus, les réseaux radio seront toujours plus chers, car ils ont besoin du support d'une infrastructure câblée et d'équipements de réception et de transmission.

Ces inconvénients n'expliquent toutefois pas que la transmission radio de données reste bien moins utilisée que la radiotéléphonie. Aux États-Unis, trois pour cent seulement des communications entre terminaux mobiles seraient des échanges de données, et cette proportion n'est pas supérieure en Europe ni au Japon. Les services de radiomessagerie n'utilisent qu'une toute petite partie du potentiel des

1. DES ORDINATEURS MOBILES, ergonomiques et légers, communiqueront bientôt par radio, comme les téléphones cellulaires.

transferts de données par radio. Cette sous-utilisation est due en grande partie à la nouveauté relative des ordinateurs et, encore plus, des communications entre ordinateurs ; le téléphone mobile, lui, diffère peu du téléphone câblé que nous utilisons depuis le début du XX^e siècle, et auquel nous avons eu le temps de nous habituer.

À quelles conditions les transmissions de données par radio se développeront-elles ? Le téléphone mobile ne s'est imposé que lorsque les combinés ont été miniaturisés : trop gros,

les premiers téléphones mobiles, au début des années 1980, n'étaient utilisables que dans des voitures ou dans des camions, et leur usage était essentiellement professionnel. Or, la taille des ordinateurs a beaucoup diminué depuis quelques années : aujourd'hui, certains tiennent dans le creux de la main, et ils sont de plus en plus souvent équipés d'un émetteur-récepteur qui permet l'accès au réseau Internet ou à d'autres réseaux de données similaires au cours de déplacements. Ainsi, un appareil de 435 grammes, qui assure

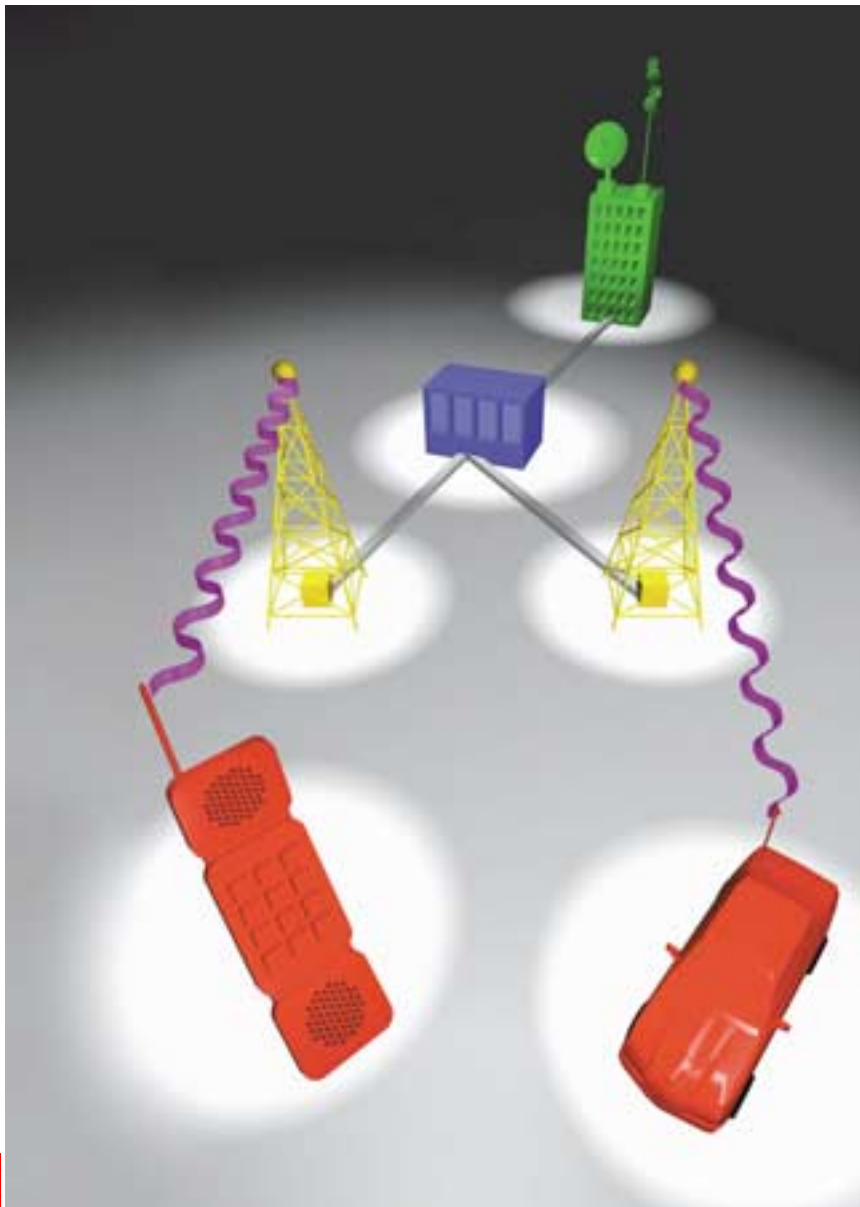
les fonctions de radiotéléphone, de terminal Internet, de télécopieur, de récepteur de radiomessagerie et d'agenda, a été commercialisé en 1996.

Trouver un langage commun

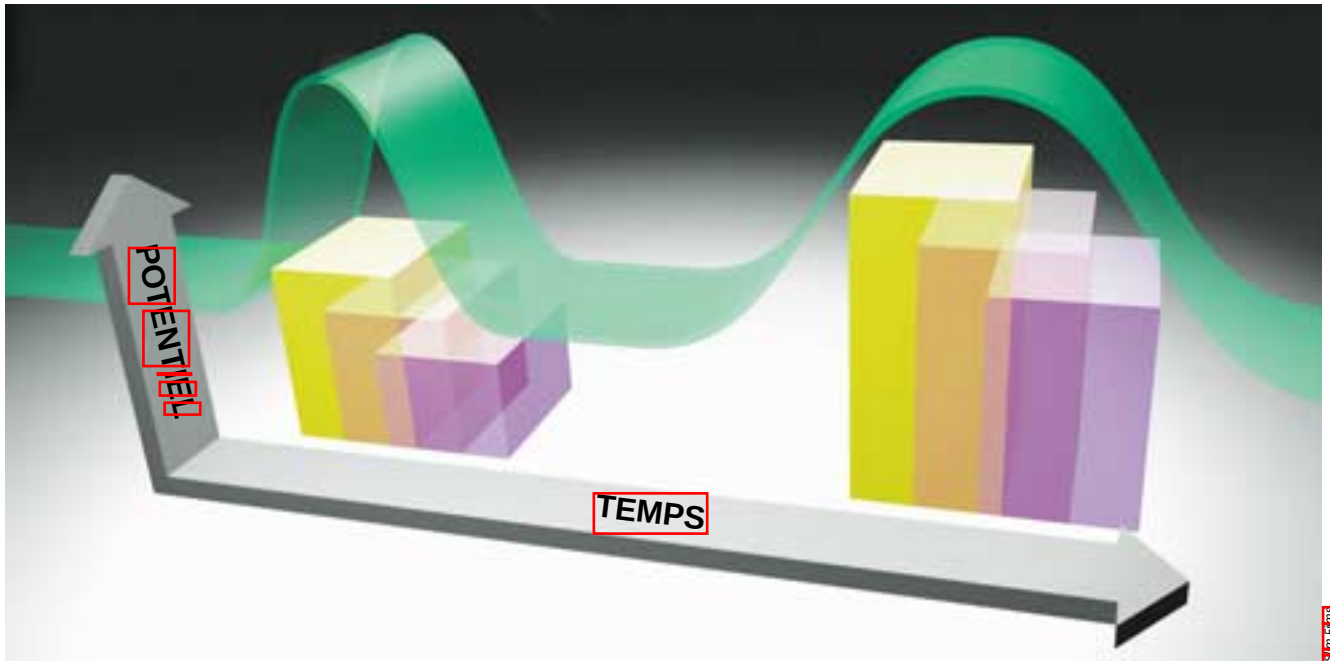
L'absence de normes de communication entre les ordinateurs portables et les réseaux de communications limite aussi le développement des transferts de données par radio. Aujourd'hui, les usagers ont le choix entre de nombreuses possibilités, dont aucune ne satisfait tous leurs besoins. Un réseau local qui couvre un immeuble ne communique pas de la même façon qu'un réseau qui couvrirait toute une ville, et il existe même plusieurs possibilités pour ce dernier. Toutefois, en juin 1997, l'Institut américain des ingénieurs en électricité et en électronique (IEEE) a adopté une norme pour les réseaux locaux : les constructeurs du monde entier sont ainsi encouragés à fabriquer des équipements compatibles qui communiqueraient avec de nombreux réseaux locaux et pas uniquement avec leurs propres systèmes. La norme admet deux techniques de transmission différentes, mais les usagers pourront se décider pour l'une des deux : c'est à eux que revient en pratique le choix de la norme qui sera effectivement utilisée dans les prochaines années. En Europe, une norme similaire, nommée *Hiperlan*, est étudiée.

Techniquement, la transmission radio de données est au point : nous la testons à l'Université Carnegie Mellon, avec un prototype de réseau local, qui couvre la moitié du campus et qui est relié à un réseau commercial, plus lent, qui s'étend sur la zone urbaine de Pittsburgh. Les utilisateurs se déplacent avec leur ordinateur portable et l'utilisent exactement comme un ordinateur de bureau.

La principale tâche des concepteurs de réseaux radio est la réduction des interférences provoquées par le bruit radio et par les réflexions multiples du signal. Les signaux radio réfléchis par les immeubles, les voitures ou le sol provoquent un phénomène nommé « affaiblissement par trajets multiples » : selon la longueur des différents chemins parcourus, le signal dévié arrive à l'émetteur plus ou moins longtemps après le signal principal, et donc déforme plus ou moins celui-ci (voir la figure 3). L'importance de ce phénomène dépend de



2. LES RESEAUX CELLULAIRES relient par radio des utilisateurs (*en rouge*) à des stations de base (*en jaune*). Chaque station est au centre d'une cellule de quelques kilomètres carrés et utilise des fréquences différentes de celles des stations voisines pour éviter les interférences. Elle est connectée par des câbles à fibres optiques à un central de commutation téléphonique pour mobiles (*en bleu*), qui trouve les destinataires et maintient actives les connexions (*en violet*). Ce central est lui-même relié à un commutateur du réseau téléphonique public (*en vert*), qui achemine les appels n'importe où dans le monde en utilisant des satellites, des câbles ou des micro-ondes.



3. UN SIGNAL RADIO EST DÉFORMÉ lorsqu'il parcourt plusieurs trajets différents entre l'émetteur et le récepteur : les bits de données qui arrivent au récepteur sont retardés (*cubes violets et orange*) par des réflexions sur des immeubles, sur des voitures

ou sur le sol, parce que leur trajet est un peu plus long que celui des bits qui arrivent directement (*cubes jaunes*). Le signal déformé, qui résulte de l'addition de tous les bits, peut être mal interprété par le récepteur.

la fréquence et varie lorsque le récepteur se déplace : il est connu des automobilistes, qui entendent le son de leur autoradio s'affaiblir par endroits ou qui captent moins bien les stations dans les tunnels. Toutefois, cet affaiblissement, qui se corrige facilement dans les récepteurs radio reliés à une antenne et alimentés par la batterie d'une voiture, devient très gênant quand chaque donnée échangée détermine la cohérence de la transmission et quand la puissance des signaux émis est inférieure à un demi-watt (une puissance d'émission supérieure réduirait trop l'autonomie des ordinateurs).

Dans les téléphones portables, on réduit les erreurs de transmission en numérisant la voix avant de la transmettre : 8 000 fois par seconde, l'amplitude du signal est mesurée, et sa valeur est codée par une suite de huit bits qui prennent la valeur zéro ou un (*voir la figure 4*). Puis, souvent, l'électronique comprime la séquence obtenue, 64 000 bits par seconde, afin de réduire le nombre de bits qui doivent être envoyés. Le récepteur décode la séquence de bits pour reconstituer le signal original. Comme un bit ne prend que deux

valeurs, la numérisation réduit la probabilité d'une erreur.

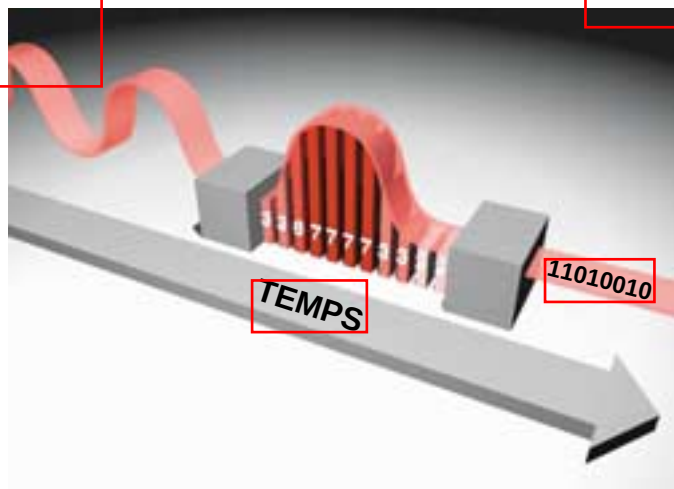
Des bits de correction d'erreur

Toutefois, les trajets multiples étalent dans le temps l'arrivée des bits, ce qui déforme le signal et limite la vitesse de transmission. On ajoute donc des bits de correction d'erreur dont les valeurs dépendent de celles des bits du signal qu'ils accompagnent. Le récepteur éva-

lue ces bits spéciaux et, comme il connaît les règles qui les ont engendrés et les erreurs les plus fréquentes, il corrige les désaccords.

Cette technique de correction d'erreur est efficace pour la transmission de la parole : si quelques erreurs subsistent malgré tout, le système auditif de celui qui reçoit la communication les corrige inconsciemment. Toutefois, pour la transmission de données, la moindre erreur peut se révéler catastrophique, parce que l'ordinateur qui reçoit le signal ne peut pas savoir que celui-ci a été déformé.

Une autre technique utilisée dans les réseaux locaux (souvent en association avec les bits de correction d'erreur) pour combattre le bruit et les conséquences des trajets multiples est l'étalement de spectre : le signal est transmis simultanément sur un grand nombre de fréquences radio. Comme l'affaiblissement et les déformations dus aux trajets multiples dépendent de la fréquence, le message passe sans déformation, au moins sur quelques fréquences. De même, une personne ayant un déficit auditif détecte plus facilement le mot «alléluia» en écoutant le *Messie* de Haendel, où ce mot



4. LA VOIX EST CODÉE sous forme numérique par les systèmes modernes de télécommunications. Le signal analogique (*ruban rose à gauche*) est mesuré des milliers de fois par seconde, et le résultat est exprimé par un nombre (*barres verticales du centre*). Ces nombres sont ensuite convertis en groupes de huit bits (ou chiffres binaires 0 ou 1) qui sont transmis (*ruban rose à droite*).

est émis à plusieurs fréquences différentes, allant du soprano à la basse, que si une seule personne le prononce.

Le «saut de fréquence» est un raffinement de l'étalement du spectre : l'émetteur change de fréquence toutes les quelques millisecondes. Le récepteur connaît la séquence de changement et la suit. Même si quelques paquets de données ne passent pas, les autres sont reçus. Lors des transmissions de données, le récepteur peut alors demander que les données erronées soient transmises à nouveau.

La séquence directe est une autre technique d'étalement de spectre, où chaque bit est converti en une séquence de bits, connue à la fois de l'émetteur et du récepteur (voir *L'occupation du spectre radio*, par David Hughes et Dewayne Hendricks, page 72). Le bit 1 peut être converti en 000100110101111 et le bit 0 en 111011001010000, séquence inverse, facilement discernable de la première. Cette opération crée plus de bits par seconde qu'il n'y en avait au départ : on doit alors transmettre le signal sur un plus grand nombre

de fréquences. Les interférences et l'affaiblissement dus aux les trajets multiples sont ainsi éliminés, et le récepteur peut reconstruire les données initiales avec une grande sûreté.

Le partage des fréquences

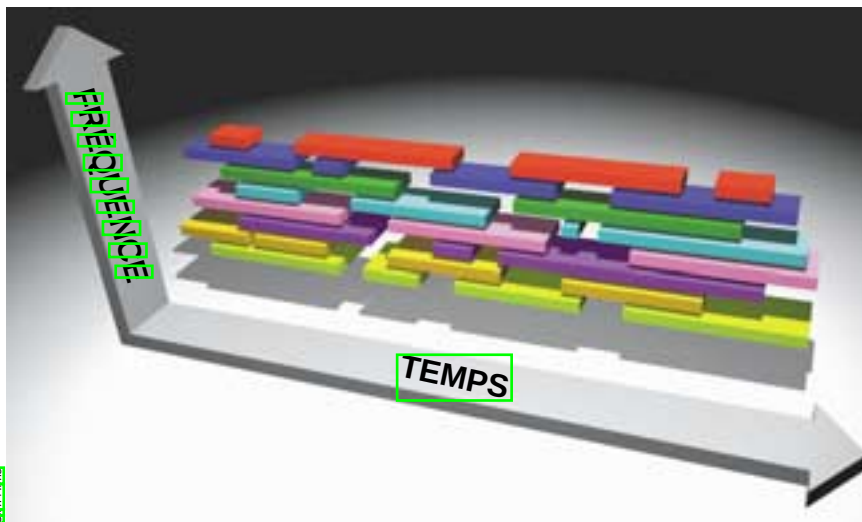
L'autre grande difficulté dans la mise au point de réseaux par radio est la répartition du petit nombre de fréquences radio disponibles entre le maximum d'utilisateurs. Beaucoup de ces réseaux reposent sur le principe de la réutilisation des fréquences : les canaux radio disponibles sont répartis en sous-ensembles, dont un seul est utilisé sur une zone géographique donnée (la cellule), et l'on n'attribue le même sous-ensemble de fréquences qu'à des cellules éloignées.

Les cellules, dont la taille est définie par l'espacement de stations de base fixes, ont généralement deux kilomètres de diamètre dans les zones urbaines, plus dans les campagnes. Dans les zones très denses, la capacité des réseaux cellulaires est augmentée par l'utilisation de microcellules, de 500 mètres de rayon environ.

Les stations de base utilisent diverses méthodes pour séparer les signaux provenant de différents émetteurs. La plus simple et la plus utilisée est celle de l'accès multiple par répartition de fréquence : une fréquence particulière est attribuée à chaque appareil mobile (voir la figure 5). La station de base sait quel mobile utilise quelle fréquence et trie les signaux exactement comme nous choisissons notre station de radio préférée en tournant le bouton du transistor jusqu'à la bonne position.

La numérisation des communications permet le partage d'une même fréquence entre plusieurs utilisateurs. Dans l'accès multiple par répartition du temps, chaque appareil mobile émet ou reçoit dans des tranches de temps d'une milliseconde (voir la figure 6). La station de base sait quel appareil émet dans chaque tranche de temps et il reconstitue le message à partir des morceaux ainsi envoyés.

L'accès multiple par répartition de code est un procédé concurrent. Son principe ressemble à celui de l'étalement du spectre par séquence directe, mais la séquence qui remplace chaque bit est plus longue : plus de 100 bits au lieu d'une dizaine. Chaque appareil mobile possède son codage propre, ce qui permet à plusieurs utilisateurs



5. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DE FRÉQUENCE est la méthode la plus simple pour que plusieurs utilisateurs (couleurs) communiquent simultanément par radio dans une même zone géographique : une fréquence particulière est attribuée à chacun. En écoutant toutes les fréquences utilisées (en ordonnée), le récepteur sépare les différentes sources, comme un auditeur sélectionne une station de radio en tournant le bouton d'accord de son poste. On a représenté ici des signaux intermittents, car les canaux ne sont pas utilisés en permanence.



6. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DU TEMPS est une autre technique de partage du spectre radio. Chaque utilisateur (couleurs) émet ou reçoit pendant une fraction de milliseconde (barres verticales). Les données numériques provenant de chaque émetteur sont comprimées et envoyées simultanément sur plusieurs fréquences pendant cet intervalle de temps. Le récepteur sait précisément quand les signaux sont émis ou reçus, et il peut donc les séparer.

de transmettre en même temps sur la même plage de fréquences (voir la figure 7). La station de base teste le flux de données arrivant sur cette plage de fréquences et détermine les corrélations dans les séquences de chaque mobile afin de retrouver quels bits sont envoyés par chacun. Beaucoup de fournisseurs de télécommunications hertziennes utilisent l'accès multiple par répartition de code, souvent en association avec l'accès multiple par répartition de fréquence : la coexistence des deux systèmes, sur des appareils mobiles polyvalents, facilite le transfert vers les nouvelles bandes de fréquence et les nouvelles techniques d'accès multiple.

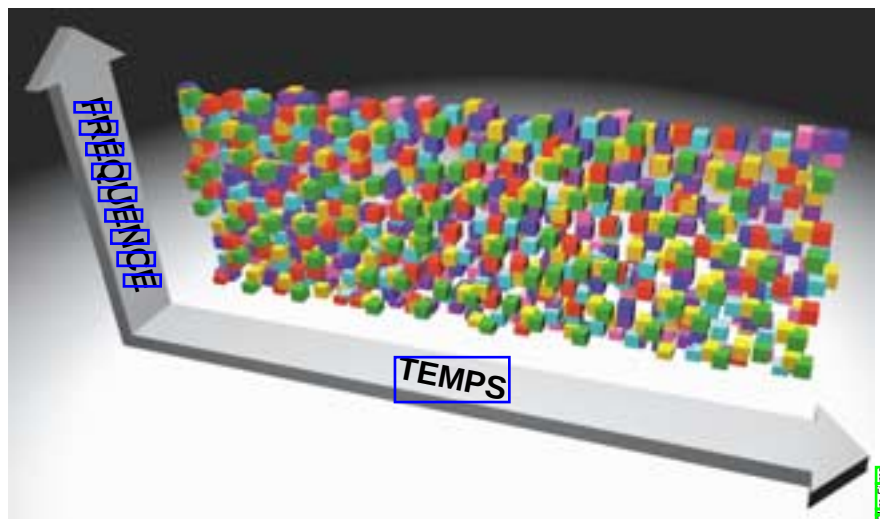
Des réseaux compatibles

La transmission de données par radio sera favorisée par l'interopérabilité des réseaux : l'utilisateur ne se rend pas compte que ses communications passent d'un réseau à un autre et n'a pas besoin de connaître les spécificités de chacun. Nous testons aujourd'hui une telle interopérabilité à l'Université Carnegie Mellon : un réseau hertzien local est relié à un réseau cellulaire qui s'étend sur Pittsburgh, la ville voisine. À notre connaissance, le réseau local est le plus grand qui ait jamais été construit : il compte aujourd'hui 100 stations de base et transporte des données à deux mégabits par seconde sur la moitié du campus. Le réseau cellulaire ne fonctionne qu'à 19,2 kilobits par seconde.

Les usagers accèdent au réseau Internet ou à d'autres réseaux, à l'aide d'ordinateurs ou d'autres machines portables, tout en se déplaçant : les connexions radio sont gérées automatiquement par les ordinateurs. Les utilisations les plus fréquentes sont les accès au courrier électronique et au réseau Internet. L'ordinateur mobile devient aussi fonctionnel que l'ordinateur de bureau, mais plus pratique.

Quelles difficultés avons-nous rencontrées? Lorsqu'un usager se déplace, l'ordinateur doit maintenir la meilleure connexion possible : la communication est parfois passée d'un réseau à l'autre. Nous avons écrit un programme qui rend ce passage imperceptible à l'utilisateur.

Par ailleurs, beaucoup d'ordinateurs fonctionnent suivant le principe client-serveur : le terminal de l'utilisateur va chercher les données conte-



7. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DE CODE permet à plusieurs utilisateurs (coupleurs) de partager efficacement le spectre des fréquences radio : le signal provenant de chaque utilisateur est codé et étalé sur tout le spectre radio (verticalement). Cet étalement permet à chaque signal de ne pas se superposer aux autres. Le récepteur débrouille les signaux individuels grâce à leurs codes uniques.

nues dans un ordinateur central. Le débit de la transmission par radio est plus faible que celui des réseaux câblés et plus d'erreurs y apparaissent. Nous avons donc adapté la structure des fichiers ainsi distribués pour rendre les communications plus fiables.

Nous construisons aussi des ordinateurs mobiles, ainsi que des ordinateurs que les utilisateurs portent sur eux comme des vêtements, et qui les assistent dans leurs déplacements ou dans leurs activités professionnelles. Ces ordinateurs portables sont équipés pour la radio, et nous espérons qu'un jour ils seront intégrés dans des réseaux interopérables.

Notre expérience n'est qu'un premier pas vers la mobilité des ordinateurs. Nous étendrons notre prototype à la totalité du campus en 1999 ; puis nous relierons notre réseau à des réseaux analogues, bientôt installés ailleurs, puis aux réseaux par satellites et aux réseaux cellulaires. Ensemble, ils formeront un réseau de transmissions international.

Toutes ces innovations étendent le potentiel des communications. Dans les pays industrialisés, la fiabilité du service téléphonique est primordiale. La téléphonie mobile l'assure avec peu d'installations lourdes et des équipes techniques réduites. Une ligne pour un système microcellulaire dans une zone urbaine dense coûte entre 1 000 et 3 500 francs, soit moins de la moitié de la pose d'une ligne d'un réseau câblé. Une fois installés, les systèmes hertziens

sont facilement adaptables pour des transmissions de données si le besoin s'en fait sentir.

Pour les pays en développement, nos études montrent que les constructeurs auront besoin de beaucoup plus de fréquences disponibles pour exploiter totalement le potentiel des systèmes hertziens. Nous avons aussi conclu que, étant donné les bénéfices que les services téléphoniques hertziens pourraient apporter, les gouvernements devraient mettre beaucoup plus de fréquences radio à leur disposition.

Alex HILLS est professeur de politique des télécommunications à l'Université Carnegie Mellon.

Mobile Computing at Carnegie Mellon, numéro spécial de *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n° 1, février 1996.

Alex HILLS et Hung-Yao YEH, *Using Wireless Technology to Provide Basic Telephone Service in the Developing World*, in *Telecommunications Policy*, vol. 20, n° 6, pp. 443-454, juillet 1996.

Ingrid J. WICKELGREN, *Local-Area Networks Go Wireless*, in *IEEE Spectrum*, vol. 33, n° 9, pp. 34-40, septembre 1996.

Alex HILLS et Richard HOVEY, *A Wireless Infrastructure to Support Research Activities*, in *Wireless Personal Communications : The Evolution of Personal Communications Systems*, sous la direction de T.S. Rappaport et al., Kluwer Academic Publishers, 1996.

Les applications des réseaux cellulaires

WARREN STUTZMAN • CARL DIETRICH

La téléphonie a bénéficié de la technique cellulaire, mais bien d'autres applications de cette technique apparaîtront prochainement.

Dans les prochaines décennies, le réseau mondial de communications radio, par relais terrestres ou spatiaux, se développera pour satisfaire la demande croissante de communications rapides et mobiles. Initialement créé pour la transmission d'échanges vocaux, le réseau permet une foule d'usages nouveaux : localisation de personnes ou de biens, télé-surveillance, télécommande... Encore récemment, les systèmes radio semblaient réservés aux navigateurs professionnels, aux géomètres ou à quelques services techniques, mais les équipements sont devenus si bon marché et si petits qu'ils s'imposent dans la vie quotidienne.

La localisation

Pendant longtemps, les seules aides à la navigation ont été les étoiles, le sextant, le compas, la sonde, les cartes ou les gyroscopes. Puis les émetteurs radio terrestres du réseau LORAN (*Long Range Navigation*) ont permis aux marins et aux aviateurs de déterminer précisément leur position, mais ces systèmes ne couvraient pas l'ensemble du Globe et ils n'indiquaient pas l'altitude des récepteurs. Grâce aux satellites, on détermine aujourd'hui les trois coordonnées de position avec une étonnante précision.

Le Système de positionnement global (GPS) est sans doute le plus connu : 24 satellites en orbite autour de la Terre, à une altitude de plus de 20 000 kilomètres sur six plans orbitaux (voir *Pour La Science*, avril 1996), émettent en permanence des signaux qui peuvent être captés de n'importe quel point du

Globe. En mesurant le temps de propagation des signaux émis par au moins quatre satellites, les récepteurs GPS calculent la position à 18 mètres près, voire seulement à un mètre près quand ils reçoivent également les signaux d'un émetteur terrestre du voisinage.

Lors de la guerre du Golfe, les troupes qui combattaient l'Irak trouvèrent leur chemin dans le désert à l'aide du GPS. Depuis, le système est largement utilisé par les navigateurs, les géomètres ou les aviateurs. Les possibilités sont nombreuses : des automobiles équipées de récepteurs GPS, par exemple, calculent des itinéraires qui évitent les embouteillages, et des sociétés proposent aujourd'hui aux particuliers des récepteurs portables qui coûtent moins de 500 francs. Donnant une information de position dans les trois dimensions de l'espace, le système GPS permet également aux avions de voler plus directement vers leur destination sans être gênés par l'encombrement des couloirs aériens, et d'atterrir sans visibilité.

La Russie possède un système analogue au GPS : le GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), fondé sur une flotte de 24 satellites. Le dernier satellite de ce réseau a été envoyé en 1995, mais certains sont tombés en panne depuis. Avant la fin de l'année 1998, neuf satellites supplémentaires devraient augmenter la précision du réseau russe.

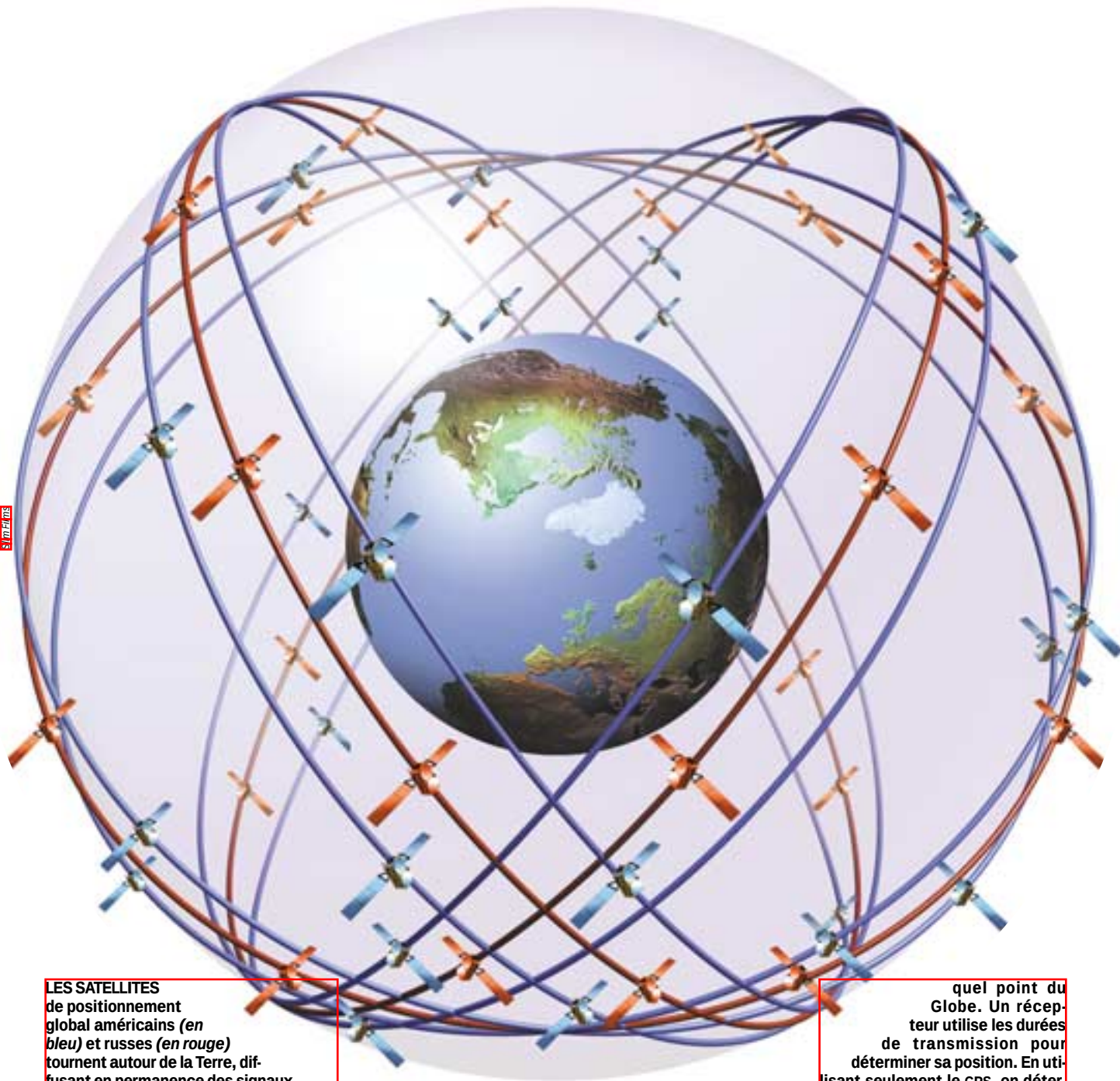
Lorsque le GLONASS sera complètement opérationnel, les récepteurs capables de recevoir à la fois ses signaux et ceux du GPS auront une précision considérablement améliorée, surtout dans les zones urbaines, où les bâtiments perturbent les réceptions.

Le système européen ENSS (*European Navigation Satellite System*), avec ses 15 satellites qui couvriront l'Europe et l'Afrique, devrait augmenter encore la précision des localisations dans ces zones. Quelques sociétés proposent des localisations par satellites ou à partir de balises terrestres, mais aucun n'est aussi précis que celui composé du GPS, du GLONASS et de l'ENSS.

Double sens

Malgré leurs performances, les dispositifs actuels de localisation ont un inconvénient majeur : ce ne sont que des émetteurs. Les personnes utilisant un récepteur GPS savent où elles sont, mais elles ne peuvent le faire savoir à d'autres. Un service de recherche de biens ou de personnes par satellites utilise le même principe que le GPS, mais à l'envers : c'est l'émetteur, au sol, qui envoie un signal, de sorte que les satellites enregistrent le temps mis par le signal pour leur parvenir ; un centre de calcul qui reçoit les informations des satellites détermine alors la position de l'émetteur. Des sociétés de transport utilisent aujourd'hui ce service pour surveiller les flottes de camions et déterminer la position des véhicules à moins de 300 mètres près.

Bientôt, les deux services seront réunis : les utilisateurs auront un dispositif de réception de signaux de requêtes émis par un satellite placé en orbite basse ; ils renverront un signal, via le satellite, à une station terrestre qui déterminera leur position. Par ce moyen, on localisera de jeunes enfants ou des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer.



LES SATELLITES
de positionnement
global américains (en
bleu) et russes (en rouge)
tourment autour de la Terre, dif-
fusant en permanence des signaux
qui peuvent être reçus en n'importe

quel point du
Globe. Un récep-
teur utilise les durées
de transmission pour
déterminer sa position. En uti-
lisant seulement le GPS, on déter-
mine la position à 18 mètres près.

Les réseaux hertziens terrestres per-
mettent également des télécom-
mandes : des sociétés proposent des
systèmes qui utilisent les réseaux cel-
lulaires pour commander des équi-
pements et récupérer des signaux de
mesure, par exemple. Ce type de sys-
tèmes facilite notamment le travail des
sociétés qui gèrent des distributeurs
automatiques, parce qu'un poste cen-
tral peut détecter les pannes et prévoir
les remplissages. Bien d'autres appli-
cations sont envisageables. Des com-
pagnies pétrolières testent aujourd'hui
des systèmes cellulaires pour contrô-
ler les conduites de gaz et de pétrole

situées dans des contrées éloignées.
L'administration du parc Monument
Valley, dans la Vallée de la mort, aux
États-Unis, utilise un réseau de com-
munications par satellites pour con-
naître le niveau d'eau dans le Trou
du Diable, qui reste le seul endroit où
vit le poisson du désert, en voie de dis-
parition. Enfin les systèmes d'alarme
permettent de lutter contre le vol et de
secourir les particuliers : certains ser-
vices d'urgence répondent aux appels
téléphoniques et envoient les secours
où ils sont nécessaires, même quand
les personnes en détresse sont inca-
pables de préciser où elles se trouvent.

Warren STUTZMAN et Carl DIETRICH
travaillent au Centre de télécommu-
nications de l'Institut Polytechnique
de Virginie.

Walter F. BLANCHARD, *Introduction
to Satellite Navigation*, in *International
Journal of Satellite Communications*,
vol. 12, n° 5, pp. 421-426, septembre-
octobre 1994.

J.H. REED, K.J. KRIZMAN, B.D. WOER-
NER et T.S. RAPPAPORT, *An Overview
of the Challenges and Progress in Mee-
ting the E-911 Requirement for Location
Service*, in *IEEE Communications*, à
paraître.

L'occupation du spectre radio

DAVID HUGHES • DEWAYNE HENDRICKS

Le regroupement d'informations en paquets numériques et leur transmission à plusieurs fréquences permet à des millions de personnes d'émettre et de recevoir en même temps.

Le bon sens tient pour acquis que l'espace radio est une ressource précieuse et limitée, qui doit être rationnée comme l'eau dans le désert. L'idée date des premières études de la transmission et de la réception, où l'on utilisait des bandes étroites du spectre électromagnétique afin de minimiser les interférences. Les gouvernements ont partagé et réglementé les canaux radio comme s'ils étaient des biens immobiliers. Certains pays ont été jusqu'à vendre aux enchères

des bandes de fréquences aux chaînes de télévision ou de radio, aux compagnies de taxis, aux compagnies aériennes, maritimes ou téléphoniques.

Toutefois les récents progrès des télécommunications numériques ont ouvert la porte d'un monde nouveau : les transmissions peuvent aujourd'hui utiliser des techniques d'étalement de spectre pour partager des canaux sans difficulté. L'information est codée par de petits paquets électroniques de 0 et de 1, et transmise par ondes

radio de façon que chaque paquet de faible puissance soit à une fréquence particulière. Des études récentes montrent que des millions d'utilisateurs peuvent théoriquement émettre à l'intérieur d'une même zone urbaine, en utilisant la même bande de fréquence, tout en envoyant des centaines de mégabits de données par seconde.

Les télécommunications devront s'habituer à ce nouveau partage du spectre. Naguère, tout en allouant des bandes de fréquences étroites pour

Les inventeurs inattendus du saut de fréquence

En 1941, l'actrice Hedy Lamarr et le musicien George Antheil déposent le brevet d'un «système de communications secrètes» destiné à aider l'armée américaine à guider les torpilles par radio : les signaux doivent être divisés en paquets émis à des fréquences différentes, choisies au hasard, afin que l'ennemi ne puisse les intercepter et les brouiller.

Née à Vienne, Hedwig Maria Eva Kiesler épousa d'abord Fritz Mandl, un fabricant d'armes qui travaillait pour Hitler ; le mariage avait été arrangé par les parents. Fier de sa femme,

Mandl l'emmenait à ses dîners d'affaires et à ses réunions, de sorte qu'elle fut bientôt au courant des techniques militaires allemandes. Après quatre années de mariage, elle quitta son mari pour se rendre à Londres, où le producteur de cinéma Louis Mayer, l'un des partenaires de la Société *Metro Goldwin Mayer*, détecta son talent et la persuada d'aller aux États-Unis.

Antheil, qu'elle rencontra à Hollywood, chercha avec elle un moyen de synchroniser les sauts de fréquence entre l'émetteur radio et le récepteur. Dans leur invention, qu'ils donnèrent au gouvernement américain, ils utilisaient deux rouleaux de papier analogues à ceux des pianos mécaniques, mais percés de trous conformément à une même séquence aléatoire. Un des rouleaux contrôlait l'émetteur placé dans le sous-marin, l'autre était embarqué avec le récepteur, dans la torpille.

Bien qu'ingénieux, ce dispositif était trop compliqué pour être utilisé durant la Seconde

Guerre mondiale.

Néanmoins l'idée du saut de fréquence survécut et, vers la fin des années 1950, les fournisseurs de la Marine américaine utilisèrent les premiers ordinateurs pour commander et synchroniser les sauts de fréquence. Depuis, les militaires ont utilisé des ordinateurs plus rapides pour mettre en œuvre un principe fondé sur le saut de fréquence, dans les systèmes de communication par satellite. La technique est également mise en œuvre dans les téléphones cellulaires ou dans les services de communications personnelles.

L'ACTRICE HEDY LAMARR est un des deux auteurs d'un brevet pour une technique largement utilisée dans les téléphones cellulaires et dans les services de communications personnelles.

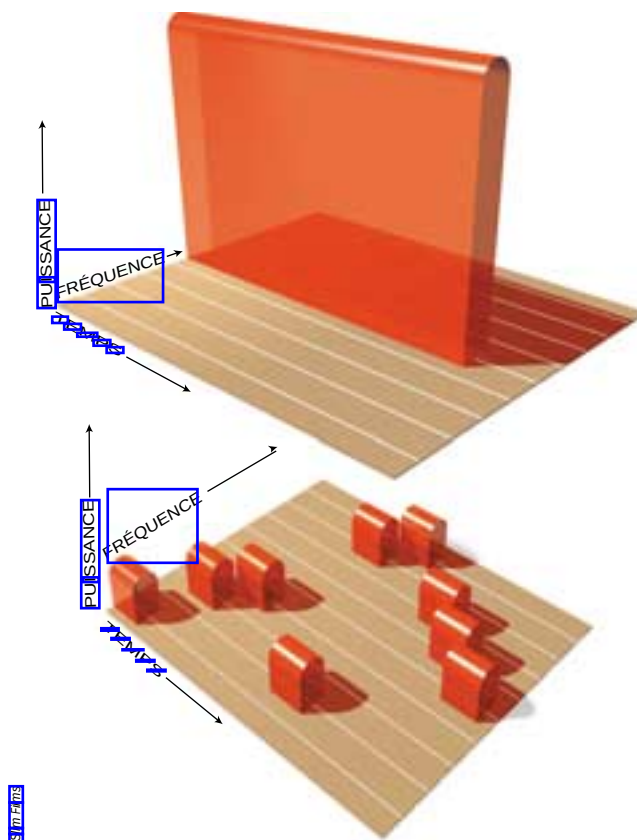


des besoins exclusivement commerciaux, les gouvernements ont donné des autorisations à des sociétés qui fournissaient de la téléphonie cellulaire et des services de communications personnelles. Ces sociétés font payer leurs services aux consommateurs, de la même manière que les compagnies téléphoniques facturent leurs abonnés. Avec le nouveau système, les particuliers n'ont plus besoin d'intermédiaires, et ils peuvent communiquer directement et gratuitement, même lorsqu'ils se trouvent à des kilomètres de distance et que des myriades d'utilisateurs utilisent les mêmes canaux radio. Les gouvernements revoient les réglementations et libèrent certaines bandes de fréquences que le public peut utiliser sans autorisation préalable.

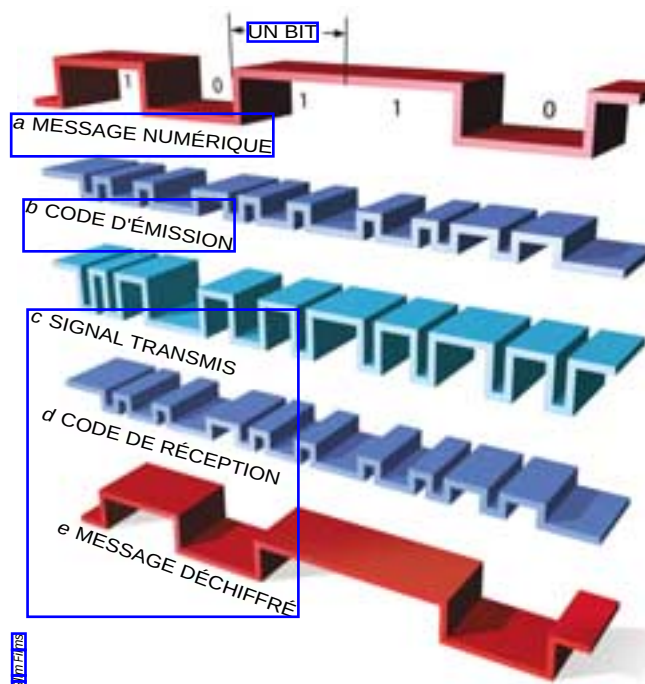
Assez de spectre pour tous

Quel est le fondement de cette révolution technique? Les communications radio classiques sont fondées sur une diffusion de l'information à forte puissance, sur une seule bande étroite : en utilisant une bande aussi mince que possible, un émetteur laisse à d'autres émetteurs la possibilité d'émettre sans interférences, dans les bandes de fréquences voisines. Toutefois les ingénieurs savent qu'il est plus efficace de faire l'inverse, c'est-à-dire de transmettre les données à faible puissance et en étalant l'information sur une bonne partie du spectre.

Le concept n'est pas intuitif : on ne cherche plus à découper un gâteau en un nombre fini de parts, mais à partager le gâteau en un nombre quasi illimité de petits morceaux à peine perceptibles. Si les radios à bande étalée utilisent plus de bande passante que nécessaire, ces procédés évitent les



1. LES SIGNAUX RADIO (en rouge) ont, pendant longtemps, été transmis de façon continue, à forte puissance, dans une bande de fréquence étroite (en haut). Les ingénieurs savent aujourd'hui qu'on utilise plus efficacement le spectre radio si l'on répartit le signal entre différents canaux, à faible puissance. Une des nouvelles techniques utilisées est le saut de fréquence (en bas).



2. LA SÉQUENCE DIRECTE est une autre technique de répartition d'un signal de basse puissance sur le spectre radio. Ici on mélange le message binaire 10110 (a) avec une séquence codée (b). On transmet ensuite le signal résultant (c). Cette redondance augmente la possibilité de réception sans erreur même dans les zones urbaines où l'espace radio est encombré. Les récepteurs utilisent une séquence codée identique à celle de l'émission (d) pour déchiffrer la transmission et récupérer le message original (e).

interférences, parce que les puissances de transmission sont faibles : chaque fréquence ne transmet que des bouffées de données. Mieux encore, le signal émis est si faible qu'il est à peine perceptible au-dessus du bruit ambiant. Cette caractéristique est un atout supplémentaire, parce qu'il évite les écoutes indiscrettes : en pratique, seul le récepteur habilité peut savoir qu'il y a une transmission.

Initialement l'étalement de spectre a intéressé pour sa discrétion : pendant la Seconde Guerre mondiale, les militaires ont cherché à utiliser le curieux dispositif coproduit par Hedy Lamarr, qui devait devenir une vedette du cinéma américain après la guerre (voir l'encadré de la page 72). L'idée était simple : plutôt que de diffuser l'information sur un canal unique que l'ennemi pouvait découvrir, le système breveté proposait de changer de canal en permanence, selon un code secret, connu seulement de l'émetteur et du destinataire. En raison de ces sauts continus de fréquences, un ennemi aurait très difficilement extrait le signal du bruit ambiant. Bien qu'intéressant, le système était toutefois impraticable, à l'époque.

Les progrès de l'électronique ont finalement permis de reprendre l'idée. Les puces à semi-conducteurs modernes peuvent diffuser des paquets de données numériques sur de nombreux canaux d'une manière qui peut sembler aléatoire. Le récepteur, conçu pour écouter ces signaux dans le même ordre, peut rassembler l'information transmise dans les diverses bandes de fréquences et reconstruire le signal. Lorsque des paquets manquent ou sont bruités, le récepteur peut demander à l'émetteur de réémettre ces paquets, tandis que des techniques de correction

d'erreur augmentent les chances que chaque paquet soit correctement décodé la première fois qu'il est reçu.

La technique de la séquence directe est une autre façon de répartir un message sur le spectre radio : l'information à transmettre est mélangée à un signal codé qui ressemble à un bruit pour tout récepteur qui ne dispose pas du code, et chaque bit de donnée est envoyé simultanément sur plusieurs fréquences. Le récepteur est synchronisé par le même code que l'émetteur.

De nouveaux progrès de la micro-électronique ont récemment permis la réalisation de processeurs numériques qui traitent des données à haut débit tout en consommant peu d'énergie. Avec ces nouveaux équipements, on peut étaler les données par les deux techniques simultanément, de sauts de fréquence et de séquence directe. Ces nouvelles méthodes évitent mieux les encombrements du spectre, et les transmissions sont moins perturbées par les bruits ou par les échos (contre les immeubles, le sol et différentes couches atmosphériques).

En 1985, la Commission américaine des communications a décidé de libérer l'usage par le public de bandes de fréquences radio pour des communications à étalement de spectre. La décision restait toutefois assortie de contraintes sévères : les émissions devaient être déclarées à la Commission, s'effectuer dans des bandes réservées aux matériels industriels scientifiques et médicaux, leur puissance devait être inférieure à un watt, et l'étalement devait être limité à quelques canaux.

Malgré ces contraintes, les fabricants ont produit et vendu un nombre considérable d'équipements ; l'effet de masse n'a pas encore pleinement joué, de sorte que les matériels réalisés par environ 60 fabricants ne sont abordables qu'aux entreprises : une ligne radio qui transmet dix mégabits par seconde jusqu'à 40 kilomètres de distance, pour des applications informatiques haut débit, coûte environ 60 000 francs. Des matériels moins performants, qui transmettent 1,5 mégabit par seconde sur 25 kilomètres, coûtent 7 500 francs. À plus courte portée (par exemple, dans un bâtiment), des cartes de réseau local radio pour micro-ordinateurs sont vendues 1 200 francs seulement.

Les prix baisseront beaucoup quand les volumes de production

augmenteront grâce à la demande croissante de connexions large bande et sécurisées des ordinateurs vers le réseau Internet. Bientôt, les usagers utiliseront en permanence les transmissions radio pour communiquer avec un système central qui, lui, sera connecté par câble au réseau classique. Nous prévoyons que les systèmes de communication numériques sans fil, fiables et sécurisés, débitant 1,5 mégabit par seconde ou plus sur des distances atteignant plus de 30 kilomètres, coûteront moins de 2 500 francs.

Quels seront les futurs progrès ? Les émetteurs et les récepteurs devenant totalement numériques, le développement de la transmission radio cellulaire permettra des services variés : nous préparons la mise au point de réseaux composés d'émetteurs-récepteurs «intelligents» qui, par exemple, sauront quelle technique d'étalement de spectre utiliser dans une situation donnée pour que l'information soit transmise sans erreur. Progressivement on mélangera les réseaux radio et les réseaux câblés, pour une transmission optimale des informations.

L'analyse du fonctionnement du réseau Internet montre bien comment pourrait se faire la régulation du nouvel environnement radio. Pour faire fonctionner une structure décentralisée similaire, qui partagerait le spectre radio de façon optimale, les experts en communication, les entreprises et les organismes de réglementation du monde entier devraient s'unir. Le réseau devra sans doute être animé par des systèmes électroniques «intelligents», qui exécuteront des protocoles autorégulés. Lors de la création du réseau, on devra incorporer à l'infrastructure des règles qui conduiront à un partage efficace de la ressource commune qu'est le spectre radio.

David HUGHES et Dewayne HENDRICKS ont mis au point le système radio d'Ulaanbaatar.

M.K. SIMON, J.K. OMURA, R.A. SCHOLTZ et B.K. LEVITT, *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

Tim J. SHEPARD, *A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Radio Networks*, in *Proceedings of ACM SIGCOMM '96*, ACM, 1996.

L'intégration des Barbares dans la société gallo-romaine

MICHEL KAZANSKI • CHRISTIAN PILET

Contrairement à la croyance populaire, les Huns et autres Barbares venus d'Orient n'étaient pas seulement des barbares sanguinaires. Mercenaires à la solde de Rome, certains se sont intégrés à la société gallo-romaine.

«Les Huns donc qui venaient des Pannonies, comme certains le rapportent, arrivent la veille même de la sainte Pâques devant la ville de Metz en ravageant le reste du pays ; ils incendient la ville, passent la population au fil de l'épée et massacrent même les prêtres du Seigneur devant les autels sacro-saints.»

Grégoire de Tours, *Histoire des Francs*, Livre II, VI

Barbares, Vandales, Attila... : ces termes évoquent une brutalité sans limite. Les peuples barbares n'étaient-ils que des guerriers, sanguinaires et impitoyables ? Nous allons tenter de montrer que tous ne le furent pas, et exposer les arguments nous faisant penser que certains Barbares de l'Orient se sont intégrés à la société gallo-romaine, utilisant, voire imitant, sa monnaie. Le mobilier funéraire des tombes que nous avons fouillées révèle que les Barbares installés en Gaule ont conservé leurs coutumes, mais qu'ils ont aussi adopté des objets romains. Simultanément, on retrouve des objets d'origine barbare dans les nécropoles romaines : des échanges «pacifiques» ont eu lieu entre certains Barbares et les Gallo-romains.

Les Huns, cavaliers nomades venus de l'Asie centrale, arrivent en 375 dans les steppes de la Russie méridionale. Continuant leur progression vers l'Ouest, ils chassent les peuples barbares sédentaires germaniques, tels les Goths, lesquels se divisent en deux groupes, les Wisigoths et les Ostrogoths. Les Huns atteignent le bassin des Carpates et la Pannonie, approximativement l'actuelle Hongrie, au début du V^e siècle. Ils asservissent la région et s'y installent, conser-

vant certaines coutumes de leur vie nomade (ils dressent notamment des villages de tentes). Ils continuent invinciblement leur progression vers l'Occident. Arrivés aux portes de l'Empire romain, ils tentent quelques intrusions. À ces groupes se joignent d'autres tribus (les Burgondes, les Vandales, etc), et ces hordes menacent l'Empire romain. Les grandes migrations de la fin de l'Antiquité et du début du haut Moyen Âge, entre le IV^e et le VI^e siècle, se sont achevées, en Occident, vers 568, quand les Lombards sont arrivés en Italie.

Les nomades se déplacent chassés par un climat trop rude, par une économie précaire et parce que, la taille des populations augmentant, ils doivent conquérir de nouveaux territoires habitables. La plupart des Barbares qui se déplacent pendant la période des Grandes Migrations ne sont pas des nouveaux venus en Europe. Germains de l'Europe centrale et septentrionale, Iraniens (Alains et Sarmates) des steppes de la mer Noire, Slaves des forêts de l'Europe orientale, Celtes des îles Britanniques, sont bien installés en Europe, à l'Âge du fer et à l'époque romaine.

Un jeu complexe d'alliances, de traités et de dominations par la force rassemble autour d'Attila des tribus d'origines différentes. La fédération des Huns devient une superpuissance. Les cavaliers nomades hunniques, s'illustrent par les succès militaires que l'histoire a retenus. Au début du V^e siècle, ils sont aux portes de l'Empire romain, connus et craints des représentants de l'autorité impériale. Des contacts favorisent les échanges culturels et se

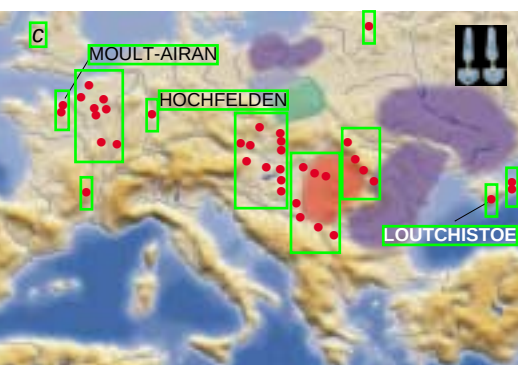
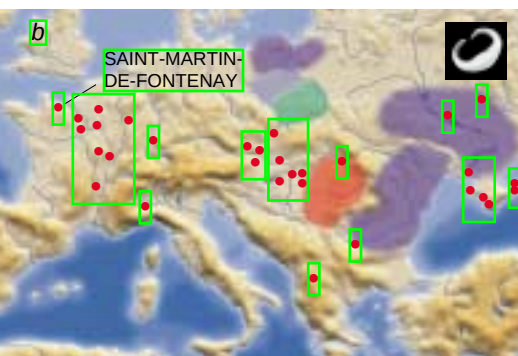
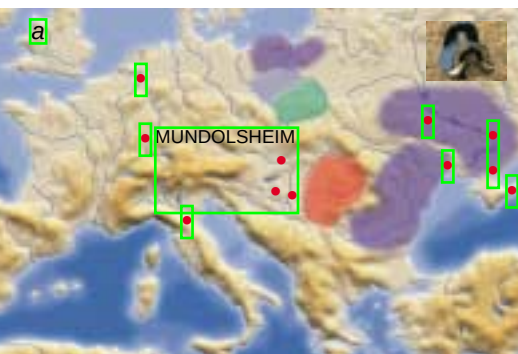
concrétisent par la formation d'unions tribales à vocation militaire entre les Romains et les Alamans, les Goths, les Francs, les Huns, etc. Au milieu du V^e siècle, l'empereur romain Valentinien III a des difficultés à recruter des troupes à l'intérieur de ses propres frontières. C'est dans la marqueterie des populations barbares qui jouxtent les frontières de l'Empire que l'autorité militaire romaine recrute ses troupes.

Des Barbares mercenaires

Pendant la première phase du mouvement migratoire, celle qui nous intéresse plus particulièrement, les Huns, les Germains orientaux (les Goths, les Burgondes...), les Francs, les Alains occupent le devant de la scène.

Quelques milliers de personnes migrent, venant de Pannonie à cheval pour les hommes, en chariot pour les

1. LES GRANDES INVASIONS commencent en 375, quand les Huns venus de l'Extrême Orient arrivent aux confins de l'Europe. Dans leur progression vers l'Ouest, ils rencontrent d'abord les Alains, puis les Goths qu'ils chassent et qui se scindent en deux groupes, les Wisigoths et les Ostrogoths. Les Huns se fixent en Pannonie, l'actuelle Hongrie. Alliés à d'autres peuples barbares, ils tentent plusieurs expéditions contre l'Empire romain, mais seront définitivement repoussés après leur défaite aux champs Catalauniques, près de Troyes, en 451. Les objets retrouvés le long de leur trajet, notamment dans les sépultures, témoignent de la propagation de la culture barbare dans le couloir du Danube. On a notamment retrouvé des plaques métalliques décorant les selles de chevaux (carte a), des boucles d'oreilles typiques portées par les guerriers (carte b) et des fibules, des agrafes pour les vêtements (carte c).



Les Huns entrent au service de l'empire vers 384 ; en 409, l'armée d'Honorius compte 10 000 mercenaires hunniques dans ses rangs. Après un nouveau traité, Aetius, chef militaire de la Gaule, fait venir, entre 425 et 429, plusieurs milliers de cavaliers hunniques. Les mercenaires sont engagés le temps d'une expédition et, une fois leur mission militaire achevée, ils repartent vers l'Est. Pourtant, certains semblent rester en Gaule et s'intégrer au système romain. Ceux qui achèvent leur carrière dans

l'armée deviennent automatiquement citoyens romains et reçoivent un lopin de terre. Ainsi, pendant la deuxième moitié du IV^e siècle et la première moitié du V^e, l'armée romaine est en grande partie composée de Barbares, même dans le haut commandement. Les chefs militaires fondent des dynasties, et cette organisation préétatique annonce la constitution des royaumes barbares du début du Moyen Âge. En revanche, les populations barbares les plus éloignées

l'armée deviennent automatiquement citoyens romains et reçoivent un lopin de terre.

Ainsi, pendant la deuxième moitié du IV^e siècle et la première moitié du V^e, l'armée romaine est en grande partie composée de Barbares, même dans le haut commandement. Les chefs militaires fondent des dynasties, et cette organisation préétatique annonce la constitution des royaumes barbares du début du Moyen Âge.

En revanche, les populations barbares les plus éloignées





2. LE TRÉSOR DE MOULT-AIRAN est constitué de diverses pièces, ici des plaques-appliques en or, vraisemblablement cousues sur un vêtement (à droite) et une boucle de ceinture en argent doré ornée d'un décor floral gravé. Quatre rivets (on en voit un en bas à droite) reliaient la boucle à la ceinture de cuir.

gnées des frontières de l'empire, tels les Slaves ou les Germains du Nord, conservent plus longtemps leurs structures de chefferies. La transformation en royaumes ne devient effective qu'au moment de la migration de ces populations sur le territoire de l'empire, entre le V^e et le VII^e siècle ; c'est le cas des Saxons, des Angles, des Jutes sur l'île de Bretagne, ou encore des Sclavènes dans les Balkans.

À partir de 430, des mercenaires hunniques sont installés en Gaule. Commandés par Aetius, futur vainqueur d'Attila, ils se battent loyalement contre d'autres Barbares – Burgondes, Wisigoths, Francs. Les Huns sont d'excellents archers, et leur réputation est encore grande, au VI^e siècle, quand ils combattent dans l'armée byzantine contre les Vandales et les Ostrogoths.

Cette paix armée entre les Huns et les Romains ne dure pas. Attiré par

les richesses de l'Empire romain d'Occident, Attila décide d'attaquer, en 451–452. Aux côtés des Huns, il rassemble diverses populations assujetties : les Ostrogoths, les Gépides, les Ruges, les Skires, les Thuringiens, les Francs rhénans et les Burgondes d'outre-Rhin. Après avoir franchi le Rhin, cette armée s'empare de Metz, puis marche sur Orléans. En face, l'armée romaine, commandée par Aetius, regroupe des Armoricaains, des Riparioli arrivant des cantonnements du Rhin, des Sarmates, des fédérés wisigothiques, alains, francs, burgondes et saxons. L'affrontement a lieu, le 20 juin 451, aux champs Catalauniques, près de Troyes, et la victoire des troupes d'Aetius met un terme à l'invasion d'Attila. Ce dernier se replie, mais, en 452, il reprend, dans la vallée du Pô, des opérations militaires aux résultats incertains qui le

conduisent à conclure une trêve avec l'empereur d'Occident. La menace hunnique s'arrête avec la mort subite d'Attila, en 453.

Attila épousa, à la fin de sa vie, une jeune fille fort belle, nommée Idlico, après avoir eu un grand nombre de femmes, selon la coutume de sa nation. Le jour de ses nocces, il se livra à une grande gaieté. Le lendemain, la journée touchait à sa fin quand les serviteurs du roi, ayant de sinistres appréhensions, brisèrent les portes après l'avoir appelé à grands cris. Ils trouvèrent Attila étouffé par son sang, sans blessure...

Jordanes, *Getica*, XLIX

L'Empire hunnique éclate, aucun des fils d'Attila n'ayant l'autorité fédératrice du chef défunt.

Les textes de l'évêque Grégoire de Tours, du moine Jordanes ou encore ceux de l'ambassadeur romain Priscus rapportent les événements qui ont eu lieu au milieu du V^e siècle ; ils décrivent les grandes invasions barbares, les alliances militaires, les traités, les modes de vie de ces peuples. À côté de ces textes, les données archéologiques représentent une autre source d'informations sur cette période.

En 1956, l'archéologue allemand Joachim Werner a été le premier à entreprendre l'identification et l'inventaire des objets hunniques découverts dans la partie occidentale de l'empire et dont l'inventaire montre que, tout en conservant certaines de leurs traditions culturelles, notamment vestimentaires, les Huns à la solde de l'empereur faisaient partie intégrante de la société gallo-romaine.

Les vestiges hunniques



3. UN COLLIER ET DES PLAQUES APPLIQUES en or, qui devaient décorer un vêtement, ont été découverts à Hochfelden, près de Strasbourg, dans une tombe «princièr», vraisemblablement de la famille d'un haut dignitaire militaire barbare, au service de l'empereur romain.

Les nécropoles fournissent l'essentiel des données qui nous permettent aujourd'hui d'étudier les grandes migrations. La fouille bien conduite d'une sépulture aide les archéologues et les historiens à percevoir l'évolution d'un peuplement, à découvrir les activités des hommes et des femmes et, parfois, à comprendre leur mentalité. Ils observent l'aménagement de la sépulture, son remplissage, la position des corps, etc. L'étude anthropologique qui suit la découverte d'un corps est conditionnée par la qualité de l'observation et par celle des prélèvements. Seule l'analyse de tous ces renseignements apporte des informations fiables, mais elle aboutit rarement à l'identification de l'origine géographique des individus dont on retrouve les dépouilles.

Des vestiges hunniques ont été recueillis en Pannonie, le long du Rhin et du Danube, et, en Gaule, tout le long des voies empruntées lors des migrations. Ce sont notamment des pointes de flèches en fer à trois ailerons et des chaudrons en bronze. Certaines sépultures, mises au jour sur le territoire de la France actuelle, ont livré divers objets témoignant de la culture hunnique. À Mundolsheim, près de Strasbourg, une tombe de cavalier, identifiée par des appliques de selle en tôle d'argent doré décorée d'écailles, par une boucle de harnachement de cheval en argent, par un ferret en argent et deux passe-courroies en or, indique que ce militaire de haut rang était d'origine orientale. On a récemment recensé des appliques de selle du même type que celles de Mundolsheim et ainsi montré la progression des populations de Russie méridionale, du Caucase du Nord, de Crimée et du Danube moyen vers l'Ouest pendant la domination hunnique, entre 375 et 453.

On retrouve d'autres objets typiques de la culture hunnique tout le long du Danube et jusqu'en Gaule. La découverte de boucles d'oreilles en forme de croissant dans plusieurs nécropoles prouve que les Huns ou les populations qu'ils ont dominées véhiculaient leur mode et leur culture. Ces boucles d'oreilles sont souvent en argent. J. Werner a recensé 17 sites, datés de l'Antiquité tardive ou du haut Moyen Âge et répartis entre le Kazakhstan occidental et la Bourgogne, qui ont livré de telles boucles d'oreilles. Depuis, de nombreux autres sites ont livré ce type d'objet, comme à Saint-Martin-de-Fontenay, dans le Calvados (voir la figure 5) ; nous n'avons pas

retrouvé de telles boucles d'oreilles plus à l'Ouest, en France.

Ces boucles d'oreilles proviennent d'Europe orientale, plus précisément de Russie méridionale (de la Volga inférieure, du Caucase et de la Crimée) ; elles ont été importées à l'époque des grandes migrations par des tribus nomades. Toutefois, les boucles d'oreilles en forme de croissant, trouvées dans la partie la plus occidentale de l'empire, datent d'une période postérieure à l'époque hunnique, c'est-à-dire postérieure à la période d'activité des Barbares orientaux. De surcroît, on les a découvertes, en Gaule, sur des sites où la population indigène n'a pas eu de contact direct avec les peuples hunniques. C'est à ce type d'indices que l'on mesure l'importance des contacts entre l'Est et l'Ouest, de l'Antiquité tardive au début du haut Moyen Âge, et l'influence culturelle et pacifique qu'a eue l'aristocratie militaire de l'armée romaine barbarisée.

La mode danubienne

En fait, ces dignitaires ont véhiculé la «mode danubienne» qui s'est implantée en Occident et qui a eu une influence sur les populations locales. En Occident, les boucles d'oreilles en forme de croissant sont présentes uniquement dans des tombes masculines. Elles font vraisemblablement partie d'une mode militaire qui témoigne de la survivance des traditions barbares. Des auteurs de l'Antiquité tardive signalent la persistance de telles traditions dans la Gaule mérovingienne.

Selon Procope de Césarée, par exemple, à l'époque de Clovis, des unités entières de l'ancienne armée romaine ont été incorporées dans le système militaire du royaume mérovingien et, au VI^e siècle encore, elles gardaient leurs uniformes et leurs drapeaux.

Quelle était cette mode danubienne, qui s'est développée de la fin du IV^e siècle au milieu du V^e parmi les populations dominées par les Huns ou en contact avec eux ? Elle transparaît grâce aux vestiges retrouvés dans les tombes d'hommes ou de femmes de l'aristocratie militaire.

Ce sont des selles décorées de plaques métalliques, des plaques-appliques d'or cousues sur les vêtements, des miroirs métalliques. D'autres aspects de cette mode sont révélés par des objets d'origine germanique orientale, telles les fibules ansées à tête semi-circulaire et à pied losangé ou les colliers avec des pendentifs en forme de hache (une fibule est une agrafe qui retient les vêtements).



MUSEUM - L. BLOCH



MUSEUM - L. BLOCH

4. DES PLAQUES-APPLIQUES ont été découvertes (en haut) dans la tombe barbare de Loutchistoe, en Crimée. Les diverses pièces assemblées forment un diadème (en bas) qui était porté sur le front.

Le diadème a été reconstitué par Elzara Khairidinova, de l'Institut des Études orientales, à Simféropol, en Crimée. La «princesse» de Loutchistoe portait aussi des boucles d'oreilles (sous le diadème).



5. DES BOUCLES DE CEINTURE d'origine romaine (ci-dessus) étaient portées par les mercenaires barbares à la solde de Rome. Certains soldats portaient aussi des boucles d'oreilles en forme d'anneaux et de croissant (à droite) typiques de la mode danubienne. On retrouvait ces boucles d'oreilles dans les tombes des soldats barbares enterrés en Gaule et dans celles des populations indigènes, ce qui prouve le mélange des cultures barbare et romaine.

Inversement, plusieurs objets sont d'origine romaine, par exemple, des garnitures d'épées et de ceinture en style polychrome, des casques à bandes métalliques, des fibules-insignes de dignitaires, des fibules en forme d'abeilles. La mode danubienne, adoptée par plusieurs peuples, a un caractère international qui rend difficile, voire impossible, l'identification de l'appartenance des individus inhumés dans les tombes qui ont livré les objets déjà évoqués.

Toutes ces sépultures «princières», sur le territoire de l'empire, sont situées dans les zones frontalières, les limes. Ainsi les sites d'Atlusheim, de Wolfshheim et d'Hochfelden sont localisés près de la frontière rhénane, Moulth est dans la zone de défense des côtes de la Manche contre les pirates saxons et francs. Ces tombes étaient celles de chefs militaires barbares ressortissants de l'Europe centrale et orientale au service de l'empire (à Atlusheim, Wolf-

heim, Mundolsheim) ou de femmes de chefs (à Moulth et à Hochfelden).

Les sépultures de femmes illustrent la diversité culturelle de cette aristocratie militaire qui se déplaçait au gré des stratégies élaborées par le pouvoir impérial.

La princesse de Moulth

La sépulture de la princesse de Moulth a été découverte en 1874. Elle est connue sous le nom de «Trésor d'Airan». On y a retrouvé les bijoux que portait une jeune femme, morte entre 20 et 40 ans, au début du V^e siècle. On ignore comment les objets étaient disposés sur le corps, car le terrassier se contenta de les récupérer en piétinant le squelette. La princesse portait une paire de fibules en or et en argent avec des décors de grenats et de verroterie (caractéristique du style polychrome), reliées par une chaîne d'argent. L'ensemble indique une culture germanique orientale, à la mode chez les Germains, dès l'époque romaine tardive. Sur son vêtement étaient cousues des décorations, des plaques-appliques géométriques en or. Ces éléments témoignent d'une mode d'origine alano-sarmate.

En 1995, avec l'équipe ukrainienne d'Alexandre Aibabine, nous avons trouvé une parure comparable dans une sépulture de femme à Loutchistoe, en Crimée. Dans ce cas, les plaques-appliques sont cousues sur un bandeau, de part et d'autre d'une plaque circulaire à décor cloisonné, l'ensemble formant une sorte de diadème (voir la figure 4). La jeune femme



6. LES FIBULES (de a à e) sont caractéristiques de la mode danubienne. Dans la tombe de Saint-Martin-de-Fontenay, on a retrouvé deux fibules en place (à gauche). Celles de

de Moul't a une boucle d'oreille à pendeloque trilobée en or, identique à la paire trouvée dans la tombe de Loutchistoe. Elle porte, à la ceinture, une plaque rectangulaire d'argent doré et niellé, qui signale une influence culturelle romaine (le nielle est un sulfure d'argent et de plomb qui, déposé sur les motifs gravés, souligne les sillons de noir).

La parure est complétée par une chaîne métallique tressée en or. On ignore l'origine culturelle de ce type d'objet, car on le retrouve chez les Germains, sur le territoire de l'Empire romain, au Moyen-Orient et en Transcaucasie. D'où venait précisément la princesse de Moul't? On ne le saura peut-être jamais, même si le costume de la jeune femme révèle des apports romains, germaniques et alano-sarmates, signes de la diffusion la plus occidentale de la mode danubienne.

La Dame de Hochfelden

La sépulture princière d'Hochfelden, découverte en 1964, est celle d'une femme plus âgée (entre 50 et 70 ans). On sait qu'elle faisait partie de la première génération de migrants, car elle porte des indices de la vie nomade qu'elle a menée avant de s'installer à Hochfelden.

Elle a été inhumée avec des objets contemporains de ceux qui ont été découverts à Moul't. Les fibules ansées à tête semi-circulaire et à pied losangé en argent indiquent une mode germanique orientale, le miroir brisé de bronze et les plaques-appliques en or

cousues sur les vêtements confirment l'influence alano-sarmate, la paire de boucles d'oreilles à pendentifs polyédriques en or l'apport romain et le collier une tradition hellénistique. Cette femme, de haut rang, portait des fibules sur chaque épaule.

L'étude anthropologique a apporté des informations complémentaires intéressantes sur son mode de vie. La Dame de Hochfelden avait une infection rhino-sinusienne, une déviation de la cloison nasale et une inflammation des tendons des muscles fessiers et adducteurs. Sans doute appartenait-elle à un groupe de population nomade d'origine orientale. Ses déboires rhinologiques auraient été une conséquence de sa vie nomade, de l'exposition incessante aux intempéries et à l'atmosphère enfumée des tentes.

De surcroît, la pratique quotidienne du cheval expliquerait ses tendinites, caractéristiques d'une pratique prolongée et régulière du cheval. L'assise abrupte et anguleuse de la selle de Mundolsheim (voir la figure 7) devait solliciter exagérément la musculature fessière et adductrice, sur les longs parcours. L'anthropologue Joël Blondiaux a récemment montré que les cavaliers professionnels de l'École de cavalerie de Saumur ont les attaches des tendons déformées par la pratique du cheval. Ainsi, les études anthropologiques complètent les informations fournies par les objets retrouvés dans les sépultures et informent l'archéologue sur l'origine des notables enterrés.

Les dernières traces de Barbares orientaux ont été repérées, en Gaule,

dans des nécropoles mérovingiennes de la deuxième moitié du V^e siècle, notamment à Pouan, dans l'Aube, à Saint-Martin-de-Fontenay, dans le Calvados, à Arcy-Sainte-Restitue, dans l'Aisne. Il s'agit de quelques tombes d'hommes ou de femmes où, parmi le mobilier funéraire, étaient rassemblés des objets d'origine danubienne : des garnitures de ceinture et d'épée en style polychrome et des fibules en tôle d'argent à tête semi-circulaire et à pied losangé.

L'examen des os apporte d'autres informations à l'anthropologue : les crânes de plusieurs squelettes portent l'empreinte d'une déformation volontaire. Quand on entoure le crâne des jeunes



EGON KRÄHMER/PARIS MUSÉES 1997



Hochfelden (a), de Moul't (b) et de la région de Budapest (c) datent de la première moitié du V^e siècle. Celles de Saint-Martin-de-Fontenay (d et e) sont de la fin du V^e siècle. La fibule f est d'origine ostrogothique. La fibule circulaire en argent et grenats (f) est apportée

par les Francs, qui véhiculent une nouvelle mode. La femme germanique orientale du début du V^e siècle dessinée d'après les restes d'une tombe de Smolin, en République tchèque, porte deux fibules sur les épaules et une à la base du cou.



7. LE MOBILIER DE LA TOMBE DE MUNDOLSHEIM est notamment constitué de plaques d'or décorant une selle de cheval qui a été reconstituée (ci-contre) et de deux passe-courroie en or (ci-dessus).

PATRICK DAVID/MUSEE DE NORMANDIE - CAEN

enfants de bandages, les os, malléables, se développent dans les directions laissées libres et adoptent une forme qui dépend de la position du bandeau ; dans certains cas, elle est en pain de sucre. Comme l'a montré Luc Buchet, du Centre de recherches archéologiques de Sophia-Antipolis, cette coutume était répandue parmi les Barbares, surtout les Alano-Sarmates et les Huns, et Attila a contribué à sa diffusion ; la présence d'individus au crâne déformé artificiellement ne prouve pas l'appartenance à un groupe spécifique.

La déformation des crânes

Les femmes qui vivaient à la fin du V^e siècle à Saint-Martin-de-Fontenay étaient vraisemblablement des descendantes de deuxième, voire de troisième génération, des populations barbares d'origine orientale. Elles avaient conservé les pratiques de leurs ancêtres : elles posaient des bandages sur le crâne de leurs enfants et elles portaient encore des fibules de type danubien. À l'autre extrémité de l'empire, la nécropole de Loutchistoe a aussi livré plusieurs cas de crânes déformés de femmes, enterrées au début du VI^e siècle.

Les Barbares ont été le principal vecteur de cette mode en Europe occidentale, du Nord de la mer Noire jusqu'à la Basse-Normandie. On a trouvé que la pratique de la déformation volontaire du crâne, importée par les Alains et les Germains orientaux, a emprunté le même chemin que les autres vestiges de la mode hunnique, la même route qui les a menés de l'Est vers l'Ouest.

Pour les anthropologues, les nécropoles, monde des morts, sont un accès au monde des vivants. La connaissance des pratiques funéraires et du mobilier associé illustre la relation de la population avec la mort, voire son organisation sociale. L'étude de l'âge, du sexe, de la taille, de la morphologie et des pathologies des squelettes mis au jour renseigne les anthropologues non seulement sur l'individu, mais sur la population.

D'après les études anthropologiques menées sur les nécropoles de la période des grandes migrations, les Barbares sont peu nombreux dans les communautés qui les reçoivent. À la première génération, ils sont regroupés dans un enclos funéraire qui leur est propre. Deux générations plus tard, les spécificités disparaissent. Les Barbares sont assimilés d'autant plus facilement par la population indigène

qu'ils n'ont plus aucun lien avec leur pays d'origine.

Quelle fut l'ampleur de ces migrations et de ces intégrations pacifiques ? Ni l'archéologue ni l'anthropologue n'ont la réponse. Ils ne peuvent identifier l'origine ethnique des personnes enterrées par la seule présence d'objets orientaux. Les objets d'origine barbare ont été largement diffusés en Europe du Nord, du Centre et de l'Est, parce qu'ils appartenaient aux aristocraties militaires qui se déplaçaient, changeaient de camp et emportaient leurs objets avec eux.

Ils ont été imités par les populations du monde romain qui étaient en contact avec ces représentants de l'autorité. Les archéologues et les anthropologues restent aujourd'hui confrontés à un défi : comment identifier, d'après les objets mortuaires ou l'examen des os, l'origine des Barbares qui se sont installés en Gaule ?

Michel KAZANSKI est directeur-adjoint de l'unité CNRS du Musée des antiquités nationales, à Saint-Germain-en-Laye. Christian PILET dirige l'Unité CNRS UMR 6577, à l'Université de Caen.

Attila, les influences danubiennes dans l'Ouest de l'Europe au V^e siècle, textes réunis par Jean-Yves MARIN, Publications du Musée de Normandie, Caen, 1990.

M. KAZANSKI, *Les Goths (I^{er}-VII^e siècles ap. J.-C.)*, éditions Errance, Paris, 1991. A. ALDUC-LEBAGOUSSE, J. BLONDIAUX et C. PILET, *La dame de Hochfelden*, in *Cahiers alsaciens d'archéologie d'art et d'histoire*, tome XXV, pp. 74-90, 1992.

C. PILET et al., *La nécropole de Saint-Martin-de-Fontenay. Recherches sur le peuplement de la plaine de Caen du V^e siècle avant J.-C. au VII^e siècle après J.-C.*, éditions du CNRS, 1994.

M. KAZANSKI, *Les tombes « princières » de l'horizon Untersiebenbrunn, le problème de l'identification ethnique*, in *L'identité des populations archéologiques*, Sophia-Antipolis, pp. 109-126, 1996.

A. AIBABINE et E. KHAIEDINOVA, *La nécropole de Loutchistoe*, in *Archéologie de la mer Noire. La Crimée à l'époque des grandes invasions, IV^e-VII^e siècle*, Musée de Normandie, Caen, pp. 67-78, 1997.

V. KOUZNETSOV et I. LEBEDYNSKY, *Les Alains*, éditions Errance, 1997.

L'antimatière cosmique

GREGORY TARLE • SIMON SWORDY

Les astrophysiciens traquent les antiparticules afin de comprendre le mouvement des galaxies. L'existence d'un antimonde semble exclue, mais pas celle de particules «sombres», abondantes dans l'Univers bien qu'invisibles.

En 1928, le physicien britannique Paul Dirac prédit l'existence de l'antimatière : à chaque particule de matière ordinaire correspond une antiparticule de même masse, mais de charge opposée. Ces antiparticules pourraient se lier en antiatomes, et les antiatomes pourraient former les contreparties antimatérielles de tous les objets de l'Univers : antiétoiles, antigalaxies et, même, antihumains. La rencontre d'une particule de matière et d'une particule d'antimatière conduirait à leur annihilation, accompagnée de la libération d'une bouffée de rayons gamma énergiques. De même, un humain et un antihumain qui se serreraient la main s'annihileraient, libérant une énergie égale à celle de 1 000 explosions nucléaires d'une mégatonne chacune.

La proposition de Dirac est osée, mais elle est confirmée quatre ans plus tard, lorsque Carl Anderson, de l'Institut de technologie de Californie, détecte la première antiparticule. En utilisant une chambre à brouillard pour étudier les rayons cosmiques (ces

1. DES COLLISIONS VIOLENTES entre des protons accélérés par l'onde de choc d'une supernova créent l'essentiel de l'antimatière découverte jusqu'ici. Certaines collisions produisent une gerbe de positons, d'électrons et d'autres particules (*en haut*), tandis que les impacts les plus énergiques engendrent des antiprotons (*en bas*).



teur d'antimatière de haute énergie (HEAT, en anglais), embarqué dans un ballon de haute altitude, cherche les positons des rayons cosmiques. D'autres détecteurs aéroportés étudient les antiprotons, et certains détecteurs ont même été embarqués sur des satellites. Ces expériences devraient révéler les origines de l'antimatière cosmique et indiquer si des antiétoiles ou des antigalaxies existent réellement.

Les astrophysiciens pensent que la plupart des antiparticules présentes dans la haute atmosphère ont été créées lors de collisions violentes de particules subatomiques, dans l'espace interstellaire. Le processus commence lorsque les champs magnétiques d'une étoile sont propagés dans une onde de choc, au cours de l'explosion de l'étoile. Ces champs magnétiques accélèrent les protons interstellaires ou les noyaux atomiques à des vitesses considérables. Quand ces noyaux, devenus ainsi des rayons cosmiques de haute énergie, heurtent une particule interstellaire, une partie de l'énergie incidente est parfois transformée en une paire particule-antiparticule.

Un réservoir de rayons cosmiques

Certaines collisions produisent des paires de pions, particules instables qui se désintègrent rapidement en positons, électrons, neutrinos et antineutrinos. Les collisions les plus énergiques, entre des particules qui se déplacent presque à la vitesse de la lumière, engendrent des paires proton-antiproton. Ce processus est l'inverse de l'annihilation matière-antimatière : l'énergie se matérialise en particules.

Toutefois peu d'antiparticules sont ainsi produites par les collisions interstellaires. Dans les rayons cosmiques observés par le détecteur HEAT, les particules sont bien plus nombreuses que les antiparticules. Pour comprendre pourquoi on observe difficilement l'antimatière, imaginons un récipient rempli de vis. Une centaine de vis ont un filet droit normal (symbolisant les électrons du rayonnement cosmique), et dix vis ont un filet inversé (représentant les positons). Les rayons cosmiques contiennent aussi des protons, de charge positive comme les positons, mais beaucoup plus massifs. Représentons ces protons par 10 000 vis à filet gauche, plus lourdes que les vis correspondant aux positons. Im-

aginons maintenant que nous pesions chaque vis à filet gauche pour savoir si elle correspond à un proton ou à un positon ; la mesure exige une grande précision, car si une seule vis « protonique » sur 1 000 est confondue avec une vis « positonique », le nombre apparent de vis « positoniques » doublera.

L'instrument HEAT se caractérise par un taux d'erreur inférieur à 1 / 100 000. Le dispositif utilise un aimant supraconducteur et un ensemble de détecteurs pour identifier les positons. Les rayons cosmiques qui traversent l'ouverture du collecteur passent ensuite dans l'aimant supraconducteur, qui dévie les électrons dans une direction, et les protons et les positons dans la direction opposée. Les détecteurs mesurent la charge électrique et la direction de chaque particule incidente, ainsi que l'amplitude de la déviation subie dans le champ magnétique. Cette dernière information permet de séparer les positons des positons ; un proton, plus massif, suivra une trajectoire moins incurvée qu'un positon de même vitesse.

Le détecteur HEAT a été lancé pour la première fois en 1994, à partir du Centre des ballons scientifiques de la NASA, au Nouveau-Mexique. Un ballon géant, gonflé à l'hélium, a emporté ses 2,3 tonnes à une altitude de 37 000 mètres (au-dessus de 99,5 pour cent de l'atmosphère). Le détecteur a mesuré le rayonnement cosmique pendant 32 heures, puis s'est posé en douceur dans le Nord du Texas. La NASA l'a relancé en 1995, à partir du Manitoba : ce deuxième vol a permis l'observation de positons de faible énergie, qui ne traversent le champ magnétique terrestre que près des pôles magnétiques terrestres.

Ces deux vols ont livré des résultats troublants. Notamment, si le nombre de positons de faible énergie mesuré par le détecteur était proche du nombre prévu d'après l'analyse des collisions interstellaires, le détecteur trouvait plus de positons que prévu à haute énergie. L'excès observé pourrait résulter d'erreurs de mesures, mais, si le surplus est réel, il suggère l'existence d'une source inconnue de positons de haute énergie, dans le cosmos. Les particules massives qui interagissent peu, surnommées WIMP (d'après l'anglais *weakly interactive massive particles*), sont peut-être de telles sources.

particules cosmiques qui bombardent la Terre), Anderson observe une traînée de gouttelettes laissée par une particule de même masse que l'électron, mais de charge électrique opposée (c'est-à-dire positive). Ce partenaire antimatériel de l'électron est le positon. Les antiprotons sont plus difficiles à trouver, mais, en 1955, les physiciens du Laboratoire Lawrence Berkeley en obtiennent dans un accélérateur de particules. Puis, en 1995, des physiciens du Centre européen de recherches nucléaires, près de Genève, synthétisent des atomes d'antihydrogène – de très courte durée de vie – en liant des positons et des antiprotons dans un accélérateur de particules.

Ces dernières années, les astrophysiciens ont construit des détecteurs de plus en plus complexes pour rechercher les antiparticules dans les rayons cosmiques. Comme ces dernières s'annihilent lors de collisions avec les noyaux des molécules d'air, les astrophysiciens ont placé leurs détecteurs dans les couches les moins denses de l'atmosphère. Ainsi le Télescope détec-

Ces particules permettraient de résoudre le problème lancinant de la «matière invisible», encore nommée matière sombre ou matière cachée. Afin d'expliquer les rotations des galaxies, les astrophysiciens pensent que chaque galaxie est enveloppée d'un énorme halo de matière sombre, indétectable par les moyens classiques. Les WIMP pourraient constituer ces halos, parce qu'elles n'émettraient ni lumière ni aucun autre rayonnement électromagnétique. Si les WIMP existent et si leur densité est celle qui a été calculée, leurs collisions devraient engendrer un nombre notable de positons énergiques. Ainsi s'expliquerait l'excès détecté par HEAT... si nos mesures sont confirmées par d'autres détecteurs.

Alors que nous traquions les positons dans le rayonnement cosmique,

d'autres astrophysiciens chassaient des proies encore plus insaisissables : les antiprotons. Les antiprotons sont plus rares que les positons, parce que, comme ils sont environ 2 000 fois plus massifs, il faut une énergie supérieure pour les créer. Les protons interstellaires doivent entrer en collision à plus de 99 pour cent de la vitesse de la lumière pour produire une paire proton-antiproton.

À la recherche des antimondes

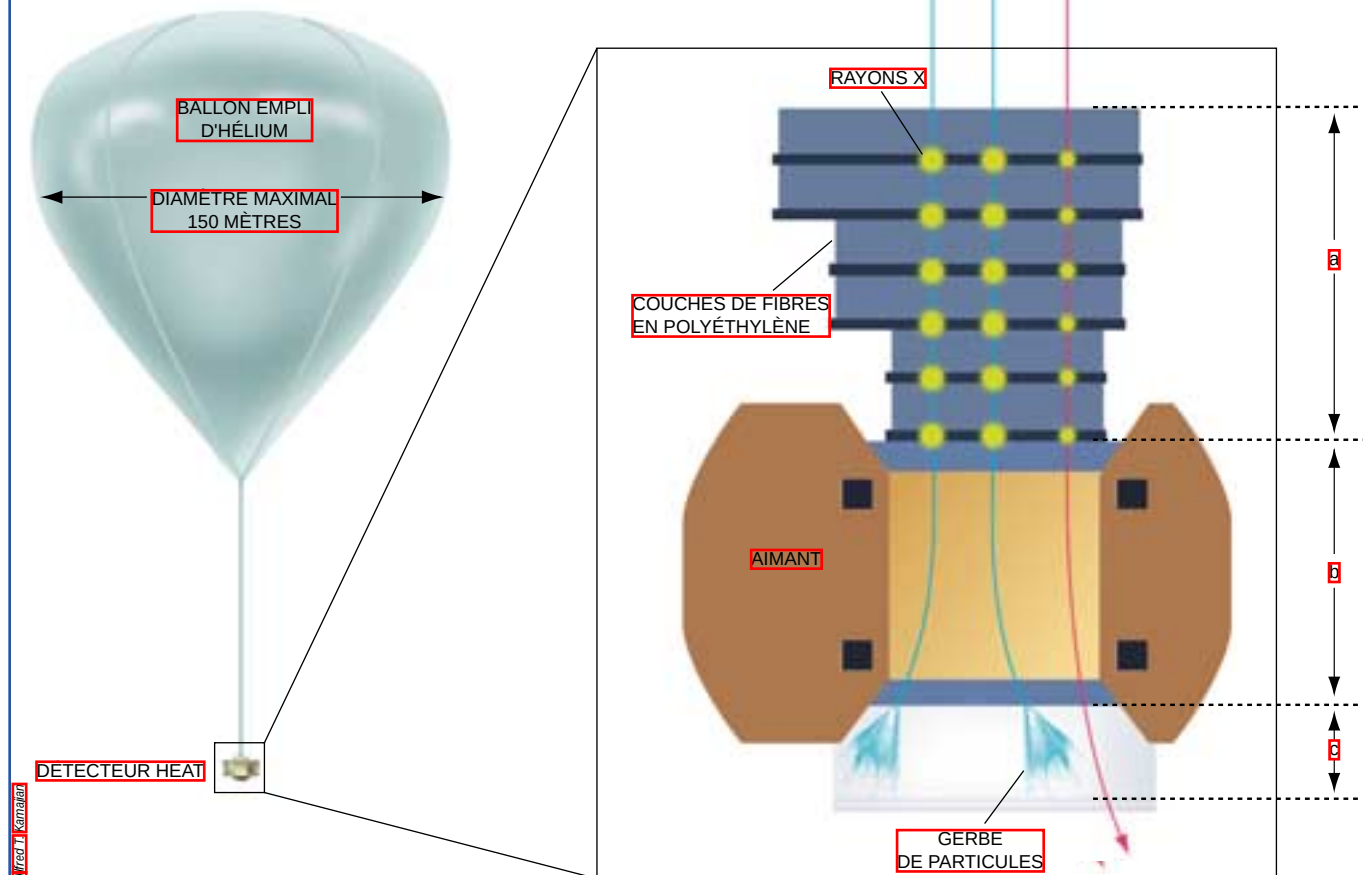
Les détecteurs d'antimatière, tel IMAX, qui recherche les isotopes de matière et d'antimatière, et BESS, qui est composé d'un spectromètre à solénoïde supraconducteur, ont déterminé une abondance maximale d'un antiproton pour 10 000 protons dans la pluie de

rayons cosmiques. Ces antiparticules sont si rares que les détecteurs doivent être extrêmement sensibles : le taux d'erreur doit être inférieur au millionième.

La quête systématique de l'antimatière commença dans les années 1960, avec les études du physicien Luis Alvarez : ce dernier cherchait des antiparticules lourdes, tels les noyaux d'antihélium, d'anticarbone ou d'antioxygène, dans les rayons cosmiques. Contrairement aux positons et aux antiprotons, ces antiparticules lourdes sont trop massives pour résulter de collisions entre particules interstellaires. La découverte d'un noyau d'antihélium prouverait que de l'antimatière a survécu au Big Bang, et la détection d'anticarbone ou d'antioxygène révélerait l'existence d'antiétoiles, parce que le carbone et les éléments chimiques plus lourds ne sont synthétisés que dans les étoiles.

Un détecteur de haut vol

Un ballon empli d'hélium emporte le Télescope détecteur d'antimatière de haute énergie (HEAT) dans la haute atmosphère (*ci-dessous*). Les rayons cosmiques qui entrent dans le détecteur sont identifiés ; un système spécial capte les positons. L'un des auteurs (G. Tarlé) pose auprès de l'instrument après son premier vol (*extrême droite*).



La plupart des astrophysiciens doutent de l'existence des antiétoiles, parce que la rencontre de particules de matière, provenant de l'espace interstellaire, et de ces antiétoiles engendrerait, lors des annihilations matière-antimatière, un flux considérable de rayons gamma. Des détecteurs en orbite ont bien observé des rayons gamma de basse énergie, résultant de l'annihilation de positons, au centre de notre Galaxie, mais les astrophysiciens ne croient pas que ces positons sont produits par une antiétoile, car une telle antiétoile serait une source intense et localisée de rayons gamma bien plus énergiques que ceux qui sont observés. Notre Galaxie n'abrite apparemment pas d'antiétoile, et notre amas local de galaxies ne contient vraisemblablement pas d'antigalaxie.



La section a montre le détecteur de rayonnement transitoire, une série de six feuilles en fibres de polyéthylène. Les positons et les électrons engendrent des rayons X en traversant les feuilles, tandis que les protons de même énergie produisent un signal beaucoup plus faible.

La section b représente le spectromètre magnétique, où un aimant supraconducteur dévie les rayons cosmiques. Les électrons sont déviés dans une direction, tandis que les protons et les positons sont déviés dans la direction opposée. Les protons et les positons peuvent être discernés parce que la trajectoire d'un positon se courbe beaucoup plus que celle d'un proton de même vitesse.

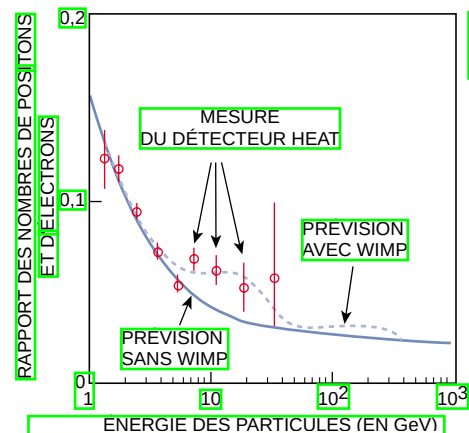
La section c montre le calorimètre électromagnétique, un empilement de feuilles de plastique et de minces couches de plomb. Quand les électrons et les positons heurtent les couches de plomb, ils produisent des gerbes de particules qui engendrent des impulsions lumineuses dans les feuilles de plastique. La plupart des protons traversent le détecteur sans modification.

Mais plus loin? L'Univers contient-il des antigalaxies isolées, très éloignées des galaxies? Au cours des dix dernières années, les astronomes ont effectué des recensements de galaxies jusqu'à un milliard d'années-lumière, mais ils n'ont pas trouvé d'antimatière cosmique : les amas de galaxies sont environnés d'immenses espaces vides. Si de grandes parties de l'Univers se composaient d'antimatière, les régions où matière et antimatière entreraient en contact auraient émis des quantités considérables de rayons gamma au début de l'Univers. Comme les astronomes n'ont pas détecté cette puissante lueur de fond, ils ont conclu que les antigalaxies, si elles existent, se trouvent hors de portée de nos télescopes ou, du moins, à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

De surcroît, la cosmologie moderne explique que l'Univers pourrait être composé quasi exclusivement de matière ordinaire. En raison d'une légère asymétrie des lois de la physique, la «violation CP», observée en laboratoire, le Big Bang aurait produit un léger excédent de matière : pour 30 milliards d'antiparticules créées, 30 milliards de particules plus une l'étaient. Un millionième de seconde après le Big Bang, particules et antiparticules ont commencé à s'annihiler, et il n'est finalement resté que la matière ordinaire. Ce léger excédent, qui correspond toutefois à un très grand nombre de particules, serait devenu l'Univers que nous connaissons.

Afin de tester cette théorie, des astrophysiciens recherchent les antiparticules lourdes. Certains croient à l'existence de vastes régions d'antimatière et ils supposent que des antinoyaux lourds, qui se déplaceraient presque à la vitesse de la lumière, pourraient nous parvenir. Dans les années 1960 et 1970, L. Alvarez et d'autres ont analysé des dizaines de milliers d'événements produits par des rayons cosmiques afin de déterminer si certains se composaient d'antiparticules lourdes. Des expériences plus récentes ont échantillonné des millions de rayons cosmiques. Malgré tous ces efforts, aucune antiparticule plus lourde que l'antiproton n'a été identifiée.

Ces résultats ne condamnent pas définitivement la théorie de l'antimatière cosmique : des antigalaxies lointaines pourraient émettre des antiparticules lourdes qui seraient bloquées par les champs magnétiques de



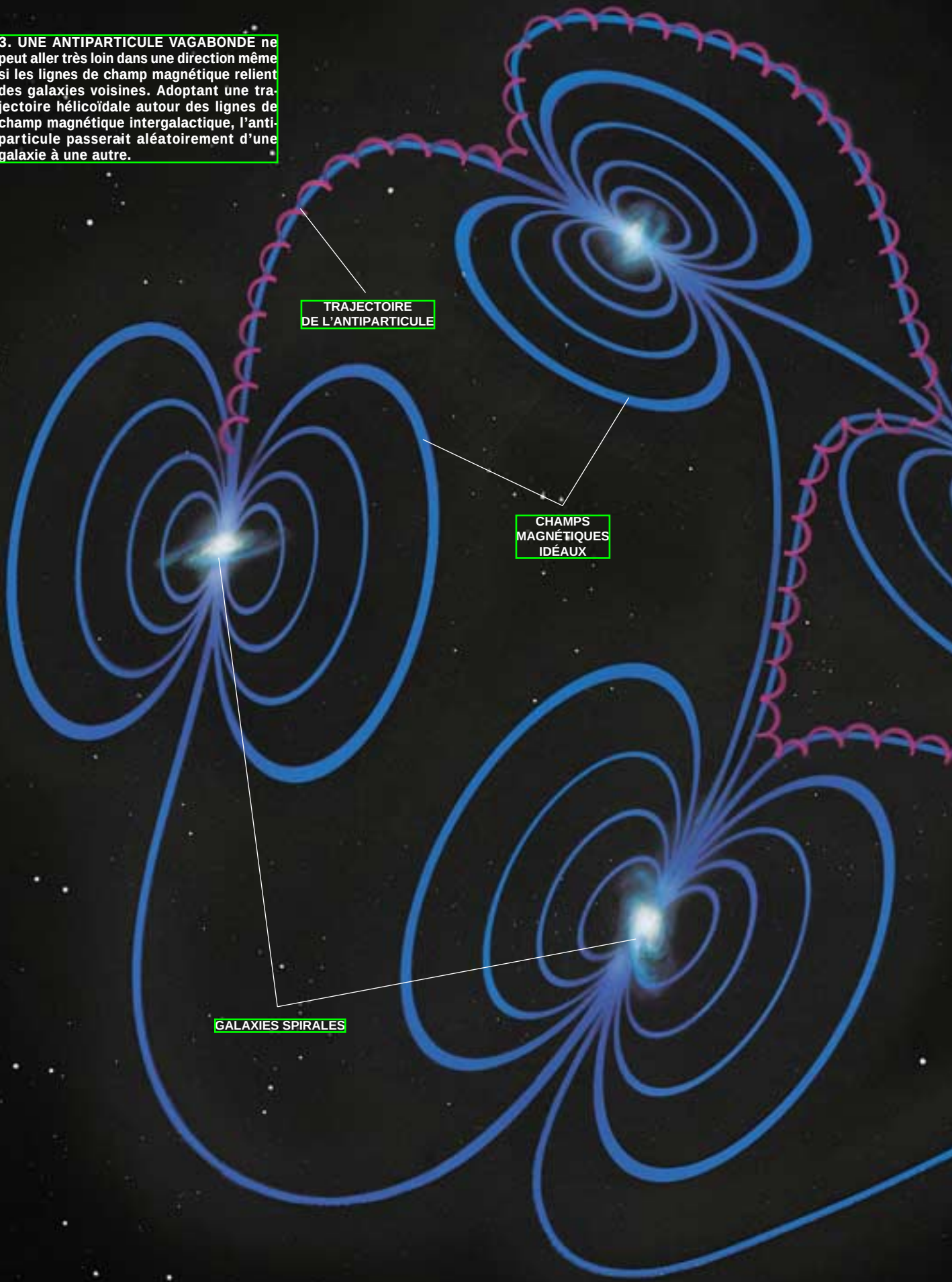
2. UN LÉGER EXCÉDENT de positons de haute énergie a été enregistré par le détecteur HEAT. Ces positons proviennent-ils de particules massives qui interagiraient peu, les WIMP?

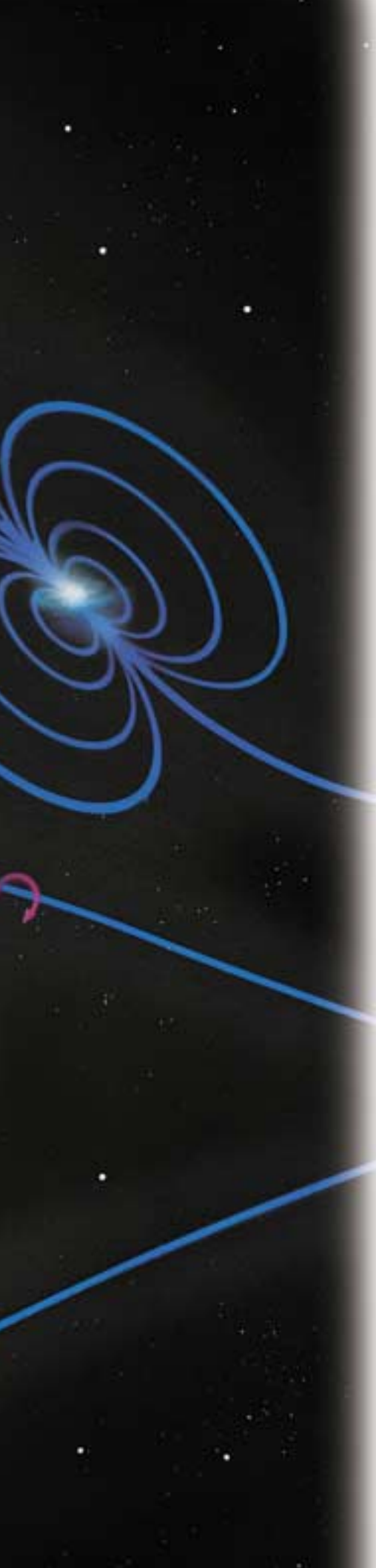
l'espace intergalactique. Des mesures récentes du rayonnement synchrotron traversant des amas de galaxies ont montré que le champ magnétique au sein de tels amas est environ un million de fois moins puissant qu'à la surface de la Terre. Comme l'intensité de ces champs a probablement augmenté d'un facteur 1 000 pendant la formation des amas, les astrophysiciens supposent que le champ entre des galaxies très éloignées est un milliard de fois plus faible que le champ terrestre.

De tels champs ne déviaient même pas l'aiguille d'une boussole, mais ils pourraient dévier des antiparticules qui parcourraient les vastes distances de l'espace intergalactique : la trajectoire des antiparticules s'enroulerait en une hélice de quelques années-lumière de diamètre autour des lignes de champ magnétique. Comment les champs magnétiques sont-ils orientés dans l'espace intergalactique? Sont-ils cohérents, comme le champ d'un barreau aimanté ordinaire? Ou les lignes de champ sont-elles enchevêtrées? Dans cette deuxième hypothèse, les antiparticules ne pourraient s'aventurer très loin : elles rebondiraient aléatoirement entre les lignes de champ, tels des ivrognes à la sortie d'un bar. Là où une personne sobre met quelques heures à parcourir les dix kilomètres qui la séparent de son domicile, l'ivrogne, qui se déplace au hasard, mettrait plusieurs années.

En revanche, si le champ magnétique intergalactique est cohérent, les lignes de champ peuvent s'étendre entre les galaxies : les antiparticules seraient alors canalisées entre des galaxies voisines, sur des autoroutes

3. UNE ANTIPARTICULE VAGABONDE ne peut aller très loin dans une direction même si les lignes de champ magnétique relient des galaxies voisines. Adoptant une trajectoire hélicoïdale autour des lignes de champ magnétique intergalactique, l'antiparticule passerait aléatoirement d'une galaxie à une autre.





cosmiques longues de plusieurs millions d'années-lumière. Les antiparticules sauteraient ainsi de galaxie en galaxie, tout comme un ivrogne qui suivrait les pâtés de maison, choisissant les directions au hasard, aux croisements. Les antiparticules pourraient ne couvrir que quelques centaines de millions d'années-lumière à partir de leur source, même si elles voyageaient pendant un temps comparable à l'âge de l'Univers. Cette distance est bien plus courte que les milliards d'années-lumière nous séparant de l'antigalaxie la plus proche.

Même si, par hasard, une antiparticule approchait de notre Galaxie, rien n'indique qu'elle atteindrait la Terre : le champ magnétique de l'intérieur de la Galaxie, bien plus intense que le champ intergalactique, dévie la grande majorité des antiparticules incidentes ; l'ivrogne enfin arrivé chez lui ne trouve plus les clefs pour ouvrir la porte.

Les prochains vols

La recherche d'antiparticules lourdes dans notre Galaxie continue. Le Ministère américain de l'énergie finance aujourd'hui le projet d'envoi d'un détecteur d'antimatière dans un satellite. Le dispositif, nommé spectromètre magnétique alpha (AMS) cherchera principalement des antiprotons et des antineutrons. La NASA prévoit de tester le détecteur AMS à bord de la navette spatiale au cours de l'année 1998. Si tout se passe bien, le détecteur sera ensuite envoyé dans la station spatiale pour une durée de trois ans, à partir de 2002.

Sur une durée de fonctionnement aussi longue, AMS devrait avoir une sensibilité 100 fois supérieure à celle des précédents détecteurs d'antimatière. Saura-t-on toutefois distinguer les particules des antiparticules ? Pour identifier une antiparticule lourde parmi 100 millions de particules, un détecteur doit déterminer correctement la déviation de chaque particule dans un champ magnétique. Les instruments

les plus précis qui ont été embarqués dans des ballons font parfois plus de 15 mesures pour déterminer la déviation des particules rapides, mais le détecteur AMS n'en fera que six.

Un autre détecteur d'antimatière cosmique, PAMELA, doit également être lancé à Baïkonour, en l'an 2000. Plus complexe que AMS, il cherchera les positons, les antiprotons et les antinoyaux lourds. En raison de sa petite taille, il collectera moins de rayons cosmiques, de sorte que sa recherche d'antiparticules lourdes risque de ne pas être assez minutieuse.

D'autres recherches d'antimatière cosmique par ballon sont prévues. Par exemple, nous construisons aujourd'hui une nouvelle version du détecteur HEAT afin d'observer les antiprotons de haute énergie, au cours de vols plus longs. En Antarctique, la NASA a testé des ballons de haute altitude qui ont volé jusqu'à 20 jours autour du pôle Sud, et l'équipe NASA des îles Wallops met au point des enveloppes de ballon allégées afin d'obtenir des vols qui dureraient jusqu'à 100 jours ; les vols d'essai de ces ballons auront lieu dans les prochains mois.

La recherche de l'antimatière cosmique bat son plein. Avec les premières expériences, les astrophysiciens voulaient prouver que matière et antimatière existent en quantités égales dans l'Univers, mais ils ont détecté une asymétrie de l'Univers. Puis les détecteurs d'antimatière ont trouvé très peu de positons et d'antiprotons dans les rayons cosmiques, et aucune antiparticule lourde. Les physiciens conservent l'espoir que des antiétoiles et des antigalaxies se cachent quelque part dans l'Univers, à des milliards d'années-lumière de notre Galaxie, mais les antiparticules lourdes de ces régions lointaines atteignent-elles la Terre ? L'enjeu de la quête est considérable : c'est l'identification de la nature de la matière sombre, qui semble composer les halos des galaxies.

Gregory TARLE et Simon SWORDY sont respectivement professeurs de physique à l'Université du Michigan et à l'Université de Chicago.

Edward W. KOLB et Michael S. TURNER, *The Early Universe*, Addison-Wesley, 1990.

James W. CRONIN, Thomas K. GAISER et Simon P. SWORDY, *Les rayons cosmiques*, in *Pour la Science*, mars 1997.

Fred C. ADAMS et al., *Constraints on the Intergalactic Transport of Cosmic Rays*, in *Astrophysical Journal*, vol. 491, pp. 6-12, 10 décembre 1997.

Les muscles, organes de la perception

JEAN-PIERRE ROLL

Les muscles renseignent le cerveau sur nos postures et nos mouvements. L'excitation artificielle de leurs capteurs sensoriels crée des illusions de mouvement et facilite la rééducation.

En 1754, Étienne Bonnot, abbé de Condillac, dans son *Traité des sensations*, propose de doter une statue des cinq sens (l'odorat, l'ouïe, la vue, le toucher et le goût) pour qu'elle accède à la connaissance. La statue ne peut toutefois apprendre à voir avec des yeux immobiles, ni à toucher avec des mains figées dans le marbre. Elle n'accède enfin aux délices de ce monde et à son entendement que lorsqu'elle est capable de mouvements. À partir de cet instant seulement se forge en elle le sentiment d'habiter un corps, de le connaître, de le situer dans l'espace, ou tout simplement d'exister avec et par lui.

Que nous enseigne cette parabole ? Que nos organes des sens, qui assurent la saisie d'informations sur nous-mêmes et sur notre environnement, ne rempliraient pas leurs fonctions s'ils n'étaient portés par un corps mobile. Orienter le regard pour saisir une image, tendre l'oreille pour mieux capter un son, saisir ou manipuler un objet afin d'en connaître le poids, la forme, la température ou la texture sont autant d'« actions perceptives » : nous déplaçons nos organes des sens vers leurs stimulus spécifiques. Pour cette raison déjà, les muscles, dont les contractions assurent ces déplacements, sont des organes de la perception.

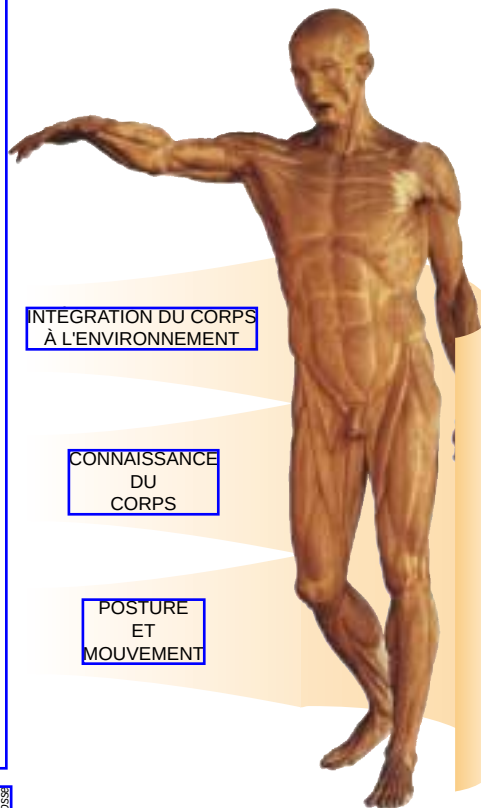
Les muscles ont aussi une fonction perceptive propre. Tandis que le système nerveux central commande les actions réflexes ou intentionnelles des muscles, ces derniers lui adressent, en retour, des informations sur le déroulement de ces actions : ils

contiennent des capteurs sensibles à leur longueur et à leurs variations de longueur. Les muscles sont donc des organes des sens à part entière, comme l'œil, l'oreille ou la peau. Ce « sixième sens », suspecté par Charles Bell dès 1823, fut nommé au début de notre siècle « sens musculaire » par Charles Sherrington,

qui le rangea parmi les sensibilités proprioceptives (dont les capteurs sont liés aux instruments moteurs et d'orientation spatiale du corps : les muscles, les tendons, les articulations et l'oreille interne). Pour cet auteur déjà, ce « sens secret » constituait l'une des bases de « l'ancrage organique de notre identité ».

La description, en 1986, par Oliver Sacks, d'une « femme désincarnée », montre bien que certaines polynévrites aiguës, qui entraînent la disparition sélective des plus grosses fibres nerveuses sensitives provenant des muscles, conduisent à une perte de tout sentiment d'appartenance à un corps.

Les illusions de mouvement, obtenues en manipulant la sensibilité musculaire, révèlent que le cerveau connaît nos mouvements grâce aux messages que lui adressent nos muscles et qu'il tient compte de ceux provenant des autres sens. Le cerveau se structure ainsi continuellement au cours de la vie, grâce aux activités sensorielles déclenchées par ses propres commandes motrices. La sensibilité musculaire occupe une place prépondérante lors de nos apprentissages moteurs et des réapprentissage consécutifs à des lésions du cerveau lui-même ou de notre appareil moteur.



DORS

1. LES MUSCLES sont des organes moteurs, et ils sont aussi pourvus de capteurs sensibles à leurs longueurs et à leurs allongements : les informations qu'ils transmettent au système nerveux nous font accéder, comme les autres sens, à la conscience de notre corps et à sa place dans l'environnement.

Certaines fibres musculaires sont sensibles

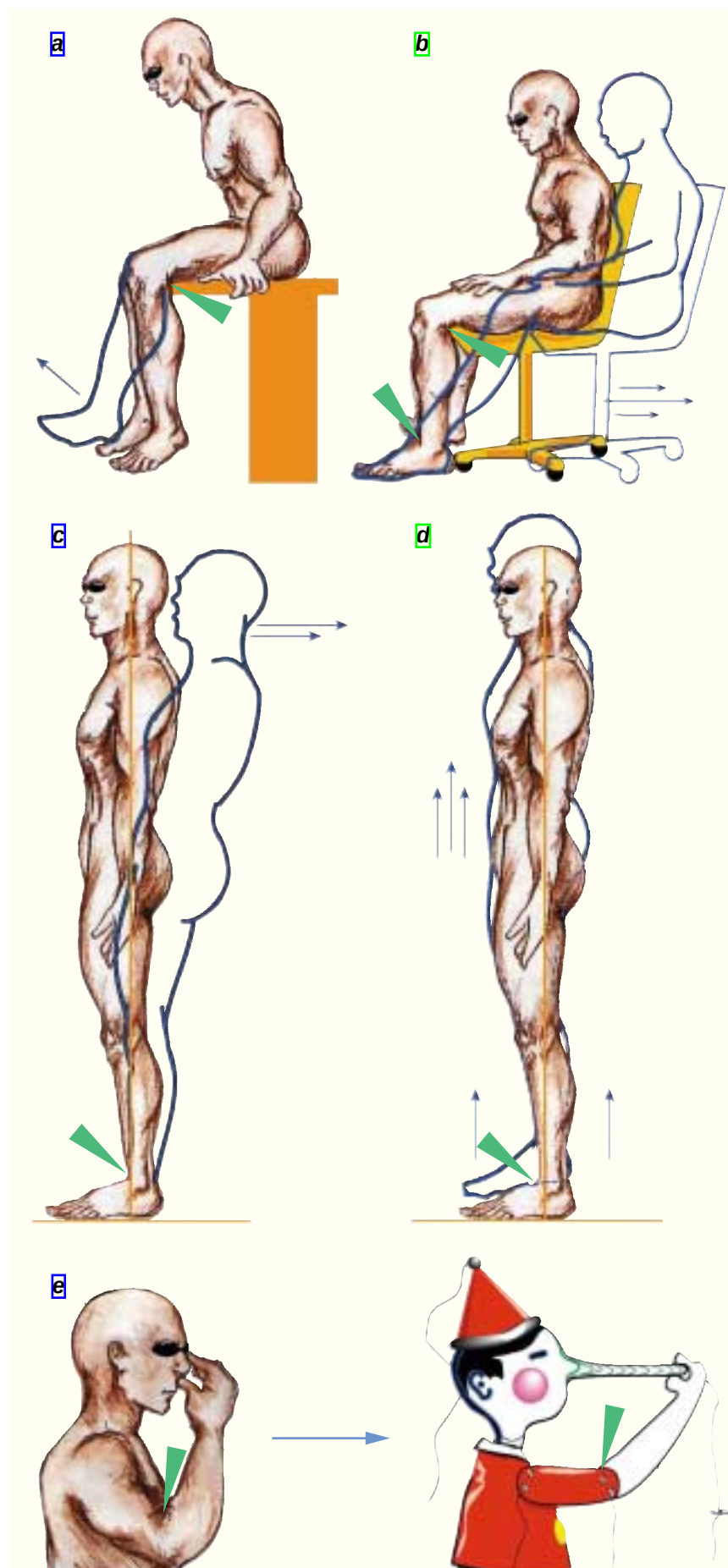
Comment le tissu musculaire, moteur et sensible à la fois, nous informe-t-il sur les attitudes et les actions de notre corps ? En 1863, Wil-

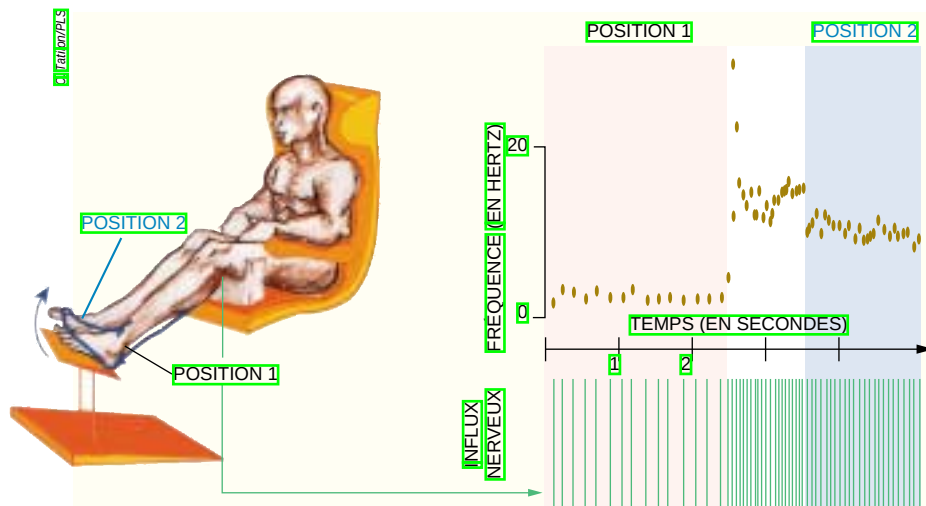
helm Kühne décrit, dans des muscles de petits mammifères, des formations cellulaires qu'il nomme fuseaux neuromusculaires en raison de leur forme allongée et de leur renflement central. Un fuseau neuromusculaire est formé de quatre à six fibres musculaires courtes (deux à cinq millimètres de long) et fines, dont la partie centrale (équatoriale), non contractile, est enfermée dans une capsule emplies d'un liquide visqueux (voir l'encadré page 96). On qualifie d'«intrafusales» ces fibres musculaires, par opposition aux fibres musculaires motrices, dites «extrafusales».

Sherrington confirme, dès 1893, que ces fuseaux neuromusculaires sont des structures sensorielles : des terminaisons sensibles innervent la zone équatoriale des fibres intrafusales. Les corps cellulaires des neurones issus de ces terminaisons sont dans les ganglions des racines rachidiennes dorsales (les structures par où les fibres nerveuses sensibles pénètrent dans la moelle épinière). De ces corps cellulaires, des axones partent vers de nombreuses structures nerveuses centrales, telles que la moelle épinière, le cervelet et les régions pariétales de l'écorce cérébrale. Là, les informations issues des fuseaux neuromusculaires sont utilisées pour la gestion de la motricité réflexe ou intentionnelle, ou pour l'élaboration de la connaissance des activités du corps et de ses rapports avec l'environnement.

Les muscles des yeux, des doigts ou du cou hébergent plusieurs dizaines

2. DES ILLUSIONS DE MOUVEMENTS sont créées par l'application de vibrations mécaniques (*flèches vertes*) sur les tendons d'un muscle, à des fréquences de quelques dizaines de hertz, et lorsque la vue du sujet est occultée. Le sujet a l'impression d'un mouvement qui étirerait le muscle ainsi stimulé, mais qui dépend de sa posture et des informations que lui apportent les autres sens. La vibration du muscle ischio-jambier d'un sujet assis (a) lui donne l'illusion d'une extension de sa jambe. Si l'on stimule les muscles ischio-jambiers et jambiers antérieurs de la même personne assise sur une chaise à roulettes et dont les pieds sont posés sur le sol (b), elle a l'impression de glisser vers l'arrière avec la chaise. La stimulation des jambiers antérieurs d'une personne debout lui donne l'illusion d'un basculement de tout son corps vers l'arrière (c). Après quelques jours passés en microgravité dans une station spatiale, cette illusion est remplacée par celle d'un déplacement du corps vers le haut (d). Enfin, la stimulation du biceps d'une personne qui se tient le nez pincé entre le pouce et l'index (e), donne à celle-ci, le plus souvent, la sensation que son nez s'allonge, tel celui de Pinocchio.





3. LES SIGNAUX SENSITIFS émis pendant les mouvements de la cheville par une terminaison nerveuse primaire sont enregistrés à l'aide d'une microélectrode introduite dans le nerf tibial postérieur. On enregistre une suite d'impulsions nerveuses à une fréquence caractéristique de la longueur du muscle (*position 1*). Lorsque le muscle est étiré, la fréquence des impulsions augmente en fonction de la vitesse du mouvement, puis se stabilise lorsque la longueur du muscle devient constante dans une nouvelle position (*position 2*).

de fuseaux neuromusculaires par gramme de tissu alors que ceux du mollet par exemple, dont la taille est supérieure, en sont moins largement dotés. La richesse de l'équipement sensoriel de nos muscles semble liée à la finesse et à la précision des actions qu'ils sont amenés à réaliser.

Les terminaisons nerveuses des fuseaux neuromusculaires sont sensibles à la fois à la longueur des muscles qui les abritent et aux variations de cette longueur. On enregistre, chez l'homme, les signaux qu'elles émettent en introduisant une micro-électrode de tungstène stérile dans un nerf superficiel du bras ou de la jambe. Dès le début des années 1980 nous avons ainsi, avec Jean-Pierre Vedel, confirmé et complété chez l'homme ce que la neurophysiologie animale nous avait appris du fonctionnement de ces récepteurs.

Dans un muscle dont la longueur est constante, les terminaisons nerveuses émettent un message sensitif (*voir la figure 3*) : une série d'impulsions électriques à une fréquence caractéristique de la longueur du muscle. Lorsque le muscle est déformé, la fréquence des impulsions varie : elle s'accroît lorsque le muscle est étiré, et d'autant plus que cet étirement est important et rapide ; elle décroît lorsque le muscle se raccourcit. Ces variations de fréquence rendent compte, en temps réel, à la fois de la vitesse à laquelle le muscle est étiré et de la longueur à laquelle il est stabilisé.

Les signaux nerveux issus de la totalité des muscles qui mobilisent

une articulation sont reçus et traités simultanément par le système nerveux central : il en déduit le mouvement. Ainsi, nous avons montré récemment, avec Edith Ribot-Ciscar, que le codage cérébral de la vitesse d'un mouvement de flexion repose sur la différence entre les fréquences des signaux sensitifs issus des muscles agonistes (qui se contractent) et antagonistes (qui s'allongent). La fréquence des signaux nerveux émis par les fuseaux neuromusculaires diminue dans les muscles agonistes et s'accroît dans les muscles antagonistes. Si le mouvement est plus complexe, les centres nerveux intègrent à chaque instant la totalité des messages issus de tous les muscles mis en jeu afin d'en extraire, par exemple, les paramètres de la trajectoire de l'extrémité du segment mobilisé.

Chacune de nos attitudes et chacun de nos mouvements engendre ainsi un message sensoriel spécifique. Un «paysage sensoriel» propre à chacun de nos actes se dessine alors et c'est probablement dans le stockage central de ces paysages sensoriels qu'il faudrait rechercher une part de la mémoire motrice, mémoire des gestes intentionnels que nous avons appris.

L'illusion du mouvement

Au début des années 1970, Guy Goodwin et ses collaborateurs de l'Université d'Oxford, puis Göran Eklund, de l'Université d'Uppsala, et enfin nous-

mêmes avons observé que l'application de vibrations mécaniques sur un tendon musculaire crée, chez un sujet totalement immobile et dont la vision est occultée, une sensation de mouvement. Les fuseaux neuromusculaires sont sensibles, nous venons de le voir, aux allongements des muscles qui les abritent. Des vibrations mécaniques de faible amplitude, lorsqu'elles sont appliquées sur les tendons de ces mêmes muscles, engendrent une série d'étirements rapides et répétés du tissu musculaire. David Burke, à l'Université de Sydney, puis nous-mêmes, dans les années 1980, avons démontré, grâce à des enregistrements directs de l'activité de fibres sensorielles issues des fuseaux neuromusculaires, que les vibrations tendineuses stimulent spécifiquement les terminaisons nerveuses sensibles à l'allongement des muscles, et que la fréquence des signaux émis par chaque fibre est, jusqu'à environ 100 hertz, proportionnelle à celle du stimulus vibratoire.

Les vibrations du tendon constituent alors un leurre sensoriel grâce auquel on induit, en l'absence de mouvement, des messages qui ne sont normalement émis vers le cerveau que lorsque le sujet bouge réellement. Ces sensations illusoire de mouvement concernent les membres ou le corps tout entier selon les muscles stimulés et leur nombre, et leur vitesse est toujours relativement lente (rotation d'une articulation de 5 à 20 degrés par seconde). Elles sont par ailleurs si réalistes qu'un sujet naïf attribue à l'expérimentateur la responsabilité du mouvement qu'il perçoit. Le sujet ressent toujours que le muscle vibré est étiré : bien que les messages sensoriels de tous les muscles soient simultanément pris en compte par le cerveau, ceux émis par les muscles étirés sont prépondérants.

L'existence de ces illusions de mouvement démontre que les messages musculaires sont une source prioritaire de notre perception des positions et des mouvements du corps, sur laquelle est fondée la représentation de celui-ci. En outre, la sensibilité musculaire peut assurer des fonctions mentales de haut niveau, telles la reconnaissance de formes et leur catégorisation. Avec Jean-Claude Gilhodes, nous avons donné à des sujets dont la main était totalement immobile l'illusion qu'ils dessinaient différentes formes géométriques (*voir la figure 4*). En variant la fréquence, la date d'intervention et

la durée des vibrations appliquées aux quatre groupes musculaires du poignet, nous avons créé des sensations de dessin de droites d'orientation variée et de figures géométriques (carrés, rectangles, triangles, cercles ou ellipses).

Ainsi, la vibration isolée des muscles fléchisseurs de la main évoque une sensation de mouvement de celle-ci vers le haut, et celle des adducteurs une sensation de mouvement de la main vers la gauche (pour la main droite), orthogonale à la précédente. La stimulation conjointe de ces deux muscles crée l'illusion d'un seul mouvement, de direction intermédiaire aux deux précédents : en oblique, vers le haut et vers la gauche.

Les sujets reconnaissent et nomment sans difficulté les formes qu'ils ont l'illusion de dessiner : le cerveau intègre donc des messages musculaires multiples, afin d'en extraire perceptivement une forme motrice unique. Nous décrivons cette intégration à l'aide de vecteurs. Chaque muscle engendre, au cours de l'exécution d'un mouvement, un message sensitif à l'origine de ce que l'on pourrait appeler une sensation élémentaire, que nous représentons par un vecteur dont l'origine est l'extrémité du segment mobilisé, dont la direction est celle du mouvement qui allongerait ce muscle et dont la longueur est fonction de la vitesse du mouvement. Lorsque plusieurs muscles sont stimulés en même temps, toutes les sensations élémentaires sont « combinées » en une seule par le système nerveux. Le vecteur somme de tous les vecteurs correspondant aux sensations élémentaires, issus de chacun des muscles concernés, décrit à chaque instant la direction et la vitesse de la trajectoire perçue.

Or, on a découvert, chez le singe, des populations cellulaires situées dans les aires corticales pariétales postérieures qui codent les caractéristiques cinématiques du mouvement sous forme vectorielle. Ces aires sont abondamment innervées par des fibres d'origine musculaire dont la distribution sur le cortex présente des analogies avec l'organisation du corps lui-même : il est donc tentant de considérer que c'est dans ces aires cérébrales que le traitement des messages musculaires permet l'émergence de nos sensations de mouvement. Cette analyse rejoint, au moins pour l'action, ce qu'écrivait Maurice Merleau-Ponty en

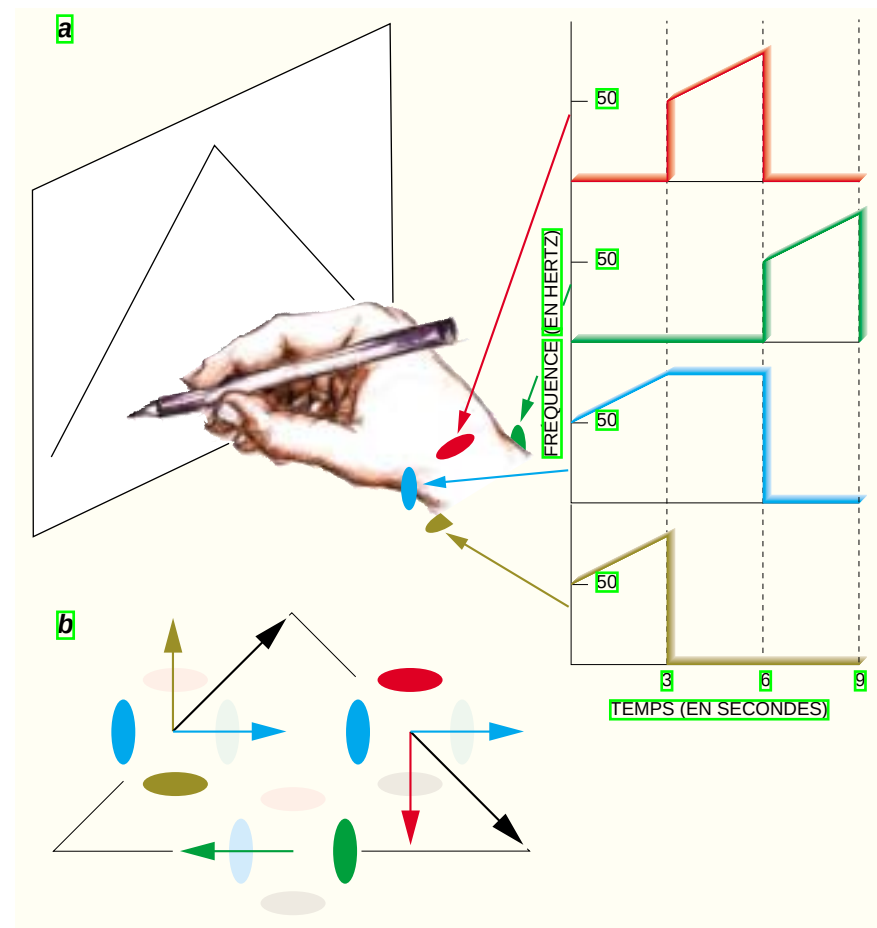
1945 : « L'esprit n'est pas ce qui descend dans mon corps mais ce qui en émerge. »

Nous voyons avec nos muscles

Au delà de sa contribution à la connaissance de soi, la sensibilité des muscles participe à l'exploration de l'environnement grâce aux actions que nous réalisons. Les « actions perceptives », qui orientent et guident nos organes des sens vers leur stimulus, influencent profondément le traitement des messages sensoriels : ainsi, le système nerveux central traite-t-il conjointement les informations visuelles et les informations musculaires nécessairement associées à l'action de voir. Comment pourrions-nous localiser une cible visuelle dans l'espace sans que le système nerveux soit précisément informé du lieu où se trouve le corps et, notam-

ment, l'œil ? James Lackner, de l'Université de Brandeis, l'a démontré en plaçant, dans l'obscurité, une lumière à l'extrémité du doigt immobile d'un sujet, puis en stimulant par vibration les muscles triceps ou biceps du bras correspondant : en même temps qu'il ressent un mouvement de son bras, le sujet a l'illusion que la lumière se déplace vers lui ou s'éloigne de lui.

En outre, la sensibilité musculaire peut influencer l'interprétation par le cerveau de ce que nous voyons sans que nous percevions aucun mouvement. Avec Régine Roll et Jean-Luc Velay, nous avons présenté une cible ponctuelle immobile sur un écran en face des yeux d'un sujet immobile. La vibration des muscles inférieurs des yeux, de la partie antérieure du cou ou même des chevilles (qui, lorsque le sujet a les yeux bandés, lui donne l'illusion d'un basculement vers l'arrière) donne au sujet l'illusion d'un déplacement de la cible



4. LE TRACE VIRTUEL d'un dessin, ici un triangle, est ressenti par une personne dont on stimule par vibration les différents muscles du poignet en suivant une séquence bien définie (a). Le sujet reconnaît la forme tracée : le cerveau interpréterait perceptivement les signaux émis par les différents muscles comme des vecteurs, dont l'origine est l'extrémité de la main, dont la direction est perpendiculaire au muscle vibré et dont la longueur est proportionnelle à la vitesse du mouvement (b). La direction globale du mouvement à un instant donné correspond à la somme de tous ces vecteurs.

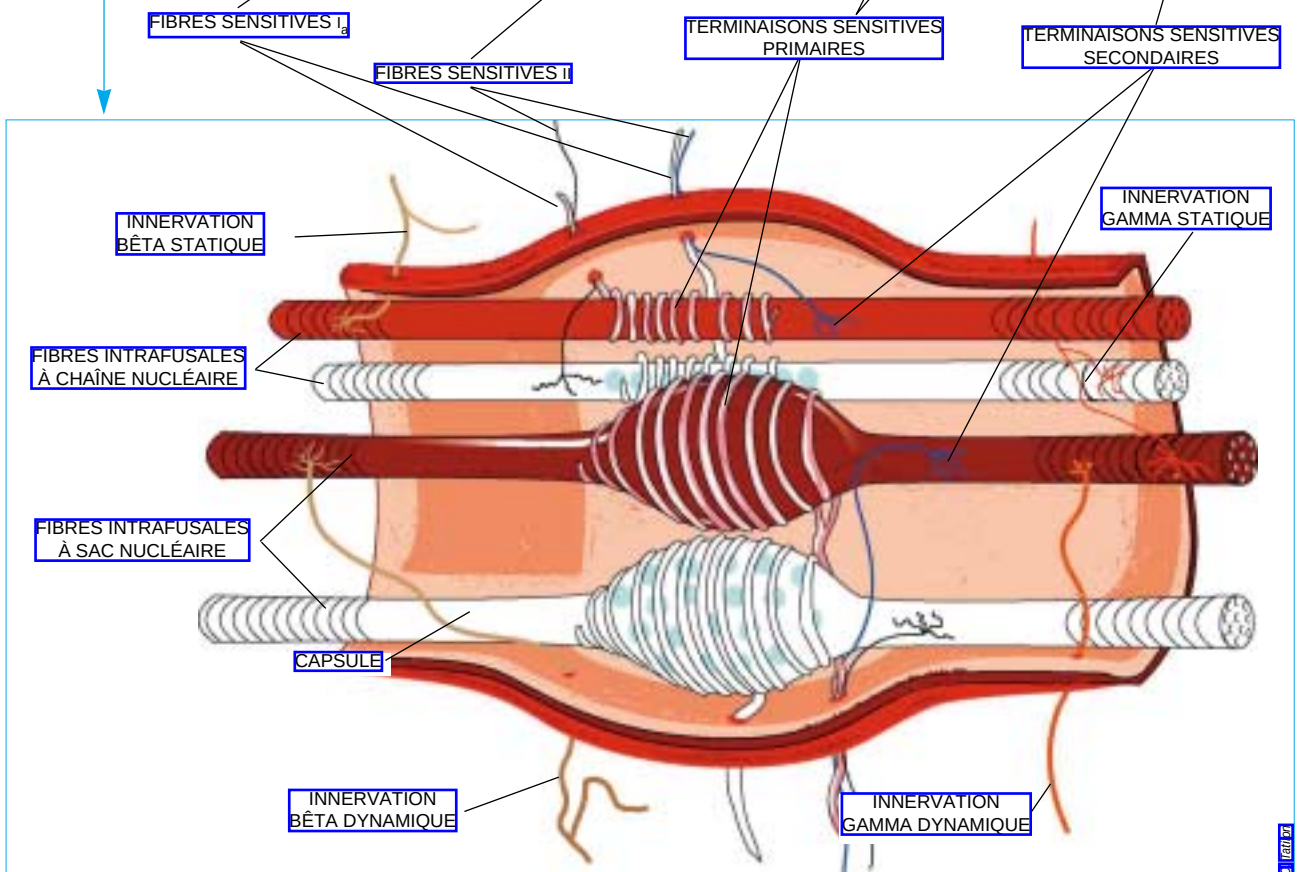
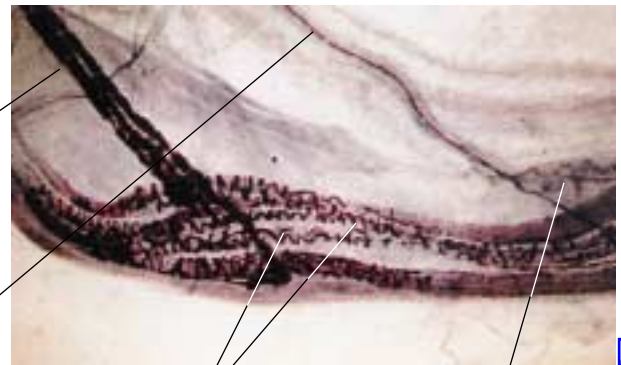
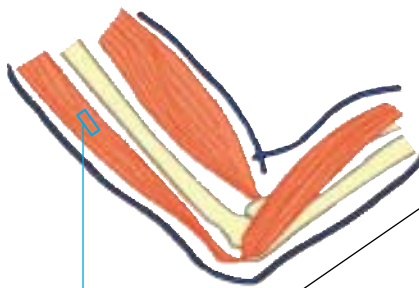
Les capteurs musculaires

Les fibres musculaires sensibles, dites fibres intrafusales, sont regroupées en fuseaux à l'intérieur des muscles. Leur partie centrale, renflée, est entourée d'une capsule qui contient un liquide visqueux. Les noyaux cellulaires (*en bleu sur le dessin*), regroupés dans la partie équatoriale, sont disposés de deux façons : à la manière des grains d'un chapelet (fibres à chaîne nucléaire) ou sous la forme d'un amas central (fibres à sac nucléaire). Au contraire des fibres musculaires motrices, entièrement contractiles, les fibres intrafusales ne peuvent se contracter qu'à leurs extrémités.

Ces fibres intrafusales sont innervées par deux types de terminaisons nerveuses sensibles : les terminaisons primaires entourent leur zone équatoriale à la manière d'anneaux spiralés ; les terminaisons secondaires forment des contacts en arborisations spiralées ou en bouquets près des zones équatoriales des fibres intrafusales.

Des fibres nerveuses dites I_a , de grand diamètre et dans lesquelles l'influx nerveux se déplace à grande vitesse (100 à 120 mètres par seconde) sont issues des terminaisons primaires ; des fibres II, dont la vitesse de conduction est plus faible (50 à 70 mètres par seconde) proviennent des terminaisons secondaires (la photographie montre ces structures, grossies environ 130 fois, dans une coupe musculaire de chat). Les terminaisons primaires indiquent mieux les changements de longueur du muscle que les terminaisons secondaires, plus sensibles aux états statiques.

Les extrémités des fibres intrafusales, qui peuvent se contracter, portent des terminaisons nerveuses issues de neurones moteurs. Leur activation augmente la sensibilité des terminaisons primaires et secondaires à la détection des longueurs (innervation gamma et bêta statique) ou à la détection des variations de longueur (innervation gamma et bêta dynamique).



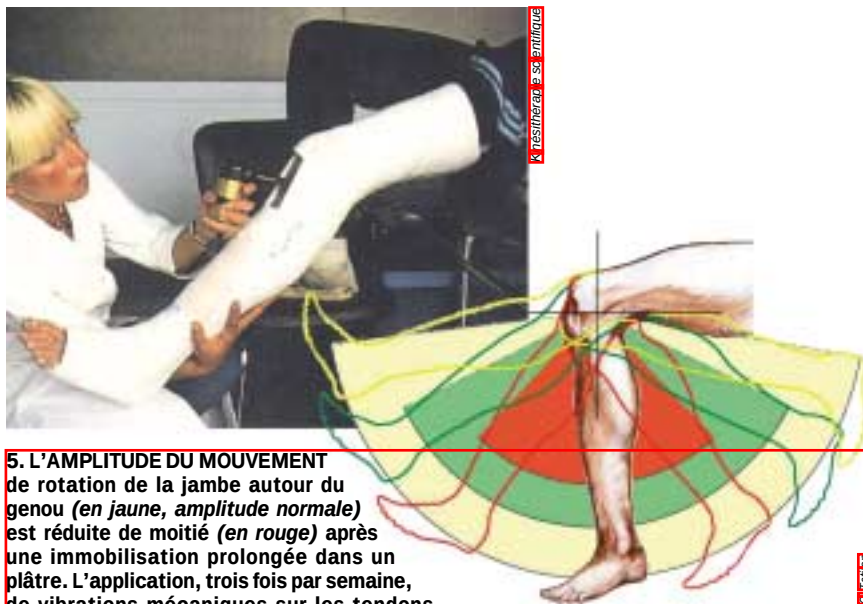
vers le haut. Si, dans ces mêmes conditions, on demande au sujet de pointer la cible du doigt, il commet une erreur de localisation, dont la direction et l'amplitude varient avec les muscles vibrés et la fréquence de la vibration. Enfin, quand les muscles oculaires externes des deux yeux sont vibrés simultanément, le sujet a l'impression que la cible se rapproche de lui : les messages évoqués simulent ceux qui sont normalement associés à la convergence des yeux lorsque nous suivons du regard un objet qui se rapproche de nous.

À l'appui de cette description, Yves Trotter, de l'Université de Toulouse, a récemment observé, chez le singe, que l'activité de certains neurones du cortex visuel dépend de l'angle de convergence des deux yeux. Des messages provenant des récepteurs sensoriels des muscles extra-oculaires arriveraient donc directement dans le cortex visuel et contribueraient à la représentation des distances et du monde en trois dimensions.

La rétine est portée par un ensemble de segments corporels mobiles et emboîtés que sont successivement l'œil, la tête, le tronc et les jambes : les signaux proprioceptifs, issus de toute la chaîne des muscles mobilisant ces segments, «disent» à tout instant au cerveau quelle est l'attitude ou quels sont les mouvements du corps, et lui permettent le calcul de la position absolue de la rétine dans l'espace. L'ensemble des informations issues des muscles, des pieds qui ancrent le corps sur le sol à ceux des yeux, qui ouvrent le corps sur le monde, (qu'avec R. Roll nous avons nommé «chaîne proprioceptive») est indispensable à la connaissance, à chaque instant, de notre position dans l'espace.

Nous touchons avec nos muscles

La sensibilité musculaire est aussi associée à la sensibilité cutanée. D'abord, elle constitue l'un des fondements du toucher actif. Ensuite, des illusions révèlent de nombreuses interactions entre informations tactiles et informations musculaires. Ainsi, lorsque la main d'un sujet est libre de tout contact, la vibration de ses muscles fléchisseurs évoque une sensation d'extension de celle-ci. Si le sujet est debout, le bras horizontal dans le plan du corps, la main posée à plat contre un mur, les doigts horizontaux, la même vibration évoque une sensation d'inclinaison du corps entier,



5. L'AMPLITUDE DU MOUVEMENT de rotation de la jambe autour du genou (en jaune, amplitude normale) est réduite de moitié (en rouge) après une immobilisation prolongée dans un plâtre. L'application, trois fois par semaine, de vibrations mécaniques sur les tendons des muscles situés de part et d'autre de cette articulation, à travers des fenêtres ménagées dans le plâtre (photographie), en créant des sensations de mouvement de la jambe, permet que l'amplitude de la rotation atteigne 80 pour cent (en vert) dès l'ablation du plâtre. Les illusions de mouvement aideraient le cerveau à conserver en mémoire une «image» du mouvement, qu'il a tendance à oublier pendant l'immobilisation.

dans une direction qui dépend de l'orientation de la main sur le mur : vers l'avant si les doigts le sont aussi, et vers l'arrière dans le cas contraire.

Comme pour la vue, un même message sensoriel d'origine musculaire est interprété par le système nerveux de manière différente selon le contexte dans lequel il est reçu et analysé : ici, en fonction de la posture du sujet et des informations tactiles qui lui sont associées. Cette caractéristique est probablement l'une des bases de la traduction des messages sensitifs en informations utilisables par le cerveau.

L'association, par le cerveau, des diverses informations qui lui parviennent conduit aussi parfois à de curieuses sensations. Ainsi, J. Lackner a appliqué une vibration sur le muscle biceps de sujets aux yeux bandés auxquels il avait demandé de se pincer le nez entre le pouce et l'index. Après quelques secondes, la majorité des sujets, à l'instar de Pinocchio, ont senti que leur nez s'allongeait, jusqu'à atteindre, chez certains d'entre eux, une trentaine de centimètres (voir la figure 2)... Quelques autres sujets sentaient un allongement de leurs doigts et de leur nez ; d'autres enfin, seulement de leurs doigts. Un message issu du muscle biceps indiquait au système nerveux que le bras s'étendait, alors que le contact tactile entre les doigts et le nez restait constant : les systèmes de traitement cérébraux se sont accordés sur

l'interprétation la plus plausible, bien qu'étrange, permettant de concilier ces deux messages contradictoires.

En interagissant avec les informations tactiles, la sensibilité musculaire code aussi les déplacements de la totalité du corps dans l'espace. Un paraplégique assis dans un fauteuil roulant se déplace en agissant sur les roues latérales par des mouvements alternés de flexion et d'extension des bras. Nous avons immobilisé le fauteuil et nous avons demandé au patient de poser ses deux mains sur les roues, puis nous avons stimulé, par vibration, alternativement les muscles biceps et triceps des deux bras : le patient rapporte une puissante sensation de déplacement vers l'avant de lui-même et de son fauteuil roulant. De la même façon, une personne valide assise sur une chaise de bureau à roulettes sent son corps se déplacer vers l'arrière avec la chaise si l'on stimule les muscles normalement allongés lors d'une extension des jambes.

Ces illusions de mouvement, où les sensibilités musculaire, visuelles et tactiles interagissent, montrent que l'interprétation par le cerveau des informations neuromusculaires dépend de la posture corporelle et des interactions avec l'environnement. L'une des contraintes environnementales les plus présentes sur Terre est la gravité : dès la naissance, le dialogue entre le corps, le cerveau et l'environnement intègre cet invariant physique. Le système ner-

veux met en place avec difficulté, au cours des premières années de la vie, les puissants mécanismes réflexes qui permettent à l'individu de se tenir debout, en luttant contre la gravité, et les mécanismes perceptifs qui l'informent sur la posture de son corps par rapport à la verticale.

Le cerveau s'adapte à la gravité

Que se passe-t-il lorsque cette référence fondamentale est supprimée? Les vols spatiaux habités, qui placent le corps en microgravité, où se tenir ou savoir que l'on est debout perd tout sens, révèlent que le cerveau apprend à reconnaître un corps devenu non pesant et désorienté, et reconstruit, en tenant compte des nouvelles propriétés biomécaniques du corps, la quasi-totalité des commandes nerveuses motrices. Il réaffecte aussi les signaux sensoriels à la gestion des nouvelles habiletés motrices acquises par le corps.

Avec R. Roll et J.-C. Gilhodes, et avec nos collègues russes Konstantin Popov et Victor Gurfinkel, du Laboratoire des contrôles moteurs de Moscou, nous avons étudié les modifications des sensations posturales du corps et des réflexes d'équilibration, au cours de séjour en microgravité de spationautes français (du Centre national d'études spatiales) et russes dans la station orbitale *MIR*. Au sol, on crée, par vibration tendineuse des muscles de la cheville d'un sujet debout, des illusions d'inclinaison du corps ou des ajustements posturaux orientés vers l'avant ou vers l'arrière. Or, après seulement quelques jours passés en microgravité, les illusions de mouvement du corps et la régulation de la posture debout sont considérablement atténuées, voire supprimées.

En revanche, les astronautes rapportent qu'ils apprennent à utiliser leurs pieds pour propulser leur corps d'un point à l'autre de la station orbitale ou pour le stabiliser lorsqu'ils ont des mani-

pulations précises à effectuer. Ces nouveaux apprentissages moteurs donnent une nouvelle signification aux messages en provenance des muscles de la cheville : après environ une semaine en microgravité, la vibration des deux muscles jambiers antérieurs, qui, sur Terre, donne au sujet l'illusion que son corps s'incline vers l'arrière, crée une illusion de déplacement de l'ensemble du corps suivant son axe longitudinal.

Pour des séjours brefs ou de moyenne durée dans l'espace, le nouveau modèle interne du corps, construit sur la base des actions apprises en microgravité, coexiste avec le modèle antérieur adapté à la gravité. En restituant artificiellement en orbite, à l'aide de puissants tendeurs élastiques, des informations de résistance à la gravité sous la plante des pieds et dans les muscles des jambes, l'illusion qui prévalait sur Terre réapparaît, ainsi que les réponses motrices qui régulaient la posture avant le vol.

Ces expériences sont aussi l'occasion de vérifier que la connaissance intime que nous avons de notre corps dépend de notre environnement. Lorsqu'on les interroge, au retour d'un séjour de plusieurs semaines dans la station *MIR*, la plupart des spationautes déclarent préférer leur corps pesant et orienté dans le champ de gravité terrestre à celui dépourvu de poids et libéré des contraintes de la pesanteur. L'expression de cette préférence ne traduirait-elle pas une certaine expérience de dissociation passagère entre le corps et la représentation que nous nous en faisons, le résultat de l'action étant différent de celui que nous attendons, comme cela se produit lors d'atteintes neurologiques? Privé des références fondamentales grâce auxquelles il se reconnaît en permanence, le corps renvoie de lui-même une image incertaine qui conduit momentanément le sujet à douter de son appartenance à ce même corps. Comment habiter un corps imprévisible? Cette «incertitude corporelle» disparaît toutefois lors des séjours assez longs et le corps apprend à être et à se mouvoir dans ce nouvel environnement et, ce faisant, permet au spationaute de s'y «réincarner» pleinement.

Entretenir l'illusion, à défaut de mouvement

Sur Terre même, les ensembles neuro-
naux de l'écorce cérébrale se modifient en permanence au cours de nos

Le contrôle moteur de la sensibilité des récepteurs musculaires

Les fibres musculaires intrafusales, qui portent les terminaisons nerveuses sensibles à la longueur et à l'allongement des muscles, reçoivent aussi sur leurs extrémités contractiles une innervation motrice. Certains axones provenant de petits neurones moteurs (motoneurones gamma) se terminent exclusivement sur les extrémités des fibres intrafusales : c'est l'innervation fusimotrice gamma. D'autres, provenant de motoneurones plus grands, innervent à la fois les fibres musculaires intrafusales et les fibres musculaires squelettiques : c'est l'innervation squeletto-fusimotrice bêta, découverte au laboratoire d'Yves Laporte, à Toulouse, dans les années 1960.

La stimulation de ces motoneurones, gamma ou bêta, entraîne une contraction des extrémités des fibres intrafusales. Celle-ci active les terminaisons sensorielles du fuseau neuromusculaire et exacerbe leurs réponses à leur stimulus habituel. La stimulation des motoneurones bêta entraîne aussi la contraction des fibres musculaires extrafusales, ce qui a pour conséquence d'adapter automatiquement la sensibilité du capteur sensoriel à la nouvelle longueur du muscle. On distingue en outre des motoneurones gamma et bêta statiques et dynamiques, selon que leur activation sensibilise les terminaisons nerveuses sensibles à la

détection préférentielle des longueurs ou des allongements musculaires.

De nombreux travaux ont par ailleurs montré que les neurones fusimoteurs et squeletto-fusimoteurs subissent des contrôles très divers d'origine sensorielle ou cérébrale. Avec Edith Ribot et Jean-Pierre Vedel, nous avons directement enregistré l'activité de motoneurones gamma chez l'homme : elle est quasi permanente en condition de repos, et ces motoneurones sont très sensibles à des événements de type émotionnel, qu'ils proviennent du sujet lui-même ou de son environnement, telle l'occurrence d'un bruit inopiné.

Ce résultat accrédite l'idée que nos états mentaux ont des conséquences sur la disponibilité de nos muscles vis-à-vis des commandes intentionnelles. Il constitue, en outre, le support neurobiologique d'un ensemble d'observations empiriques selon lesquelles nos postures et nos mouvements sont le reflet de nos états mentaux. Ces données renforcent enfin la théorie des «marqueurs somatiques», proposée par la psychophysiologie et réactualisée récemment sur la base d'observations neuropsychologiques par Hanna et Antonio Damasio, selon laquelle le fonctionnement de la plupart de nos organes, et notamment de ceux constituant notre système moteur, porterait l'empreinte directe de nos émotions.

apprentissages successifs, après la disparition accidentelle d'une partie du corps ou, plus banalement, lorsqu'un membre est immobilisé durablement. Ainsi, après l'ablation du plâtre qui immobilisait un membre, à la suite d'une fracture osseuse ou d'une entorse, une longue période de rééducation est nécessaire pour que les mouvements du membre retrouvent leur amplitude antérieure. Cette ankylose articulaire est en général imputée à des difficultés biomécaniques périphériques affectant les tissu articulaire et musculaire. Mais nous avons montré, avec Henri Neiger, de l'Université de Rennes, et J.-C. Gilhodes, qu'elle est aussi en partie d'origine cérébrale : l'immobilité d'un membre prive le système nerveux central de toutes les informations sensorielles habituellement associées à sa mobilisation et «efface», dans le cerveau, l'image même du mouvement.

Nous avons mis au point un traitement qui réduit, voire supprime, l'ankylose dès l'ablation du plâtre, en entretenant la mémoire du mouvement dans le cerveau des patients à l'aide d'illusions (voir la figure 5). Des fenêtres sont ménagées dans le plâtre par le chirurgien à hauteur des tendons musculaires, et l'on applique, plusieurs fois par semaine, des stimulation vibratoires alternativement sur les muscles agonistes et antagonistes. On crée ainsi de puissantes sensations de mouvement du membre immobilisé, qui entretiennent l'activité des récepteurs musculaires, des voies sensitives et des structures centrales chargées d'accueillir et de traiter ces messages.

Avec Philippe Lacert et Christine Redon, à l'Hôpital de Garches, nous avons utilisé la même méthode pour «apprendre» de nouvelles postures

aux muscles et au cerveau. La stimulation, par vibration, des muscles quadriceps a permis d'obtenir de spectaculaires redressements de l'ensemble tête-tronc chez certains enfants infirmes moteurs cérébraux souffrant de troubles posturaux. Après plusieurs mois, l'«image» de cette nouvelle posture semble ancrée dans le système nerveux des enfants, qui la conservent en l'absence de stimulation. Le redressement et la meilleure stabilisation de l'ensemble tête-tronc redonne à la vision de ces enfants son rôle d'exploration de l'environnement et de guidage du geste, et leur permet une meilleure maturation perceptive, et motrice.

Enfin, la restitution au corps de sensations associées à des mouvements oubliés par le cerveau ou inconnus de lui laisse entrevoir d'autres applications séduisantes : on faciliterait par exemple l'apprentissage de gestes sportifs ou techniques. Sur un mode plus ludique, la manipulation du sens musculaire augmenterait fortement le réalisme des installations de réalité virtuelle, limitées actuellement à la vue, à l'ouïe et au toucher : en plus d'un visio-casque et d'un gant tactile à retour d'effort, pourquoi ne pas équiper les explorateurs de ces mondes numériques de vibreurs placés sur les tendons musculaires ? Leur activation coordonnée sur les divers muscles permettrait, par exemple, lors d'une promenade virtuelle sur le lac du Bourget, de voir le lac et ses environs, d'entendre le clapotis de l'eau, mais aussi de ramer virtuellement. Pour rejoindre le débarcadère qui se trouve à droite, il suffirait alors de stopper les vibreurs du bras droit, puis du bras gauche. Il ne reste plus qu'à débarquer...

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES 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. 114

Jean-Pierre ROLL est professeur à l'Université d'Aix-Marseille I et dirige le Laboratoire de neurobiologie humaine, UMR 6562 du CNRS.

O. SACKS, *L'homme qui prenait sa femme pour un chapeau*, Éditions du Seuil, 1988.
R. ROLL, J.-L. VELAY et J.-P. ROLL, *Eye and Neck Proprioceptive Messages Contribute to the Spatial Coding of Retinal Input in Visually-oriented Activities*, in *Experimental Brain Research*, vol. 85, pp. 423-431, 1991.

J.-P. ROLL et R. ROLL, *Le sentiment d'incarnation : arguments neurobiologiques*, in

Revue de médecine psychosomatique, vol. 35, pp. 75-90, 1993.

J.-P. ROLL, *Sensibilités cutanées et musculaires*, in *Traité de psychologie expérimentale*, sous la direction de M. Richelle, J. Requin et M. Roberts, Presses Universitaires de France, pp. 483-542, 1994.
A. DAMASIO, *L'erreur de Descartes*, Éditions Odile Jacob, 1996.

S.C. GANDEVIA, *Kinaesthesia : Role for Afferent Signals and Motor Commands*, *Handbook of Physiology*, 1996.

J. RIVOLIER, *L'homme dans l'espace*, Presses Universitaires de France, 1997.

Comment les femelles choisissent leur partenaire

LEE ALAN DUGATKIN • JEAN-GUY GODIN

Les femelles s'accouplent souvent avec les mâles les plus flamboyants. Leur choix semble résulter d'un mélange d'instinct et d'imitation.

Qu'est-ce qu'un séducteur? Don Juan ou James Bond en sont des archétypes : ils sont malins, désinvoltes, téméraires et tapageurs ; chevauchant un cheval fougueux ou conduisant une voiture de sport puissante, ils sont irrésistibles. Dans de nombreuses espèces animales, les mâles les plus prétentieux attirent les femelles : les mâles qui ont du succès – ceux qui produisent la descendance la plus nombreuse – sont souvent plus grands et plus colorés, ou « s'affichent » par des comportements de parade plus vigoureux.

Les femelles sont généralement plus regardantes que les mâles, en matière de partenaire sexuel, parce que les ovules sont plus rares que les spermatozoïdes : pour laisser une descendance qui a de bonnes chances de survie, une femelle doit bien choisir son partenaire.

Le premier, Charles Darwin proposa que la compétition pour les partenaires sexuels joue un rôle important dans le succès de la reproduction, processus qu'il nomma la sélection sexuelle. Dans son livre publié en 1871, *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*, il supposait que tout caractère qui favorise l'accouplement et la reproduction devait s'imposer dans une population, parce que les mâles porteurs de tels caractères produiraient plus de descendants que les autres. Si le caractère est héréditaire, les descendants qui le possèdent ont à leur tour plus de succès reproductif que leurs rivaux, et ainsi de suite, de génération en génération. Darwin proposait, en outre, que certains de ces caractères avaient évolué parce qu'ils attiraient l'attention des femelles.

L'idée que les femelles choisissent activement leurs partenaires sexuels fut controversée dès l'origine, peut-être parce que les combats entre mâles sont des comportements plus spectaculaires que le choix des femelles : les mâles se battent parfois jusqu'à la mort pour gagner le privilège de s'accoupler avec les femelles, alors que ces dernières ne manifestent parfois leurs choix que par le résultat de ceux-ci.

La voie de l'exagération

Au cours des 25 dernières années, les éthologues se sont beaucoup intéressés au choix du partenaire sexuel par les femelles. Ce choix est actif dans de nombreuses espèces, notamment celles où les mâles sont moins agressifs et se différencient par leurs caractères sexuels secondaires, tels le plumage ou les parades nuptiales. Cependant les biologistes débattent encore de la raison et des modalités du choix des femelles.

Une femelle qui choisit activement son partenaire doit effectuer deux opérations. D'abord, elle doit chercher les mâles, ce qui est difficile quand la population est éparse ou quand des prédateurs menacent. Puis, quand elle a rencontré un mâle, elle doit décider si elle l'accepte comme partenaire sexuel. Cette décision impose souvent un peu

1. CHEZ LES GUPPYS de la Trinité, les femelles choisissent le partenaire sexuel. Elles préfèrent généralement les mâles qui ont une couleur plus vive ou plus orange (en haut à droite), mais elles sont sensibles à la pression sociale : quand une femelle plus âgée affiche une préférence pour un mâle plus terne, une jeune femelle imite parfois son aînée.

ROBERTO OSTI

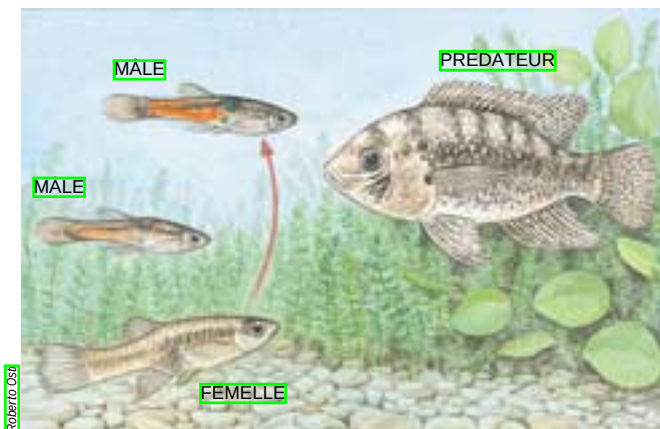
de «lèche-vitrines» : dans certains systèmes d'accouplement, les femelles rencontrent un groupe de mâles disponibles et comparent sur place. Par exemple, au début du printemps, les mâles de la grousse *Centrocerus urophasianus* se rassemblent côte à côte dans des arènes temporaires d'accouplement, que l'on nomme des leks, où ils se pavent devant les femelles. Les femelles observent les parades d'un grand nombre de mâles avant de s'accoupler avec celui qu'elles élisent. Elles quittent ensuite le

lek pour faire un nid où les jeunes seront élevés. De tous les mâles potentiels d'un lek, seul un petit nombre de favoris intéressent les femelles.

Dans d'autres cas, les mâles ne sont pas réunis ainsi : les femelles ne rencontrent qu'un seul mâle à la fois, et elles ont plus de difficultés à comparer, car elles doivent se souvenir des caractéristiques d'individus préalablement rencontrés. Theo Bakker et Manfred Milinski, de l'Université de Berne, ont démontré que les femelles

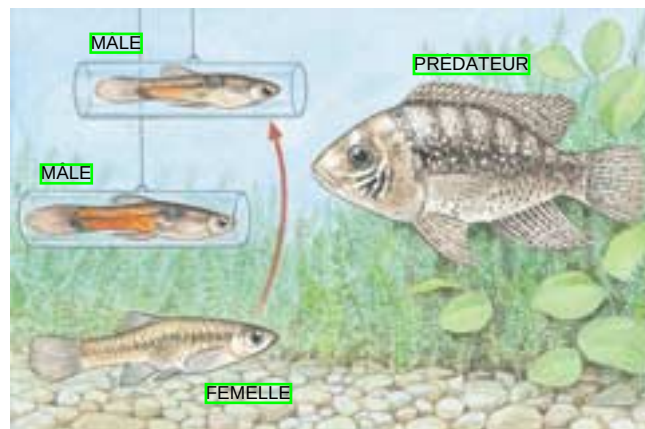
de l'espèce d'épinoches *Gasterosteus aculeatus* fondent le choix de leur partenaire sur l'attrait relatif des mâles présents par rapport à ceux qui avaient été antérieurement rencontrés : elles s'intéressent davantage aux mâles dont la livrée nuptiale rouge est plus vive que celle des mâles rencontrés précédemment, et elles rejettent les prétendants moins vifs que ceux qui se sont déjà présentés.





ROBERTO OSSI

2. LES MALES GUPPYS inspectent les prédateurs, et les femelles guppys examinent les mâles. Lorsqu'un prédateur – tel le cichlide illustré ici – approche d'un banc de guppys, une paire de mâles nage souvent vers lui pour évaluer le danger. Ce comportement courageux semble attirer les femelles : elles choisissent comme part-



naire le mâle qui s'approche le plus du prédateur (à gauche). Bien que les mâles les plus courageux soient souvent les plus colorés, les femelles choisissent des mâles moins voyants quand ils sont plus courageux (à droite). Au laboratoire, des conteneurs spéciaux permettent la mesure de cet effet de sélection sexuelle.

Dans le cas des grouses comme dans celui des épinoches, les femelles sélectionnent généralement le mâle le plus voyant. Plus exactement, les femelles préfèrent les mâles dont les caractères stimulent le plus fortement leurs sens. Par exemple, lorsqu'elles ont le choix, les femelles de l'espèce de rainettes *Hyla cinerea* sont préférentiellement attirées par les mâles qui appellent le plus fort et le plus fréquemment ; les femelles de l'espèce de poisson *Poecilia reticulata* par les mâles les plus colorés ; et les femelles du canard colvert *Anas platyrhynchos* par les mâles qui leur font la cour le plus ardemment. En raison de cette sélection sexuelle, les caractères sexuels secondaires des mâles s'accroissent progressivement.

Pourquoi la sélection ?

Pourquoi les femelles de certaines espèces choisissent-elles activement leurs partenaires ? Quand le choix des femelles est-il apparu ? Comment a-t-il évolué ? Quels en sont les avantages et les coûts pour les femelles ?

Dans certains cas, les femelles s'accouplent plutôt avec les mâles bruyants ou vivement colorés, parce qu'ils sont faciles à localiser : la diminution du temps nécessaire à la localisation d'un mâle diminue la probabilité que la femelle soit tuée par un prédateur. Toutefois, pour nombre d'espèces, le choix du partenaire est probablement plus complexe. Pour de nombreux oiseaux et mammifères, la sélection naturelle semble favoriser le choix de mâles qui apportent aux femelles un bénéfice direct en aug-

mentant leur fécondité ou la survie de leurs jeunes. Ces bénéfices peuvent être la nourriture, un nid protégé ou, même, la perspective d'un moins grand nombre de parasites.

Au terme d'une longue étude, Anders Møller, de l'Université Paris VI, a observé que les femelles de l'hirondelle *Hirundo rustica* s'accouplent plutôt avec des mâles dont les plumes de la queue sont allongées. Or les mâles à longue queue ont moins de poux que les mâles à queue courte. Comme les poux sautent d'un oiseau à l'autre, les femelles qui s'accouplent avec des mâles à longue queue évitent les infections transmises par ces parasites et engendrent des jeunes en meilleure santé que les femelles qui s'accouplent avec les mâles à queue courte ; comme les mâles à longue queue ont en outre une résistance génétique aux parasites, les jeunes qui en descendent ont également les gènes de résistance. Ce type d'avantages a été peu étudié.

Lorsque les mâles ne confèrent aucun avantage direct, telles la nourriture ou la protection, les femelles devraient s'accoupler avec les mâles qui ont les meilleurs gènes. Comment les reconnaissent-elles ? Et pourquoi les mâles ne trichent-ils pas en arborant des caractères associés à de tels gènes sans posséder ces gènes favorables ? En 1975, Amotz Zahavi, de l'Université de Tel Aviv, a proposé que les femelles n'évaluent que les caractères qui sont des indicateurs fiables de la valeur sélective du mâle ; les indicateurs fiables, qui sont « coûteux » à produire et à maintenir, devraient être associés aux mâles les plus aptes.

En étudiant les comportements d'évitement des prédateurs chez des poissons (les guppys de la Trinité), nous avons récemment obtenu des résultats qui semblent confirmer cette idée. Lorsqu'un prédateur est à proximité d'un banc de guppys, les mâles s'approchent prudemment, souvent par deux, de la menace potentielle pour l'« inspecter ». Des comportements risqués de ce type ont été observés chez de nombreuses espèces : les éthologues ont supposé que les mâles courageux approchent les prédateurs pour signaler leur vigueur aux femelles, parce que, lorsqu'aucune femelle n'est présente, aucun mâle ne joue les héros.

Nous avons supposé que le courage démontré lors de l'inspection du prédateur attire les femelles parce que c'est un indicateur fiable de l'adaptation des mâles. Des poissons trop faibles, qui s'aventureraient près du prédateur, risqueraient trop d'être mangés. À l'aide de petits récipients, qui permettaient de placer des mâles à différentes distances d'un prédateur, nous avons découvert que les femelles préfèrent effectivement les mâles les plus intrépides. Ce courage semble corrélé à la couleur : les mâles qui nagent le plus près des prédateurs sont généralement les plus colorés. Dans la nature, les femelles ont progressivement acquis une préférence pour les mâles les plus tape-à-l'œil, parce que la couleur est un bon indicateur de la vigueur.

Une fois que les femelles ont exprimé une préférence pour un caractère, un processus d'escalade de la sélection peut se produire : en 1958, l'éthologue Ronald Fisher a proposé qu'un caractère mâle et la préférence

La femelle pour ce trait coévoluent. Par exemple, les femelles qui préfèrent s'accoupler avec des mâles de grande taille produiraient plutôt des descendants également plus grands, qui s'accoupleraient ; ainsi des caractères mâles s'exacerbent-ils, tandis que la préférence des femelles pour les mâles portant ces caractères se renforcerait.

Nombre d'éthologistes ont étudié l'escalade de la coévolution de la couleur orange des guppys mâles et de la préférence des femelles pour ce caractère particulier des mâles. Récemment Gerald Wilkinson et Paul Reillo, de l'Université du Maryland, ont encore mieux mis en évidence ce phénomène chez la mouche aux yeux pédonculés *Cyrtodiopsis dalmanni*. Dans cette espèce, les femelles s'accouplent plutôt avec des mâles dont les yeux sont à l'extrémité de longs pédoncules. En élevant sélectivement les mouches pendant 13 générations, G. Wilkinson et P. Reillo ont produit une lignée de mouches dont les mâles ont de longs pédoncules et une autre lignée dont les mâles ont de courts pédoncules. Les femelles de chaque lignée préféraient le caractère mâle sélectionné dans leur lignée spécifique : les femelles de la lignée à longs pédoncules préféraient les mâles à longs pédoncules, et les femelles de la lignée à pédoncules courts préféraient les mâles ayant de courts pédoncules. Autrement dit, la préférence des femelles coévoluait avec le caractère sélectionné chez les mâles.

Comment apparaissent les préférences relatives au choix des partenaires ? Dans certains cas, un biais sensoriel pour un caractère pourrait préexister chez les femelles, non pas parce qu'il révèle un avantage particulier des mâles, mais parce qu'il attire l'attention des femelles. Par exemple, les femelles de l'espèce de poissons *Xiphophorus helleri* préfèrent les mâles dont les nageoires caudales portent de longues « épées ». Bien que les mâles de l'espèce apparentée *Xiphophorus maculatus* ne possèdent aucune épée, Alexandra Basolo, de l'Université du Nebraska, a montré que, lorsqu'elle fixait des épées en plastique sur les nageoires des mâles, les femelles montraient un intérêt immédiat, fort et systématique pour les mâles porteurs de fausses épées : les femelles *Xiphophorus maculatus* avaient ainsi un goût inné pour les longues épées, bien que ces dernières ne révèlent rien

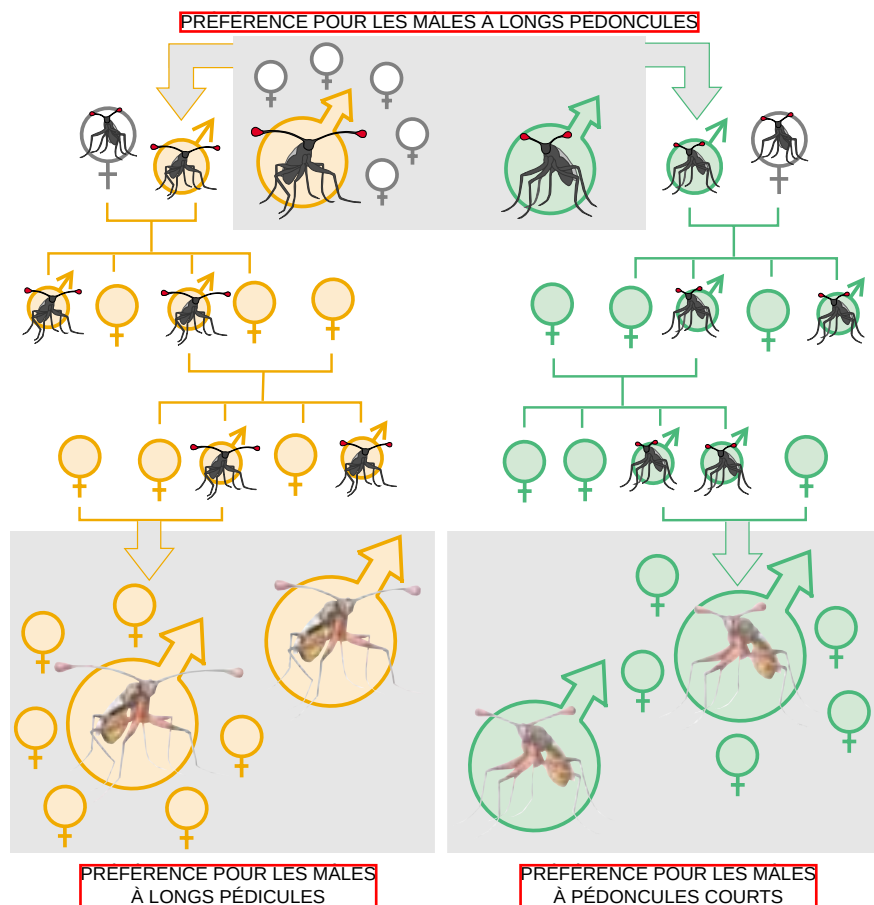
sur la constitution des mâles de leur espèce.

Ces formes d'évolution pourraient agir séparément ou en conjonction ; il est difficile de les dissocier expérimentalement. Les femelles guppys, par exemple, pourraient avoir un penchant pour les mâles orange, parce qu'une coloration vive est un indice de vigueur ou de bonne santé (les mâles dont les pigments sont le plus lumineux sont probablement bien alimentés).

Toutefois la préférence pourrait être apparue, parce que les femelles perçoivent mieux les couleurs d'une certaine longueur d'onde, puis s'être renforcée par un mécanisme d'escalade de l'évolution. Tous ces modèles supposent que la préférence des femelles est déterminée génétiquement. Des travaux récents indiquent cependant que des facteurs sociaux, comme l'imitation, déterminent également le choix des partenaires sexuels.

Les oiseaux et les poissons copieurs

Certains mâles ont toutes les femelles. Dans un lek de grouses, par exemple, le mâle principal capte jusqu'à 80 pour cent des possibilités d'accouplement. Est-il simplement irrésistible ? Ou les femelles tiennent-elles compte du choix des autres femelles lorsqu'elles sélectionnent leur partenaire ? Au début des années 1990, Jacob Höglund, Arne Lundberg, Rauno Alatalo et leurs collègues des universités d'Uppsala et de Jyväskylä ont commencé une étude détaillée de l'imitation dans le choix des partenaires chez la grouse noire *Tetrao tetrix*. À l'aide de leurres en peluche avec lesquels ils représentaient les femelles intéressées, les éthologistes ont montré que les femelles s'accouplaient préférentiellement avec les mâles qui avaient la préférence des autres femelles du même territoire.



3. UNE ESCALADE de sélection semble orienter les préférences sexuelles des mouches aux yeux pédonculés. Les femelles de cette espèce s'accouplent plutôt aux mâles qui présentent les plus longs pédoncules (en haut, à gauche). Cependant, lorsque les biologistes ont sélectionné deux lignées de mouches où les mâles ont des pédoncules respectivement longs (à gauche) et courts (à droite), ils ont observé que les préférences des femelles évoluaient avec la longueur des pédoncules des mâles. Les femelles de la lignée à longs pédoncules avaient une préférence pour les mâles dont les pédoncules étaient les plus longs (en bas, à gauche), tandis que les femelles de la lignée à pédoncules courts préféraient les mâles aux pédoncules les plus courts (en bas, à droite).

Pourquoi cette imitation? Apprend-elle aux femelles ce qu'il faut rechercher chez les mâles? Par une longue série d'expériences sur l'imitation dans le choix du partenaire chez les guppys, nous avons démontré que les jeunes

femelles copient plus souvent le choix de femelles plus âgées et plus expérimentées que les femelles âgées ne copient les jeunes. L'imitation semble avantageuse parce qu'elle fait gagner du temps: une femelle qui s'en remet

au jugement des autres choisit plus rapidement, de sorte qu'elle a plus de temps pour rechercher de la nourriture ou se cacher des prédateurs.

Pour les espèces dont les femelles s'imitent, dans quelle proportion le



En: Tel. P. P. Bauer, Bruce Coleman Inc.



Photo: Chris M. M. M. M.



Illustration: M. M. M. M.

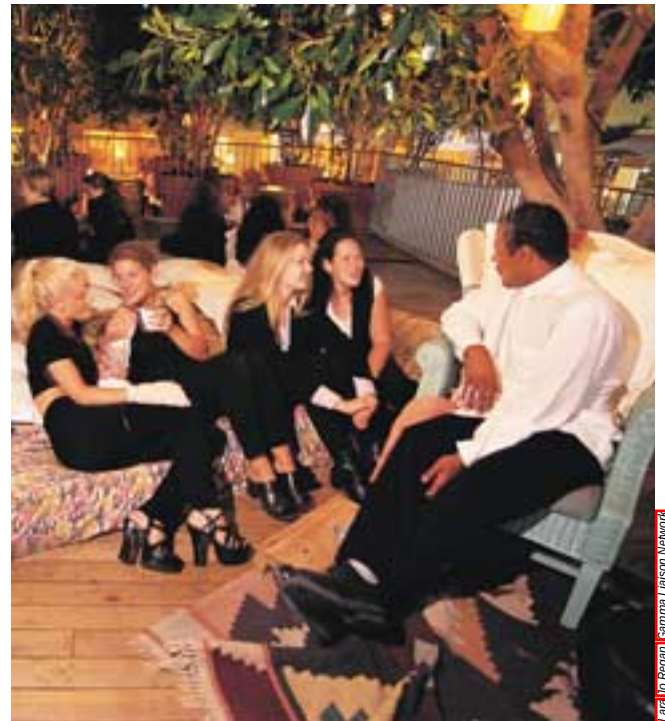


Photo: Emma Wilson Network

4. LA SÉLECTION SEXUELLE résulte de comportements variés. Pendant la saison des amours, les cerfs se disputent les femelles, de même que les mâles kangourous. Cependant, dans les espèces où le choix revient aux femelles, les mâles ont des caractères des-

tinés à attirer l'attention des femelles. Le paon se fait valoir par des couleurs spectaculaires et par un soin méticuleux. L'espèce humaine se distingue par sa culture, mais quelle est la part d'animalité en nous?

choix du partenaire repose-t-il sur l'instinct et dans quelle proportion repose-t-il sur l'imitation? Pour déterminer la contribution relative des facteurs génétiques et des facteurs sociaux qui interviennent dans le choix du partenaire chez les guppys de la Trinité, l'un d'entre nous (L. Dugatkin) a réalisé une expérience de «dosage» comportemental : une femelle guppy pouvait choisir entre deux mâles qui différaient par la quantité d'orange couvrant leur corps ; comme prévu, les femelles choisissaient essentiellement toujours le plus orange de chaque paire de mâles. Ensuite, nous avons organisé des possibilités de copies, au cours desquelles une femelle pouvait observer une autre femelle qui semblait choisir le moins orange des mâles proposés. Quel mâle choisirait-elle alors pour elle-même?

Quand la prédisposition génétique tend à faire choisir le plus orange des mâles, mais que les indices sociaux et la possibilité de copier poussent vers le mâle le plus terne, le choix dépend de l'amplitude de la différence de couleur entre les deux mâles : lorsque les deux mâles présentés différaient peu (12 pour cent) ou modérément (25 pour cent), la femelle choisissait finalement le moins orange. Dans ce cas, la femelle succombait à la pression sociale, sa tendance à copier prenant le pas sur sa préférence génétique pour les mâles orange. En revanche, quand la différence entre les mâles était importante (40 pour cent), la femelle ignorait le choix, apparemment mauvais, des autres femelles, et elle choisissait le mâle le plus orange, ses prédispositions génétiques masquant tout effet d'imitation.

De l'animal à l'homme

Chez les guppys, il semble exister un seuil de couleur au-dessous duquel les indices sociaux orientent le choix des femelles et au-dessus duquel les facteurs génétiques prédominent. Nous poursuivons nos expériences pour vérifier si le comportement d'imitation des guppys est héréditaire. Bien que l'imitation paraisse reposer sur les indices sociaux, peut-être les gènes contrôlent-ils la probabilité qu'une femelle s'engage dans un comportement imitatif.

Bien que les comportements humains soient plus complexes que ceux des guppys ou des grouses, certaines règles de choix des partenaires semblent demeurer : les hommes ne se

Ce que veulent les femelles

CARACTÈRE DU MALE	PREFÉRENCE DES FEMELLES	ESPECES
Appel	Plus intense Plus fréquent Plus long Plus complexe Plus large répertoire	Grillons Crapaud américain Rainette Grenouille tungara Pinson
Parade nuptiale	Plus fréquente	Grouse
Taille	Grande taille	Poisson cichlidé
Queue	Plus longue Hauteur de queue supérieure Nombre supérieur d'ocelles	Hirondelle Triton à crête Paon
Crête	Plus grande crête	Poule rouge de la jungle
Arceau	Arceau plus décoré	Oiseau à berceau
Rayure de la poitrine	Rayure plus large	Mésange charbonnière
Couleur corporelle	Couleur plus vive Zones orange plus étendues	Fringille Guppy

battent généralement pas jusqu'à la mort pour la main d'une femme, et les femmes choisissent les hommes d'après certaines de leurs caractéristiques, telles l'intelligence, la beauté ou le compte en banque.

Les femmes ont-elles des comportements d'imitation, dans le choix de leur partenaire? L'imitation étant un mécanisme important dans de nombreux types d'apprentissage humain, la question mérite d'être posée. L. Dugatkin collabore aujourd'hui avec les psychologues Michael Cunningham et Duane Lundy afin de l'étudier : les premiers travaux montrent que les femmes sont généralement plus intéressées par un homme quand on leur dit que

d'autres femmes le trouvent aussi séduisant.

Naturellement la théorie de l'évolution n'expliquera pas la totalité des comportements humains. Même chez les animaux, les avantages ou les coûts des comportements de sélection des partenaires sexuels semblent différer selon les espèces, selon les environnements et, même, selon les moments de la journée. Si des animaux aussi simples que les guppys sont capables de prendre en considération les opinions de leurs congénères lorsqu'ils choisissent un partenaire sexuel, imaginez la complexité des éléments susceptibles de guider les humains dans leur quête du partenaire parfait!

Lee Alan DUGATKIN et Jean-Guy GODIN sont respectivement professeurs de biologie à Louisville et à Mount Allison (Canada).

M. ANDERSSON, *Sexual Selection*, Princeton University Press, 1994.

L.A. DUGATKIN, *Interface between Culturally Based Preferences and Genetic Preferences : Female Mate Choice in Poecilia reticulata*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 7, pp. 2770-2773, 2 avril 1996.

J.-G. GODIN et L.A. DUGATKIN, *Female*

Mating Preference for Bold Males in the Guppy Poecilia reticulata, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 19, pp. 10262-10267, 17 septembre 1996.

Anne E. HOUDE, *Sex, Color and Mate Choice in Guppies*, Princeton University Press, 1997.

M. RYAN, *Sexual Selection and Mate Choice*, in *Behavioural Ecology : An Evolutionary Approach*, sous la direction de J.R. Krebs et N.B. Davies, Blackwell Science, 1997.

Pinces et ciseaux optiques

MICHAEL BERNIS

Des lasers servent d'étaux de lumière, pour immobiliser des cellules ou de minuscules constituants cellulaires, et de ciseaux pour pratiquer des interventions minutieuses.

Les faisceaux laser, composés de lumière intense et monochromatique, sont aujourd'hui partout : dans les lecteurs de disques compacts, dans les imprimantes, dans les caisses de supermarchés... Cependant, ils ont aussi des applications potentielles, moins communes : ainsi, un médecin pourrait focaliser un faisceau laser sur une structure cellulaire ; le faisceau immobiliserait cet organe et le maintiendrait en place pendant qu'un second faisceau servirait de scalpel, ou de ciseaux, pour pratiquer sur l'organe une intervention chirurgicale délicate.

Même dans un monde où les lasers abondent, ces interventions restent du domaine de la science-fiction. Les chirurgiens commencent à guider leurs pinces et leurs ciseaux à l'aide d'endoscopes, réalisant ainsi des interventions chirurgicales peu invasives, et quelques biologistes utilisent des pinces et des ciseaux optiques pour manipuler de façon peu invasive les cellules vivantes et leurs organites.

Les ciseaux optiques furent les premiers à apparaître. Il y a presque 30 ans, nous voulions utiliser des lasers pour explorer la structure et le fonctionnement de cellules. Nous avons d'abord défini les paramètres de nos lasers (notamment la longueur d'onde du rayonnement et les durées d'exposition) et déterminé quels organites seraient manipulables par des rayons lumineux. Les structures sur lesquelles nous agissons ont 0,25 micromètre de diamètre (le diamètre moyen d'un cheveu humain est de l'ordre de 100 micromètres).

Nous utilisons des ciseaux optiques sur les chromosomes et sur le fuseau mitotique, qui sépare les chromosomes lors de la division cellulaire. Avec les lasers, nous étudions des constituants cytoplasmiques, notamment des mito-

chondries (les usines énergétiques des cellules) et des microfilaments, des microtubules et des centrosomes, des structures qui maintiennent l'architecture cellulaire et qui assurent le transport de diverses molécules dans les cellules.

La mise au point des lasers

Nous ne savons toujours pas très bien comment les lasers modifient les constituants cellulaires, mais nous savons détruire des zones spécifiques des organites sans perturber notablement le reste de la cellule. Le microscope optique et le microscope électronique montrent, par exemple, que des ciseaux optiques agissent localement sur un chromosome, au plus profond de la cellule : ils inactivent notamment, dans une cellule en cours de division, la région du chromosome qui contient les gènes responsables de la fabrication du nucléole (un constituant du noyau) ; cette « mutation » est transmise à toutes les cellules issues de la cellule modifiée.

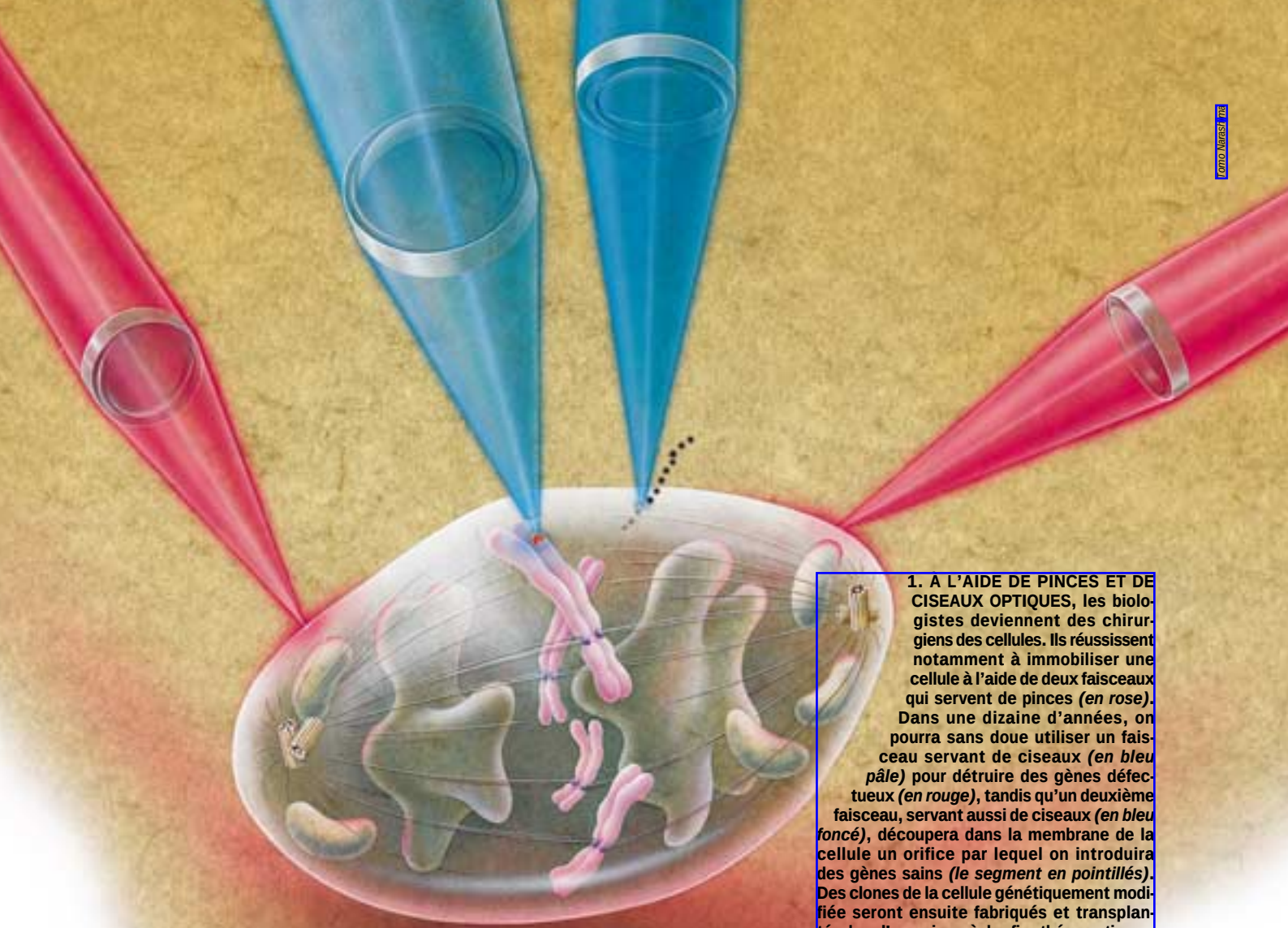
Quand on examine les cellules ainsi modifiées au microscope optique à contraste de phase (un microscope qui, grâce à un dispositif qui renforce les contrastes, autorise l'observation de préparations vivantes, qu'il est inutile de colorer artificiellement), l'anomalie chromosomique – une lésion inférieure à un micromètre – apparaît sous la forme d'une région claire. Au microscope électronique à transmission, avec un grossissement compris entre 10 000 et 100 000, on voit que cette région a une structure bien nette : le chromosome situé de part et d'autre de la lésion semble intact, tout comme le cytoplasme, autour du chromosome, tandis que la zone lumineuse observée au microscope optique est une modification de l'indice de réfraction plus

qu'une disparition de matière : le laser modifie les propriétés chimiques et physiques du chromosome sans le détruire complètement.

Le laser permet aussi d'étudier la membrane cellulaire en perturbant légèrement sa fluidité : quand le faisceau est focalisé sur la membrane, il perce un trou d'un micromètre qui se rebouche en une fraction de seconde. À l'aide de cette méthode, nommée optoporation (c'est-à-dire ouverture de pores par voie optique), on introduit des molécules dans une cellule (lorsque les pores sont ouverts), sans pour autant endommager irréversiblement la membrane.

L'optoporation est particulièrement adaptée à la transformation génétique des plantes, dont les parois cellulaires rigides sont relativement impénétrables (comparées aux membranes souples des cellules animales). Nous avons utilisé cette méthode pour insérer des gènes dans des cellules de riz ; les cellules génétiquement modifiées ont ensuite formé des plantes dont chaque cellule contient les gènes introduits, lesquels s'expriment, c'est-à-dire que les protéines codées par ces gènes sont synthétisées. Ainsi les ciseaux optiques sont utilisables à la fois pour l'inactivation de gènes et pour l'introduction de gènes étrangers dans les cellules.

En Italie, des biologistes ont récemment modifié des gamètes humains (spermatozoïdes et ovocytes) à l'aide de ciseaux optiques, dans le cadre d'essais cliniques de procréation médicalement assistée : les ciseaux amincissent localement la pellicule qui protège les ovocytes fécondés *in vitro*, ou éliminent même une petite partie de cette membrane, dite zone pellucide. Quand les embryons précoces sont ensuite placés dans l'utérus de la mère porteuse, l'amincissement localisé semble favo-



1. A L'AIDE DE PINCES ET DE CISEAUX OPTIQUES, les biologistes deviennent des chirurgiens des cellules. Ils réussissent notamment à immobiliser une cellule à l'aide de deux faisceaux qui servent de pincettes (en rose). Dans une dizaine d'années, on pourra sans doute utiliser un faisceau servant de ciseaux (en bleu pâle) pour détruire des gènes défectueux (en rouge), tandis qu'un deuxième faisceau, servant aussi de ciseaux (en bleu foncé), découpera dans la membrane de la cellule un orifice par lequel on introduira des gènes sains (le segment en pointillés). Des clones de la cellule génétiquement modifiée seront ensuite fabriqués et transplantés dans l'organisme à des fins thérapeutiques.

riser leur implantation. On obtient aussi cet amincissement par des substances chimiques, mais la méthode laser semble moins dangereuse pour l'embryon. À Rome, Severino Antinori et ses collègues ont ainsi étudié plus de 200 femmes dont les œufs avaient subi un traitement local par laser : le nombre des grossesses aurait dépassé de plus de 50 pour cent le nombre de grossesses chez les femmes ayant subi une fécondation *in vitro*, sans traitement laser. Les premiers essais à grande échelle d'amincissement de la zone pellucide par laser vont commencer aux États-Unis, en Australie et en Israël.

Nous utilisons aussi les ciseaux optiques pour ouvrir des cellules et analyser leurs molécules constitutives. Nous profitons de ce qui est parfois

considéré comme un effet négatif des ciseaux optiques : l'apparition d'un minuscule nuage de gaz ionisé, nommé microplasma, qui se forme lorsque le faisceau laser est focalisé sur la lame de verre où est posée la cellule. L'expansion, puis la contraction de ce microplasma engendrent des contraintes mécaniques qui risquent de rompre la cellule. En plaçant un petit capillaire en verre au-dessus de la cellule, nous recueillons ses constituants, que nous analysons ; nous obtenons ainsi un instantané biochimique de la cellule. Cette méthode devrait avoir des applications importantes en chimie analytique des cellules : notamment, on espère ainsi déterminer la nature des protéines et leurs concentrations dans une cellule cancéreuse isolée.

Mieux connaître les ciseaux optiques

Précision et sélectivité sont les deux qualités que les utilisateurs attendent des ciseaux optiques. Un faisceau laser est précis s'il atteint exactement le point cible ; un faisceau est sélectif s'il modifie la cible sans perturber son environnement.

L'excellente qualité des composants des microscopes dont on dispose aujourd'hui garantit une excellente précision. Les objectifs, parfaitement usinés, subissent une correction chromatique pour l'ensemble du spectre visible, de sorte que toutes les longueurs d'onde convergent pratiquement au même point ; quand on utilise plusieurs faisceaux laser de longueurs d'onde

différentes, on réussit à les faire converger au même point.

Avec un objectif de microscope immergé dans de l'huile et un grossissement égal à 100, la dimension du faisceau laser, au point de focalisation, est légèrement inférieure à la longueur d'onde du laser. Un laser néodyme-yttrium-aluminium-grenat (néodyme YAG) qui émet une longueur d'onde égale à 532 nanomètres est ainsi focalisé en une tache de 499 nanomètres de diamètre. En pratique, toutefois, la précision est parfois encore meilleure, car la répartition de l'énergie de notre

meilleur laser a une allure gaussienne, c'est-à-dire que la variation de l'énergie, au point de focalisation, a l'allure d'une courbe en cloche. Comme seul le sommet de la courbe a vraisemblablement une énergie suffisante pour modifier l'organite cible, la dimension efficace du point de focalisation est bien inférieure au diamètre de ce point.

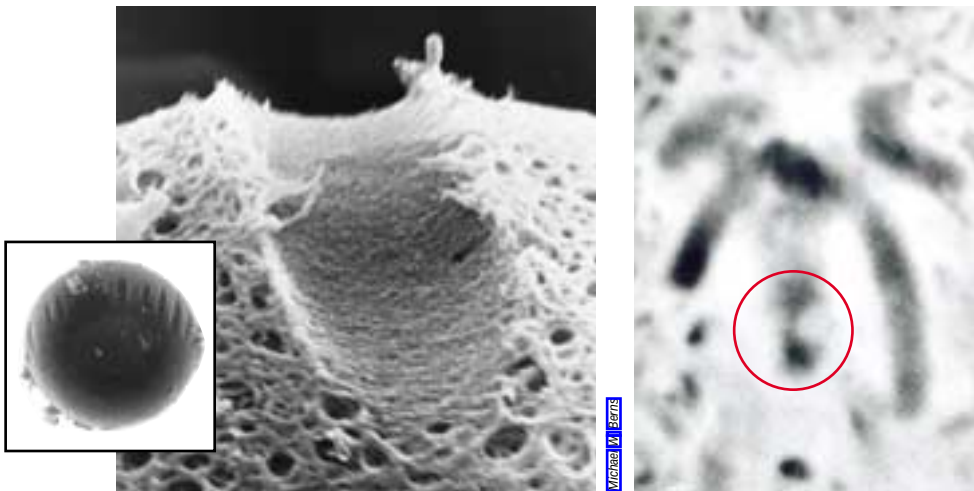
La méthode est également sélective, c'est-à-dire que l'on modifie spécifiquement un détail cible. Toutefois, comme les biologistes comprennent encore mal comment un rayon laser interagit avec les diverses cibles bio-

logiques, ils ne peuvent garantir que la méthode sera sélective quelle que soit l'application (autrement qu'en vérifiant que l'expérience n'a pas perturbé le fonctionnement de la cellule cible). Cette démarche est fréquente en science : on a constaté les vertus de l'aspirine plus d'un siècle avant de comprendre comment elle agit. Comme la connaissance des mécanismes d'action d'un médicament ou d'une nouvelle technique sert surtout à trouver de nouvelles applications, plusieurs équipes cherchent à comprendre les interactions des lasers et des cellules.

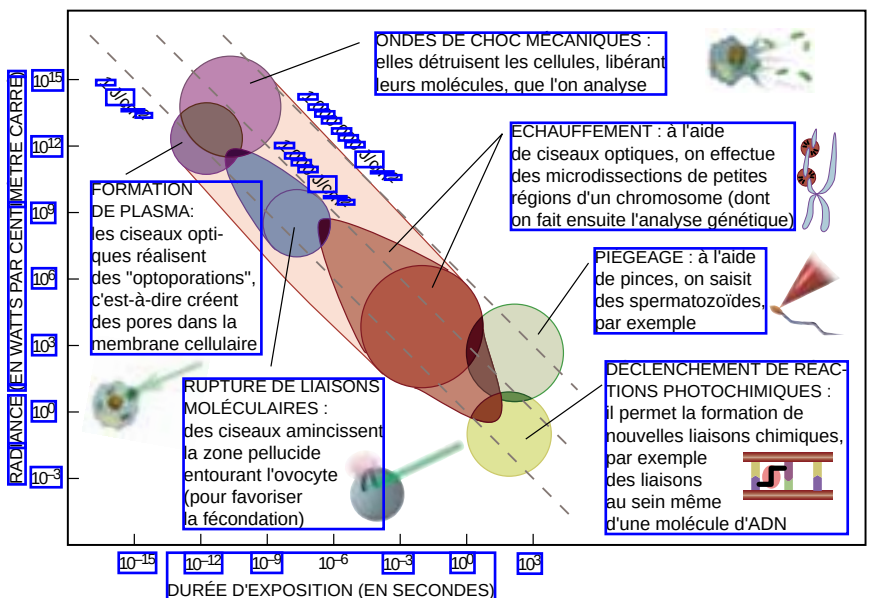
Pour préciser ces effets, on se heurte à plusieurs difficultés : d'une part, on sait mal mesurer et enregistrer des phénomènes qui se produisent à une échelle inférieure au micromètre dans les cellules ; d'autre part, on ne maîtrise pas l'énergie d'un faisceau laser dans de si petits volumes. Malgré ces obstacles, des études macroscopiques nous ont montré que divers mécanismes physico-chimiques interviennent quand des lasers interagissent avec un tissu. Ces réactions sont déclenchées par l'absorption échelonnée ou simultanée de photons.

L'absorption d'un photon chauffe la cible ou déclenche des réactions chimiques qui libèrent des radicaux libres ou d'autres substances délétères pour les cellules. Des photons de haute énergie, par exemple dans l'ultraviolet, rompent même des liaisons moléculaires, dissociant des molécules par un mécanisme nommé photoablation. D'autre part, plusieurs photons peuvent être absorbés quasi simultanément, de sorte que l'absorption est alors équivalente à celle d'un seul photon de haute énergie, tel un photon ultraviolet. Ces divers mécanismes, seuls ou associés, peuvent se produire dans les structures microscopiques d'une cellule.

L'action d'un laser dépend de l'absorption de la cible, d'une part, et de l'énergie qui atteint la cible pendant une durée déterminée, d'autre part (ce paramètre, nommé radiance, est exprimé en watts – ou joules par seconde – par centimètre carré). Avec les lasers à impulsion, où la cible est exposée pendant quelques femtosecondes (ou milliardièmes de milliardième de seconde), voire quelques microsecondes, la radiance est parfois considérable. On sait qu'un laser qui atteint un tissu pendant quelques centièmes de seconde, ou même plusieurs secondes, chauffe le tissu au point de dénaturer certaines



2. DES SILLONS (à gauche) peuvent être gravés par des ciseaux optiques dans la zone pellucide qui entoure un œuf fécondé de souris (*cartouche de gauche*), pour faciliter son implantation dans l'utérus. De tels ciseaux peuvent aussi retirer (à droite) un fragment de chromosome d'une cellule de rat. La base de l'entaille mesure environ un micromètre de large.



3. L'ÉNERGIE fournie aux cellules dépend de l'énergie des lasers et de la durée d'exposition de la cellule (les lignes en diagonale en pointillés correspondent à des doses d'énergie constantes). On a représenté certains des effets produits sur des cellules pour différentes combinaisons de radiances et de durées d'exposition. L'échauffement (en marron) est presque inévitable. La zone marron foncé correspond aux énergies pour lesquelles l'échauffement est le principal phénomène.

molécules, de provoquer une coagulation et une vaporisation, ainsi que diverses réactions chimiques engendrant des produits nocifs, tels des radicaux libres. En revanche, on connaît moins les effets des rayonnements de haute énergie concentrés dans un organe cellulaire.

Nous cherchons notamment le seuil à partir duquel une augmentation de la radiance du faisceau incident modifie son action sur la cible, par exemple l'énergie au-delà de laquelle l'effet du laser n'est plus un échauffement de la cible, mais la production d'ondes de choc dues à la formation d'un microplasma. Ces seuils, encore mal connus, dépendent certainement de la durée de l'impulsion laser et de l'absorption de la cible et de son environnement.

Plusieurs équipes recherchent ces seuils. Quand, dans quelques années, on comprendra mieux les interactions des lasers et de leurs cibles, on trouvera probablement de nouvelles applications à l'échelle subcellulaire.

Malgré ces inconnues, on pratique des ablations extrêmement précises au laser (on détruit ou l'on inactive des régions spécifiques des cibles) sur n'importe quel constituant cellulaire, à condition qu'il soit visible au microscope optique. On cherche à dépasser cette limite à l'aide de molécules qui absorbent la lumière et qui se lient spécifiquement à des séquences d'ADN sur lesquelles on veut intervenir. Quand cette séquence est si petite qu'elle est inobservable ou quand son emplacement est inconnu, on peut éclairer la cellule avec une longueur d'onde qui excite les molécules absorbant la lumière, lesquelles vont ensuite inactiver des gènes spécifiques. Par cette même méthode, on pourrait aussi activer un gène, soit parce que l'énergie transférée déclencherait une cascade de réactions chimiques, soit parce que l'on inactiverait un gène suppresseur. Le reste de la cellule, illuminé un court instant, ne subirait aucun dommage.

Des pinces au microthermomètre

Avec leurs impulsions lumineuses brèves et intenses, les ciseaux optiques permettent des interventions de chirurgie microscopique sur des cellules et des molécules. Récemment, des pinces optiques (l'équivalent des forceps) ont été mises au point.

Comment la lumière peut-elle piéger un objet et le déplacer? Intuitivement, on conçoit seulement que la lumière échauffe ou brûle, de sorte qu'elle permet de faire des mesures ou des calibrages. On ignore souvent qu'elle exerce des forces – la pression de radiation – sur les objets qu'elle touche. Quand le soleil brille, nous ne percevons pas les forces lilliputiennes qui, imperceptiblement, nous poussent, mais ces forces sont suffisantes à l'échelle lilliputienne des cellules.

Au milieu des années 1980, Arthur Ashkin, des Laboratoires AT&T Bell, découvrit qu'un faisceau laser continu de faible puissance (moins d'un watt) piégeait les bactéries. Mieux encore, à l'aide du faisceau infrarouge d'un laser au néodyme YAG, il parvint à déplacer des cellules entières ou leurs organites.

Ensuite, Steven Chu (prix Nobel de physique en 1997) et ses collègues de l'Université de Stanford ont montré que des pinces optiques saisissent également des molécules. Ils ont lié chimiquement l'extrémité de molécules d'ADN à des billes de polystyrène trans-

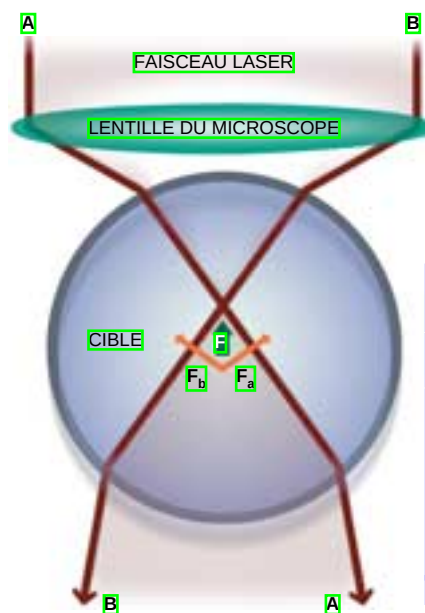
parent et ont utilisé des lasers pour saisir les billes et étirer les molécules d'ADN. Steven Block, de l'Université de Princeton, et Michael Sheetz, de l'Université de Duke, ont utilisé le piégeage optique pour étudier les «moteurs kinésine», des protéines cellulaires qui déplacent les organites dans les cellules et qui font battre les flagelles des spermatozoïdes.

Comment saisit-on un organite à l'aide d'une pince optique? Un objet qui est à la fois suffisamment petit et relativement transparent à la lumière laser réfracte le faisceau laser. Lors de cette réfraction, la quantité de mouvement du faisceau lumineux est modifiée, de sorte que la quantité de mouvement de la cible l'est aussi. Quand la géométrie du système formé par le faisceau laser et la cible est correcte, la quantité de mouvement transférée attire la cible vers le faisceau qui, dès lors, la maintient en place (voir la figure 4). En déplaçant le faisceau, l'opérateur fait bouger la cible.

Les faisceaux utilisés pour les ciseaux et pour les pinces optiques diffèrent. Alors que les ciseaux sont des impulsions brèves de haute énergie, les pinces sont des faisceaux continus de faible énergie. La cible doit être transparente aux pinces pour qu'il n'y ait ni absorption d'énergie, ni production de chaleur, ni déclenchement de réactions photochimiques délétères.

Un seul faisceau suffit à saisir une cellule ou un organite, mais l'objet n'est pas parfaitement immobilisé ; un second faisceau est nécessaire pour emprisonner la cible. La longueur d'onde des faisceaux des pinces optiques est généralement comprise entre 0,7 et 1,06 micromètre, la puissance entre 25 et 500 milliwatts et le diamètre du point de focalisation entre 0,5 et 1 micromètre. De tels faisceaux engendrent des forces de l'ordre du piconewton, suffisantes pour piéger des cellules et déplacer des organites à l'intérieur ou à l'extérieur des cellules.

Les pinces optiques sont de remarquables outils d'étude biologique. Récemment, nous avons utilisé des pinces optiques pour analyser les relations entre la forme et la fonction des lymphocytes T (des globules blancs, qui participent aux défenses de l'organisme). Au cours d'une réaction immunitaire, les lymphocytes B exposent à leur surface les molécules étrangères, ou antigènes, déclenchant une cascade de réactions, notamment une



4. UN FAISCEAU LASER maintient un objet en place, parce que la quantité de mouvement est conservée. La réfraction d'une paire de rayons laser symétriques (A et B) engendre des forces (F_A et F_B), car la déviation des rayons transfère à la cible une partie de la quantité de mouvement. Quand le point de focalisation des deux rayons est situé entre la lentille et le centre de la cible, la force résultante (F) attire la cible vers le faisceau. Au contraire, quand le point de focalisation est plus loin que le centre de la cible, cette dernière est repoussée. Quand le point de focalisation est à gauche ou à droite du centre, la cible est repoussée vers la gauche ou vers la droite.

Faisceau laser d'Arthur Ashkin, AT&T Bell, Laboratoire

augmentation de la concentration en ions calcium dans les lymphocytes *T*, ce qui fait proliférer des lymphocytes *T* spécifiques de l'antigène exposé.

Les lymphocytes *T* ont une polarité de forme et de déplacement. À l'aide de pinces optiques, nous avons piégé des lymphocytes *B* contre des lymphocytes *T*. Quand un lymphocyte *B* est placé à l'arrière d'un lymphocyte *T*, il ne se passe rien : le lymphocyte *B* se détache du lymphocyte *T* en moins de deux minutes ; au contraire, quand le lymphocyte *B* est placé à l'avant du même lymphocyte *T*, la concentration intracellulaire en ions calcium augmente rapidement, indiquant qu'une cascade de réactions se prépare (voir la figure 5). Ainsi avons-nous confirmé que les lymphocytes *T* et d'autres globules blancs migrent dans des directions particulières, imposées par les signaux que captent les récepteurs qu'ils portent sur leur face antérieure.

Les pinces optiques piègent des cellules extrêmement mobiles, par exemple des spermatozoïdes humains. Nous avons étudié la mobilité d'un spermatozoïde en réduisant progressivement l'énergie de piégeage ; nous avons ainsi déterminé l'énergie au-dessous de laquelle il s'échappe de la pince. Puis, en effectuant de telles mesures de la «force d'échappement», nous avons examiné les relations entre la motilité, la vitesse et le type de déplacement : les spermatozoïdes se déplaçant en zigzag sont plus puissants que ceux qui nagent tout droit. Ainsi avons-nous

confirmé les observations cliniques selon lesquelles les hommes chez qui une grande proportion de spermatozoïdes louvoient en tous sens sont plus fertiles que les hommes dont les spermatozoïdes se déplacent en ligne droite.

De surcroît, chez les hommes qui ont des troubles de l'éjaculation, les spermatozoïdes prélevés dans l'épididyme (où ils achèvent leur maturation et où ils sont stockés avant l'éjaculation) se déplacent trois fois moins puissamment que les spermatozoïdes normaux : l'efficacité du déplacement n'est optimale qu'après le passage dans l'épididyme. C'est pourquoi les chances de fécondation sont supérieures quand on injecte les spermatozoïdes directement dans les ovocytes et qu'on ne se contente pas de mettre en présence, dans une boîte de Petri, des ovocytes et des spermatozoïdes, dont la qualité des déplacements conditionne alors la réussite de l'opération. Grâce aux mesures de la force d'échappement, les médecins ont un outil nouveau pour déterminer si, en cas de stérilité, les spermatozoïdes sont assez mobiles, et pour évaluer l'efficacité des traitements visant à accroître cette mobilité.

On devra naturellement utiliser ces pinces laser avec précaution : les inévitables effets thermiques ou photochimiques risquent de réduire la mobilité des cellules. La chaleur est l'une des principales difficultés liées à l'utilisation des pinces, car, contrairement aux ciseaux, le faisceau est continu.

Des biologistes ont enregistré l'augmentation de la température dans des compartiments cellulaires irradiés. Ils avaient fixé une molécule sensible à la chaleur soit sur la membrane de cellules artificielles (des liposomes), soit sur des cellules d'ovaire de hamsters chinois en culture ; ils ont alors analysé la fluorescence provoquée par l'échauffement.

Ce «microthermomètre» cellulaire a détecté une augmentation de 1,15 à 1,45 °C pour 100 milliwatts de puissance laser au point de focalisation. Les pinces laser libèrent une puissance dix fois supérieure ; quand la chaleur n'est pas dissipée efficacement, c'est-à-dire qu'elle s'accumule, le rythme des réactions biochimiques est modifié, les protéines sensibles à la chaleur (par exemple les enzymes) risquent d'être inactivées, et les cellules de mourir.

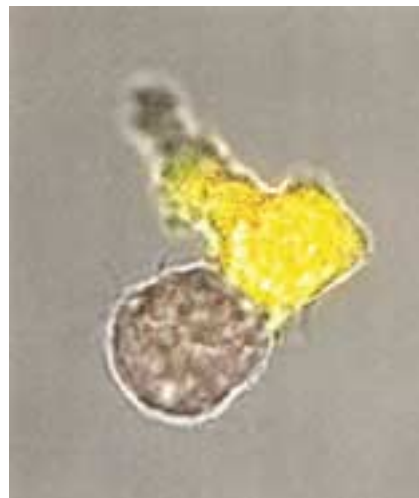
Utilisation conjointe

L'utilisation conjointe des ciseaux et des pinces optiques permet des opérations complexes et originales. Nous avons utilisé un laser infrarouge pour accoler deux cellules d'un myélome, pendant qu'un laser ultraviolet découpait les membranes au point de contact. Nous avons ainsi obtenu une cellule hybride qui contenait le génome des deux cellules initiales. Par ce type de technique, on obtient des cellules qui ont une double capacité, par exemple celle de se diviser indéfiniment et de fabriquer des protéines spécifiques.

Le groupe de Karin Schütze, à Munich, a poursuivi les travaux de piégeage des spermatozoïdes et a utilisé des pinces infrarouges pour saisir des spermatozoïdes bovins et les introduire dans des ovocytes par un trou percé dans la zone pellucide au moyen de ciseaux. Dans un petit nombre de cas, l'œuf a été fécondé. Des expériences similaires ont été réalisées avec des spermatozoïdes et des ovocytes de souris.

Si la méthode se révèle sûre et efficace, elle compléterait les méthodes de manipulation des gamètes chez l'homme ou chez l'animal. Bien que la prudence soit de mise pour toutes les nouvelles méthodes expérimentales, les spécialistes de la procréation médicalement assistée s'intéressent aux pinces et aux ciseaux optiques.

Ces outils permettent également des manipulations originales des organites intracellulaires. Ainsi, nous avons découpé des chromosomes au cours



5. LA POLARITÉ DES LYMPHOCYTES *T* est confirmée par diverses études réalisées avec des pinces optiques. Des lymphocytes *B*, qui déclenchent la libération d'ions calcium dans les lymphocytes *T*, ont été positionnés contre des lymphocytes *T* par des pinces optiques. Quand un lymphocyte *B* est placé à l'une des extrémités d'un lymphocyte *T* au repos, aucune réaction ne se déclenche : le colorant fluorescent rouge introduit dans le lymphocyte *T* reste rouge (à gauche). En revanche, lorsque le lymphocyte *B* est placé à l'autre extrémité du lymphocyte *T*, des ions calcium sont libérés, et le colorant devient jaune fluorescent (à droite).

Des pinces optiques pour une bactérie

Aux diverses applications des pinces et des ciseaux optiques mentionnées dans l'article de Michael Berns, s'ajoutent, par exemple, les études menées à l'Institut Curie. Grâce aux pinces optiques dont sont équipés deux microscopes, les biologistes ne se contentent plus d'observer les organites nichés au cœur des cellules, mais ils peuvent aussi les manipuler.

Nombre de cellules migrent. Mouvements bénéfiques dans le cas des cellules embryonnaires qui gagnent les territoires où elles se différencient, des globules blancs qui affluent vers les sites infectés, des cellules de la peau qui reforment le tissu après une blessure ; mouvements catastrophiques lorsqu'il s'agit de cellules cancéreuses qui colonisent les tissus sains. Pour mieux comprendre ces mouvements, nous étudions une bactérie, *Listeria monocytogenes*, dont les mouvements présentent des analogies avec les déplacements des cellules de mammifères.

Listeria a la forme d'un cylindre de un micromètre de longueur. Maçon microscopique, elle assemble, dans son prolongement, des filaments d'actine qui forment une queue parfois cent fois plus longue qu'elle ; posée au som-

met de la queue d'actine, la bactérie avance à la vitesse de construction du tube, près d'un millimètre par heure.

Comment les filaments sont-ils assemblés à l'arrière de la bactérie ? D'où vient la force motrice ? Comment la bactérie s'accroche-t-elle à l'échafaudage ? On l'ignore encore, car on ne peut suivre la construction à l'échelle des molécules d'actine. Toutefois, en étudiant les déformations de la queue d'actine, on en déduit un scénario des interactions moléculaires en jeu. Ainsi, en pinçant la queue d'actine à l'aide de pinces optiques, et en tirant sur la bactérie, nous avons évalué la force d'adhérence du micro-organisme à son échafaudage.

On peut également démultiplier une pince optique à l'aide de miroirs que l'on fait osciller rapidement entre deux ou trois positions ; on obtient alors plusieurs pinces qui saisissent la queue d'actine en différents points, et l'on en a ainsi évalué l'élasticité. Par différentes expériences de ce type, nous mesurons les pressions qu'exerce l'échafaudage sur la bactérie. Nous précisons la façon dont elle se déplace, en espérant élucider quelques mécanismes généraux de la locomotion cellulaire.

Fabien GERBAL et Albrecht OTT, Institut Curie

de la division cellulaire (la mitose). Puis, avec des pinces laser, nous avons déplacé les fragments à l'intérieur de la cellule afin d'étudier les forces exercées par le fuseau mitotique, cette machinerie cellulaire qui sépare les chromosomes dupliqués vers les deux parties opposées de la cellule en cours de division.

Les expériences ont donné des résultats surprenants : nous avons aisément déplacé les fragments qui étaient à l'extérieur du fuseau, mais nous n'avons pas réussi à introduire dans le fuseau des éléments prélevés dans le cytoplasme. Ces expériences ont confirmé que le fuseau forme une sorte de cage, empêchant que des éléments étrangers, tels des fragments de chromosomes nouvellement introduits dans le cytoplasme, ne pénètrent dans le fuseau. Comme la mitose détermine la répartition du patrimoine génétique dans les cellules filles, on comprend que l'évolution ait sélectionné un mécanisme qui interdit l'accès au fuseau mitotique d'éléments indésirables. Cet élément étant un acteur essentiel de la division cellulaire, si l'on parvient à élucider son fonctionnement, on comprendra mieux certaines maladies liées à la division cellulaire, tels le cancer et les anomalies de l'embryogenèse.

Aujourd'hui, nous disposons d'un ensemble qui comporte deux fais-

ceaux laser servant de pinces, un faisceau laser servant de ciseaux et un microscope confocal à fluorescence laser. Les lasers sont accordables, c'est-à-dire que l'on peut choisir la longueur d'onde de leur faisceau. Cette station de travail est un outil précieux pour les biologistes cellulaires ; on peut y observer des cellules ou des organites fluorescents à l'aide du microscope confocal, pendant ou après la mise en action des pinces et des ciseaux. Ce système confocal de piégeage et d'ablation se manœuvre simplement, à l'aide d'un petit levier de commande.

Des collègues ont utilisé cette station pour découper le centromère des chromosomes, le point d'ancrage des microtubules du fuseau mitotique. Les gènes de cette région sont-ils actifs ?

On l'ignore, car le centromère est très difficile à isoler et à analyser. Les pinces et les ciseaux optiques aideront sans doute les biologistes à répondre à la question.

Voilà plus de 80 ans qu'Albert Einstein a établi les fondements de la théorie des lasers. Puis, au début des années 1960, des physiciens américains et russes ont mis au point les systèmes capables d'émettre les faisceaux laser prédits théoriquement. Aujourd'hui, grâce à des outils incorporant des lasers, les biologistes sont devenus des chirurgiens de la cellule, manipulant cellules et organites. Ces méthodes ont des applications en médecine et en biologie du développement ; elles servent à étudier la structure de la cellule et son fonctionnement, et à décrypter le génome humain.

Michael BERNs, professeur à l'Université d'Irvine, est le co-fondateur, avec Arnold Beckman, de l'Institut Beckman d'étude des lasers, qu'il préside.

M.W. BERNs, W.H. WRIGHT et R. WIEGAND-STEUBING, *Laser Microbeam as a Tool in Cell Biology*, in *International Review of Cytology*, vol. 129, pp. 1-44, 1991.

A. CLEMENT-SENGEWALD et al., *Fertilization of Bovine Oocytes Induced Solely with Combined Laser Microbeam and Optical Tweezers*, in *Journal of Assisted Repro-*

duction and Genetics, vol. 13, n° 3, pp. 260-265, mars 1996.

A. KHODJAKOV, R.W. COLE et C.L. RIEDER, *A Synergy of Technologies : Combining Laser Microsurgery with Green Fluorescent Protein Tagging*, in *Cell Motility and the Cytoskeleton*, vol. 38, n° 4, pp. 311-317, 1997.

Laser Tweezers in Cell Biology, sous la direction de Michael P. Sheetz, *Methods in Cell Biology* series, vol. 55, Academic Press, 1998.



© M. TROTT-BURNIER

Les conquêtes des polyminos

JEAN-PAUL DELAHAYE

Dans certains domaines mathématiques comme les polyminos, amateurs et informaticiens éclairés font avancer les connaissances.

Le domino est composé de deux carrés accolés par un côté. Les polyminos (parfois appelés polyominos) qui en réunissent 3 sont dénommés triminos ; 4, quadriminos ; 5, pentamino ; 6, hexamino ; 7, heptamino.

Depuis que Solomon Golomb les a présentés au monde scientifique, en 1953, lors d'une conférence au Club mathématique d'Harvard, et que Martin Gardner en 1957, dans un de ses premiers articles de récréation mathématique de *Scientific American*, en a fait la publicité, une «culture du polymino» s'est développée, donnant lieu à des centaines d'articles, à une multitude de jeux et de casse-tête, et un grand nombre de sites Internet leur sont consacrés. Des artistes comme Guenter Albrecht-Buehler les uti-

lisent dans leurs œuvres. Ce peintre expose ses tableaux, comme celui représenté en haut de la page, à l'adresse : <http://pubweb.acns.nwu.edu/~gbuehler/>

Dans l'introduction de son livre entièrement dédié aux résultats des recherches sur les polyminos et dont une édition augmentée a été publiée il y a peu, S. Golomb explique : «Après la conférence de 1953, je me suis trouvé irrévocablement lié à tout ce qui pouvait leur arriver. Un flot continu et soutenu de correspondants du monde entier et de toutes les strates de la société – présidents d'Université, pensionnaires d'obscurs monastères ou de célèbres pénitenciers, etc. – m'ont demandé des informations, proposé de nouveaux problèmes ou fourni des nouvelles solutions.»

Même s'il existe des traces de ces remarquables figures géométriques dans un livre, publié en 1907, d'Henry Ernest Dudeney, le célèbre créateur de jeux mathématiques anglais, même si, quelques siècles plus tôt, un maître du jeu de go remarqua qu'on pouvait créer 12 formes différentes composées de 5 carrés accolés par un côté au moins (pentamino), ce n'est que depuis la fameuse conférence qu'on les a considérés avec quelque sérieux.

Dans une version initiale du film *2001, l'Odyssée de l'espace*, de Stanley Kubrick, une scène mettait en lice un acteur qui jouait aux pentamino avec l'ordinateur (cette scène fut remplacée au dernier moment par une partie d'échecs).

Le succès des polyminos est sans doute dû à ce qu'on les étudie sans formules. La démonstration d'une de leurs propriétés consiste le plus souvent en l'évidence d'un dessin (ça existe, je le vois !). Lorsqu'on prouve qu'une certaine configuration est impossible, il s'agit d'un exercice d'astuce et de pure logique qu'on pourra suivre sans aucune préparation mathématique, et que l'on comprendra en s'aidant de pièces en bois ou en carton plutôt qu'avec un crayon et une feuille de papier. Les mathématiques sont ici essentiellement un jeu.

Certaines propriétés obtenues par énumération ne peuvent pas être démontrées par un raisonnement direct, et alors c'est un programme (l'écrire est encore un jeu) qui établit le résultat. Tel est le cas d'un théorème énonçant qu'il y a 1 010 façons de remplir (on dit aussi paver) un rectangle de 12×5 avec les 12 pentamino, qu'il existe 2 339 façons pour le rectangle 6×10 , 368 pour le rectangle 4×15 , et 2 seulement pour le rectangle 3×20 .

Le livre de George Martin (voir la bibliographie à la fin de l'article) sur les polyminos paru en 1996 est composé uniquement de tels petits problèmes, qui pourront occuper les amateurs pendant

1. DENOMBREMENTS

Aucune méthode générale ne permet de déterminer le nombre de polyminos composés de n carrés. Dans ces dénombrements, on considère bien sûr comme identiques deux polyminos obtenus par retournement ou rotation. Les nombres de polyminos connus aujourd'hui ont été calculés par dénombrements exhaustifs à l'aide de programmes :

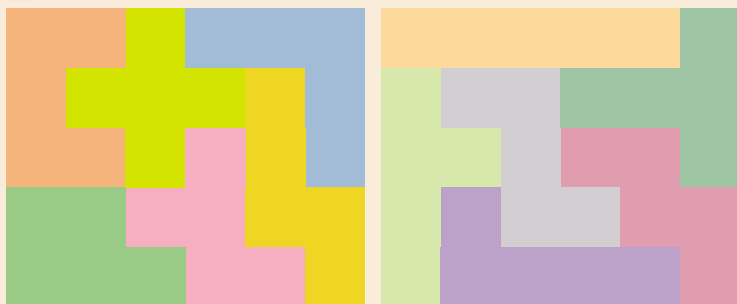
n	Nombre $P(n)$ de polyminos à n carrés	n	Nombre $P(n)$ de polyminos à n carrés
1	1	13	238591
2	1	14	901971
3	2	15	3426576
4	5	16	13079255
5	12	17	50107909
6	35	18	192622052
7	108	19	742624232
8	369	20	2870671950
9	1285	21	11123060678
10	4655	22	43191857688
11	17073	23	168047007728
12	63600	24	654999700403

David Klarner a démontré qu'il existe une constante telle que $P(n) \sim n^k$ à l'infini. Cette constante de Klarner est très mal connue aujourd'hui, on sait seulement qu'elle est comprise entre 3,72 (D. Klarner, W. Satterfield) et 4,65 (D. Klarner, R. Rivest) :

$$n^{3,72} < P(n) < n^{4,65}$$

2. LES TROIS TYPES DE RAISONNEMENTS SUR LES POLYMINOS

(a)



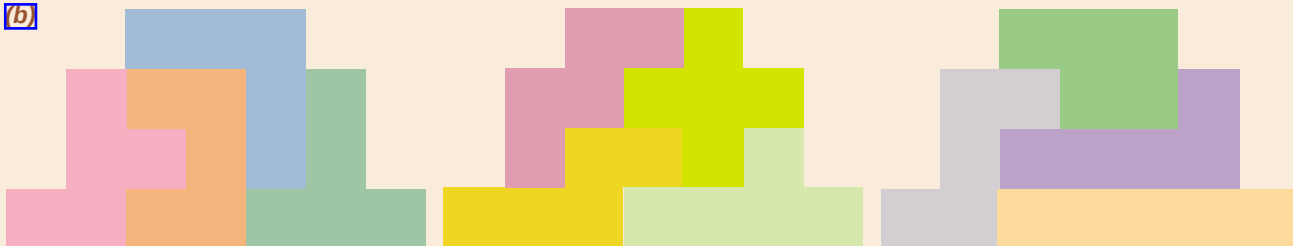
Raisonnement par "exhibition d'une figure" : on montre une figure qui vous persuade en quelques secondes du résultat annoncé. Les figures solutions sont en général difficiles à trouver.

Exemples d'énoncés prouvables par exhibition :

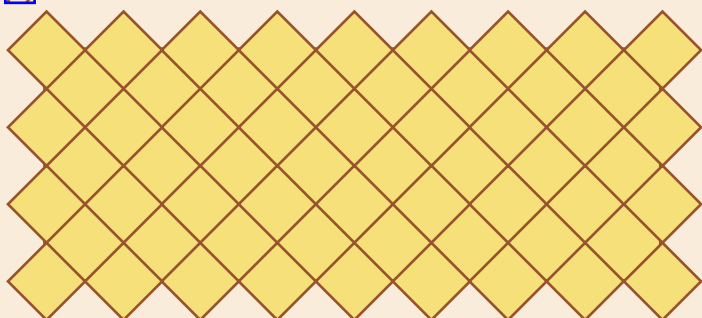
"Il existe un assemblage des 12 pentaminos en deux rectangles de taille 6×5 " (a).

"Il existe une forme géométrique de 20 carrés de surface telle qu'en utilisant chaque pentamino une fois, et une fois seulement, on obtient trois exemplaires de cette forme" (b).

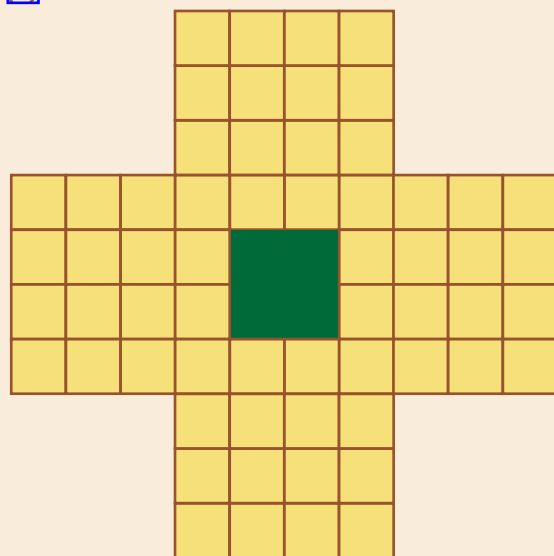
(b)



(c)



(d)



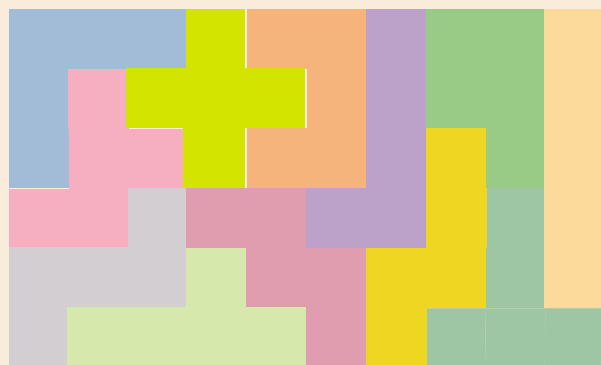
Raisonnement par astuce et logique : une démonstration difficile à trouver, mais facile à vérifier, établit le résultat.

Exemples de résultats prouvables par astuce et logique :

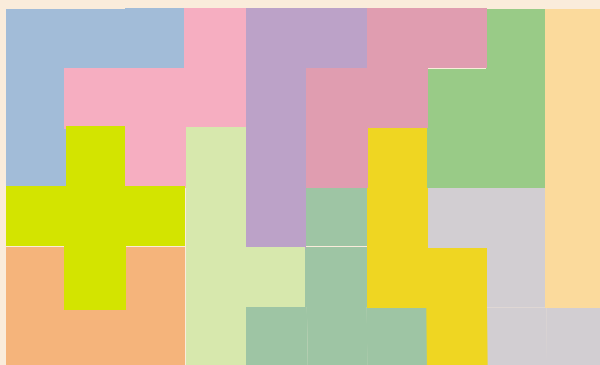
"Le rectangle en zigzag ne peut être recouvert par les 12 pentaminos" (c).

"Les 12 pentaminos ne peuvent remplir la croix de Herbert Taylor (croix de 3×4 pour les bouts avec un centre de 4×4 , moins 2×2 pour la partie centrale)" (d).

(e)

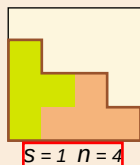


(f)

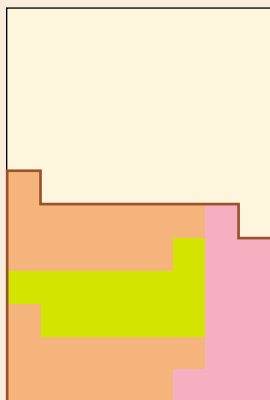


Raisonnement assisté par ordinateur : "Il existe seulement deux assemblages (e) et (f) des 12 pentaminos en un rectangle 5×12 qui possèdent la propriété que chaque pièce touche le bord."

3. LES POLYMINOS D'ORDRE RECTANGULAIRE

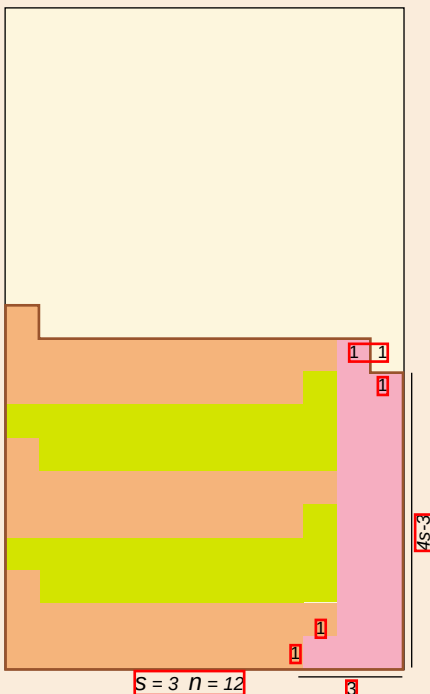


S = 1 n = 4

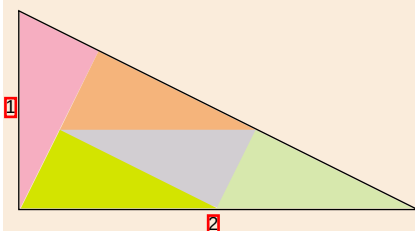


S = 2 n = 8

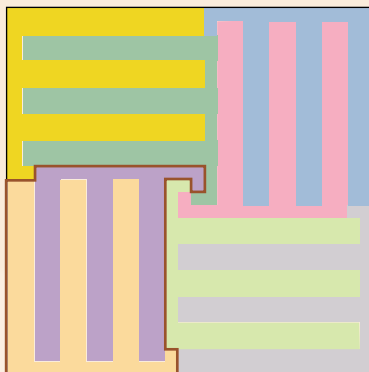
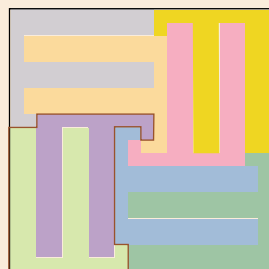
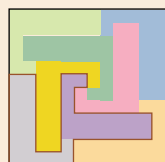
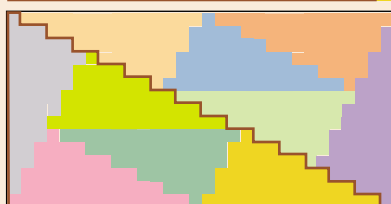
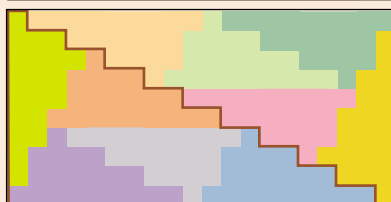
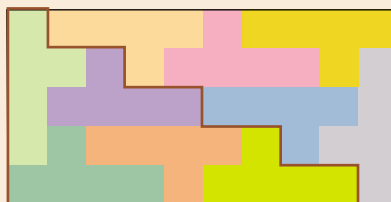
Un nombre n est rectangulaire s'il existe un polymino dont n exemplaires pavent un rectangle (sans trou ni chevauchement, bien sûr), et dont moins de n exemplaires ne pavent aucun rectangle. Solomon Golomb a montré par la méthode illustrée ici qu'un nombre n multiple de 4 ($n = 4s$) est rectangulaire.



S = 3 n = 12



Une méthode découverte en 1997 par William Marshall montre que les nombres de la forme $2(a^2 + b^2)$ sont rectangulaires quand a et b n'ont pas de facteurs communs. À partir du découpage d'un triangle rectangle en 5 sous-rectangles, cette méthode permet de construire des polyminos d'ordre rectangulaire 10. Ici $a = 1$ et $b = 2$.



Polyminos de Michael Reid, recouvrant des rectangles et n'appartenant pas aux classes de Golomb et Marshall.

des mois et servir de base à l'organisation de cours de mathématiques amusantes susceptibles de faire aimer cette discipline, moins austère qu'on ne le pense.

LES POLYMINOS RECTANGULABLES

La question du pavage des rectangles avec un même polymino (et non plus avec un exemplaire de chaque type comme dans les problèmes de pentaminos cités précédemment) est un problème remarquablement difficile qu'on étudie depuis plus de 30 ans, obtenant lentement des résultats sous la forme de belles figures inattendues et de constructions astucieuses.

Les polyminos dont on peut regrouper des copies pour faire un rectangle sont appelés rectangulables.

Le pentamino L (quatre carrés alignés, avec un cinquième collé à angle droit au bout de la ligne) est bien sûr rectangulable, car deux copies du L peuvent s'imbriquer l'une dans l'autre et former un rectangle de taille 2×5 .

Le plus petit nombre, n , de copies d'un polymino qui permet de composer un rectangle est appelé son ordre-rectangulaire. Si n est l'ordre-rectangulaire d'un polymino, le nombre n est rectangulaire. Ainsi le pentamino L est rectangulable et a un ordre-rectangulaire 2. Le nombre 2 est donc un nombre rectangulaire.

LES NOMBRES RECTANGULABLES

Les nombres 1 et 2 sont rectangulaires. Le nombre 3 n'est pas rectangulable : un rectangle ne se décomposera jamais en trois polyminos identiques, à moins que ce ne soient des rectangles (dont l'ordre-rectangulaire est 1). Ce résultat n'est pas du tout évident, il n'a été démontré qu'en 1992 par I. Stewart et A. Wormstein. Il a été généralisé en 1994 par S. Maltby : un rectangle ne peut être décomposé en trois figures identiques, polyminos ou non, que si ce sont des rectangles.

Des figures élémentaires montrent que 4 est un nombre rectangulable : certains polyminos (voir la figure 3) pris en 4 exemplaires composent un rectangle, alors qu'en en prenant moins que 4 on ne peut pas faire de rectangle. On ignore si 5, 6 et 7 sont des nombres rectangulaires.

Deux constructions générales donnent des familles infinies des nombres rectangulaires. La première, proposée par S. Golomb en 1987, établit que tous les multiples de 4 sont rectangulaires. La seconde, découverte il y a quelques mois par le mathématicien amateur néo-zélandais W. R. Marshall, est merveilleuse de simplicité et de puissance.

Elle indique que tous les nombres de la forme $2(a^2 + b^2)$, lorsque a et b n'ont pas de facteurs communs, sont rectangulaires. La construction, fondée sur le découpage d'un triangle rectangle en triangles rectangles identiques, est la preuve que l'astuce d'un amateur peut, dans ce domaine, faire progresser la connaissance d'une question difficile plus efficacement que le plus puissant des ordinateurs et que les théories mathématiques les plus savantes.

Quelques constructions ne provenant pas de ces deux séries (et appelées sporadiques) ont aussi été découvertes : 138 et 690, sont des nombres rectangulaires (pour 690 le résultat doit être confirmé, car la vérification complète que le polymino qui donne 690 ne peut pas remplir un rectangle de plus petite taille n'a pas été menée entièrement).

Notre connaissance aujourd'hui des nombres rectangulaires inférieurs à 100 se résume assez simplement. On sait que 2 est rectangulaire. On sait que 3 ne l'est pas. On sait que les multiples de 4 le sont. Et l'on sait, de plus, grâce au résultat de W. Marshall, que $10 = 2(1^2 + 2^2)$, $26 = 2(2^2 + 3^2)$, $34 = 2(1^2 + 4^2)$, $50 = 2(3^2 + 4^2)$, $58 = 2(2^2 + 5^2)$, $74 = 2(1^2 + 6^2)$, $90 = 2(3^2 + 6^2)$ sont des nombres rectangulaires. Pour tous les autres nombres inférieurs à 100, on est dans l'ignorance.

Certains polyminos assez simples ont un ordre-rectangulaire élevé, ce qui est remarquable et jamais facile à établir, car il faut pour cela (i) montrer la figure complexe d'un rectangle découpé en petits morceaux identiques selon un schéma peu évident et, (ii) prouver qu'on ne peut pas paver un rectangle plus petit avec ce même polymino, preuve qui nécessite le plus souvent l'aide de l'informatique.

Parmi toutes les questions ouvertes concernant la rectangularité des nombres, notons les très simples suivantes :

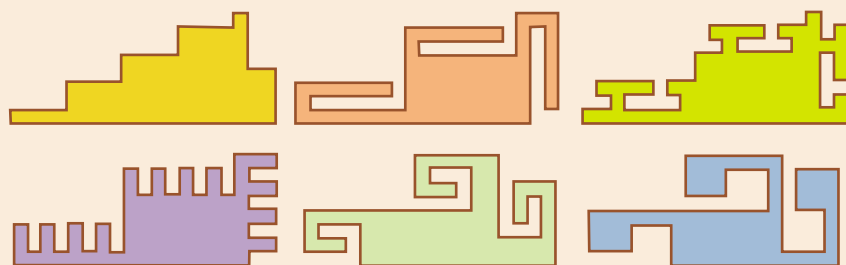
– existe-t-il des polyminos d'ordre-rectangulaire 6? dit autrement, 6 est-il rectangulaire? (et plus généralement existe-t-il un nombre rectangulaire de la forme $8k + 6$?).

– existe-t-il des polyminos d'ordre-rectangulaire impair?

La question concernant les nombres impairs est particulièrement lancinante, puisqu'il se pourrait qu'aucun nombre impair ne soit rectangulaire. Si c'était le cas, on aurait le beau théorème (qui pour l'instant n'est qu'une conjecture) : si avec un nombre impair d'exemplaires d'un même polymino on peut composer un rectangle, alors il existe un nombre pair d'exemplaires du même polymino qui remplit un rectangle plus petit.

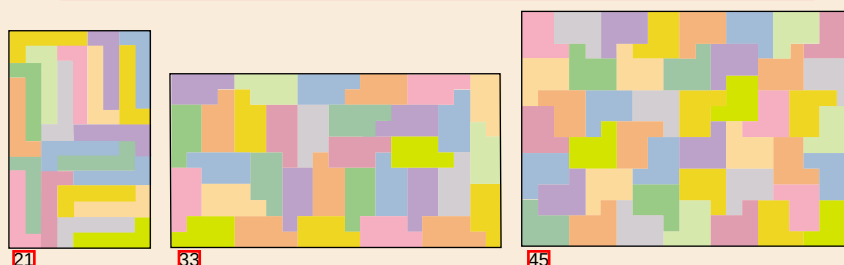
Michael Reid, spécialiste de ces questions et découvreur de belles figures de

4. POLYMINOS D'ORDRE RECTANGULAIRE 10



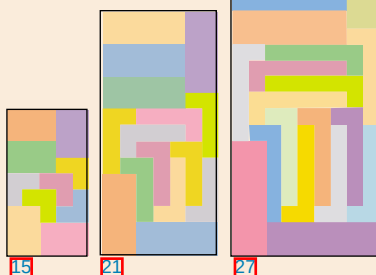
Quelques polyminos d'ordre rectangulaire 10.

5. PAVAGES D'UN RECTANGLE PAR UN NOMBRE IMPAIR DE POLYMINOS



153

FAMILLE $3(2n + 1)$



15

21

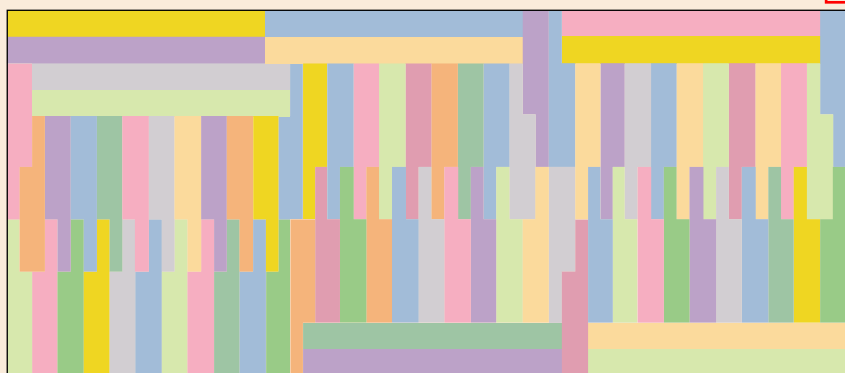
27

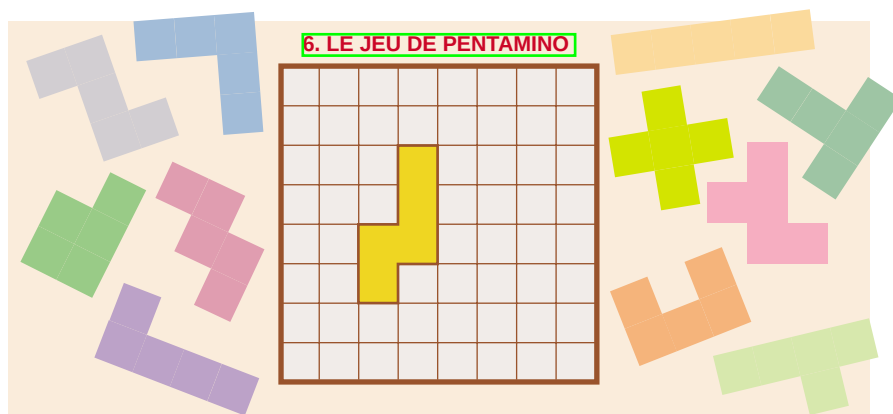
Un nombre impair d'exemplaires d'un même polymino peut composer un rectangle. Ces découpages impairs ne sont jamais évidents. Voici quelques-uns de ces découpages, découverts par Michael Reid et W. Marshall.

FAMILLE $7(6n + 1)$



91





Au jeu du pentamino, le joueur qui commence gagne.

Règle du jeu.

- Deux joueurs s'affrontent sur un échiquier 8×8 en utilisant les douze pentaminos comme pièces.
- Les joueurs jouent chacun à leur tour, plaçant sur l'échiquier l'un des pentaminos non encore placés, de façon à recouvrir des cases vides.
- Lorsque plus aucune pièce ne peut être déposée, celui des joueurs à qui c'est le tour de jouer a perdu.

H. Orman, après un calcul de plusieurs semaines sur plusieurs ordinateurs, a établi que le joueur qui commence peut gagner s'il place le pentamino en Z, comme indiqué sur la figure.

commence perd contre un joueur averti. La question subsistait : existe-t-il d'autres façons de commencer qui assurent au premier joueur de gagner contre toute défense ? Le programme de H. Orman ne pouvait considérer tous les premiers coups possibles, car le calcul aurait duré plus de dix ans ! C'est pourquoi elle avait fait le pari (perdu) que placer le L au centre était une bonne façon de jouer pour le premier joueur. Opiniâtre, Hilarie ne se découragea pas et entreprit une seconde tentative (après une phase de perfectionnement du programme), cette fois en imaginant que le premier joueur pose le Z. La réponse obtenue, en deux semaines, est que, pour ce premier coup, aucune réplique gagnante n'existe. Le joueur qui commence peut gagner de manière certaine au jeu inventé par S. Golomb en plaçant le Z au centre. Signalons que le résultat a été vérifié par un programme de Richard Schroepel, totalement indépendant du premier.

Notons aussi qu'une fois le calcul fait, un ordinateur n'a pas besoin de refaire tout le calcul pour chaque partie : l'utilisation de certaines données stockées en cours du calcul lui permet de savoir comment jouer à coup sûr.

Des deux jeux envisagés par S. Kubrick «humain contre ordinateur», dans *2001, Odyssée de l'espace*, aucun n'a résisté à la machine jusqu'au XXI^e siècle. L'homme perd au jeu d'échecs, comme le match Kasparov-Deeper Blue de mai 1997 l'a montré, et perd au jeu de pentamino (là, l'ordinateur a complètement résolu le jeu en indiquant la tactique gagnante et lui a, ce faisant, enlevé tout intérêt).

pavages, soupçonne que la conjecture est fausse. Un lecteur de *Pour La Science* saura-t-il la résoudre, en proposant un polymino dont un nombre impair de copies remplit un rectangle sans qu'un nombre pair plus petit fasse de même ?

M. Reid considère aussi que trouver de nouveaux polyminos rectangulaires est un terrible défi qu'il faut pourtant relever pour avancer dans la compréhension de ce domaine de la géométrie élémentaire. Il serait très utile de connaître tout ce qu'il en est des polyminos les plus simples : par exemple, les polyminos rectangulaires de taille inférieure à 100, et ceux qui ne le sont pas. Une telle question est aujourd'hui totalement hors de notre portée, et les programmes (écrits par M. Reid, entre autres) qui fonctionnent en permanence à la recherche de nouveaux polyminos rectangulaires ne soulèvent que très lentement le voile.

L'étude des décompositions d'un rectangle en un nombre impair de polyminos est un autre problème difficile où des résultats intéressants ont été trouvés récemment. David Klarner proposa d'appeler polymino impair un polymino dont un nombre impair de copies peut composer un rectangle (ici, on n'impose pas que le nombre impair soit le nombre minimal d'exemplaires permettant de composer un rectangle, sinon on serait ramené à la question non résolue de savoir s'il y a des nombres rectangulaires impairs). La figure 5 donne quelques-unes des belles décompositions obtenues.

UN RÉSULTAT DE THÉORIE DES JEUX

Récemment un autre progrès remarquable a été fait concernant les polyminos. La question de l'existence d'une stratégie gagnante au jeu des pentaminos du film *2001*, posée il y a plus de 30 ans par S. Golomb, a été résolue à la suite d'une série de calculs colossaux.

Rappelons les règles du jeu : deux joueurs s'affrontent sur un échiquier 8×8 en utilisant les 12 pentaminos comme pions, qui sont placés à côté de l'échiquier au début du jeu. Les joueurs jouent chacun à leur tour, prenant une pièce de leur choix parmi les restantes, la posant sur l'échiquier et venant occuper des cases vides de celui-ci. Cela, jusqu'à ce que plus aucune pièce ne puisse être déposée. Celui des joueurs qui se trouve dans l'impossibilité de jouer a perdu.

À l'Université d'Arizona, Hilarie Orman a programmé une étude du jeu fondée sur l'idée qu'en plaçant le pentamino en L au milieu on limitait le nombre de possibilités de jeu de l'adversaire. Le calcul a duré plusieurs mois utilisant de nombreuses machines (une machine Intel Paragon, 6 Hewlett-Packard 720, 4 Digital Equipment Corporation RS 3000 model 600).

L'espoir de H. Orman était que, pour chacune des 1 181 répliques possibles du second joueur, une réplique gagnante soit découverte par son programme. Malheureusement le programme découvrit que deux réponses permettaient à l'adversaire de se retrouver dans une position gagnante : en plaçant le L au centre, le joueur qui

M. Gardner, *Hexaflexagons and other Mathematical Diversions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1988.

I. Stewart, *Pavages et tâtonnements*, in *Pour La Science*, pp. 94-99, avril 1990.

S. W. Golomb, *Polyominoes. Puzzles, Patterns, Problems and Packing*, Princeton Science Library, Princeton, 1994-1996.

S. W. Golomb, *Tiling Rectangles with Polyominoes*, in *The Mathematical Intelligencer*, 18, 2, pp. 38-46, 1996.

W. R. Marshall, *Packing Rectangles with Congruent Polyominoes*, in *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 77, 2, pp. 181-192, 1997.

G. E. Martin, *Polyominoes. A Guide to Puzzles and Problems in Tiling*, in *The Mathematical Association of America, Spectrum Series*, 1996.

H. K. Orman, *Pentominoes : A First Player Win*, in *Game of No Chance*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

M. Reid, *Tiling Rectangles and Half Strips with Congruent Polyominoes*, in *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 80, 1, 1997.



Abrogeons la loi des moyennes

IAN STEWART

Subtilités mathématiques du jeu de pile ou face.

Jouons à pile ou face, un grand nombre de fois, avec une pièce non truquée. Pile et face ont la même probabilité, égale à $1/2$, d'apparaître à chaque lancer. Comptabilisons les résultats au fur et à mesure et supposons que, à une étape, le nombre de tirages sur face soit supérieur de 100 à celui des pile : le nombre de pile a-t-il ensuite tendance à rattraper le nombre de face ? Ceux qui jouent à pile ou face sans en connaître les arcanes mathématiques évoquent parfois une «loi des

moyennes» fondée sur l'intuition que les nombres de pile et de face obtenus avec une pièce non truquée devraient devenir peu différents après un grand nombre de lancers. Pourtant les pièces n'ont pas de «mémoire» : la probabilité d'obtenir pile ou face lors d'un lancer est toujours $1/2$. Ne devrait-on pas penser plutôt que les totaux n'ont pas de raison de devenir égaux ?

Les mêmes questions se posent dans des contextes variés. Si un accident d'avion se produit en moyenne tous les quatre mois et si trois mois se sont passés sans accident, un accident est-il imminent ?

Dans tous les cas de ce type, la réponse est non : les processus aléatoires ou, plus exactement, les modèles mathématiques de ces processus n'ont pas de mémoire.

Le problème est subtil : qu'entend-on quand on dit que «le nombre de pile rattrapera celui des face» ? Certes, une longue suite de face ne change pas la probabilité d'obtenir ensuite des pile, mais, même après une série comportant par exemple 100 face de plus que de pile, la probabilité que les nombres totaux de pile et de face deviennent ultérieurement égaux est toujours égale à 1. La probabilité d'un événement est égale à 1 quand l'événement est certain, et elle est nulle quand l'événement est impossible. Ici nous envisageons une série potentiellement infinie de lancers : le jeu peut durer aussi longtemps que le désire le joueur. Dans ce cas, les mathématiciens préfèrent dire «presque certain» ou «presque impossible».

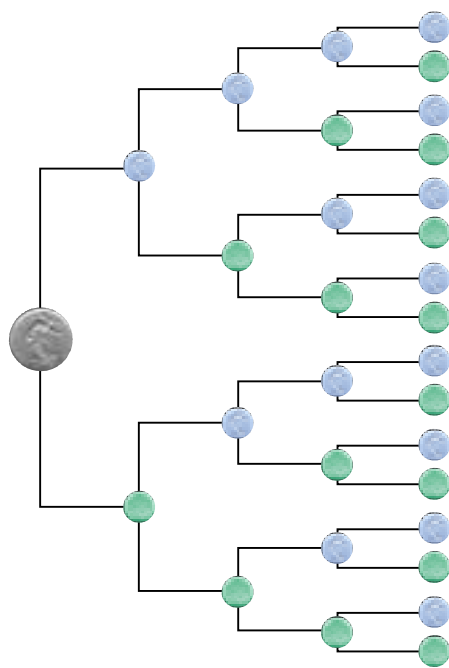
D'un autre point de vue, après une série où le nombre de face est supérieur de 100 au nombre de pile, la probabilité que, plus tard, vienne un moment où le total des face soit supérieur à celui des pile d'au moins un million est aussi égale à 1.

Pour analyser ces apparentes contradictions, examinons de plus près le jeu de pile ou face. Nous avons lancé une pièce 20 fois et avons obtenu la suite P P P P F F F F F F F F P P P P F F. D'après une loi de la théorie des probabilités nommée loi des grands nombres, la fréquence d'apparition d'un événement tend vers sa probabilité quand le nombre d'expériences augmente indéfiniment. Dans la série précédente, les fréquences des événements «tirer pile» et «tirer face» sont respectivement $11/20$, soit 0,55 et $9/20$, soit 0,45. Elles sont proches de 0,5, mais pas égales à 0,5.

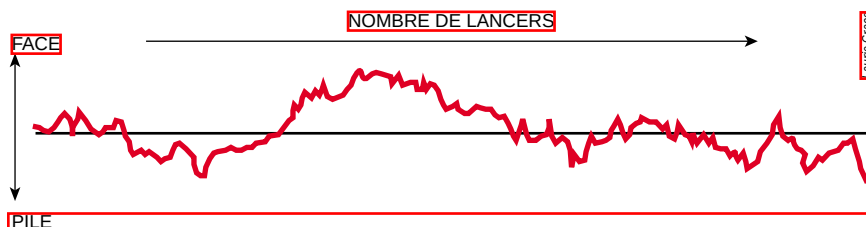
La suite précédente ne vous semble-t-elle pas assez aléatoire ? Préférez-vous F F F F P P P P F F F F P P F F P P, où les fréquences de pile et de face sont exactement égales à 0,5 ? Cette deuxième séquence semble plus aléatoire... mais elle ne l'est pas.

La première suite ne semble pas aléatoire, car elle contient de longues chaînes du même événement, telles P P P P ou F F F F F F. En réalité, notre intuition est trompeuse : les séquences aléatoires contiennent souvent des motifs et des répétitions, et cela ne doit pas nous étonner (à moins que face sorte à chaque coup pendant très longtemps, auquel cas la pièce a probablement deux côtés marqués face).

Lançons une pièce quatre fois de suite. La figure 1 indique les résultats possibles. Le premier lancer donne soit F, soit P (chacun avec une probabilité $1/2$). Le deuxième lancer donne encore soit F, soit P, et ainsi de suite, de sorte qu'après quatre lancers on obtient un arbre à 16 branches. D'après la théorie des probabilités, chaque chemin a une probabilité égale à $1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2$, soit $1/16$. Remarquez que la probabilité de



1. Les résultats possibles d'une suite de quatre lancers à pile (en vert) ou face (en bleu).



2. Marche au hasard, où «face» correspond à un pas vers le haut et «pile» à un pas vers le bas. Les nombres de «face» et de «pile» totalisés depuis le début du jeu sont rarement égaux ; quand cela se produit, la courbe rouge croise l'axe des abscisses.

PPPP est égale à $1/16$, tout comme celle de FFFF. Ainsi, bien que FFFF paraisse plus aléatoire que PPPP, les deux séquences ont la même probabilité.

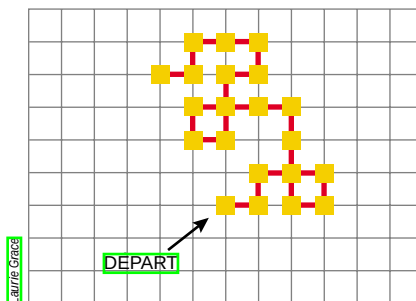
En lançant quatre fois une pièce, on obtient en moyenne deux fois face. Obtiendra-t-on le plus souvent deux pile et deux face ? Non : la figure 1 montre que, sur les 16 chemins, 6 comportent exactement deux faces : FFPP, FFPF, PFPF, PFFP, PFPP, PPFF. La probabilité de tirer exactement deux fois face est donc égale à $6/16$, soit $0,375$. Elle est inférieure à la probabilité de ne pas avoir exactement deux face, qui est égale à $0,625$. Avec des séquences plus longues, l'effet est encore accentué.

Ce genre d'études montre qu'il n'existe pas de «loi des moyennes» : les probabilités des événements futurs ne dépendent pas des résultats passés. Il existe cependant une façon intéressante de considérer le problème, selon laquelle les comptes tendent à la longue à s'équilibrer. Représentons par une courbe la différence entre le nombre de F et le nombre de P en fonction du nombre de lancers : chaque F obtenu fait monter la courbe d'un niveau et chaque P la fait descendre d'un niveau. On obtient ainsi ce que les mathématiciens nomment une marche aléatoire, ou marche au hasard.

La figure 2 représente une marche au hasard typique qui correspond à 10 000 lancers. Son allure déséquilibrée (ici vers le côté face) est tout à fait normale. Par exemple, quand on lance 10 000 fois une pièce, la probabilité qu'un côté soit en tête 9 930 fois et l'autre 70 fois est de l'ordre de $1/10$, ce qui est loin d'être négligeable.

On peut également démontrer que la probabilité de ne jamais obtenir l'égalité est nulle ; autrement dit, une des faces ne peut l'emporter indéfiniment, et la courbe croquera nécessairement l'axe des abscisses. C'est dans ce sens que la loi des moyennes est vraie, mais cela ne vous permettra pas d'améliorer vos chances de gain si vous pariez à pile ou face. En effet, ce résultat ne dit pas combien de coups seront nécessaires pour revenir à l'égalité : on sait seulement que ce temps sera vraisemblablement très long si le déséquilibre initial est notable.

Supposez qu'en 100 lancers vous obteniez 55F et 45P – un excès de 10F. La théorie des marches aléatoires indique qu'après un nombre suffisant de lancers supplémentaires le bilan se rééquilibrera (avec une probabilité égale à 1). N'est-ce pas la loi des moyennes ? Non, du moins pas telle qu'elle est interprétée habituellement. Si vous choisissez à l'avance un nombre de lancers supplémentaires (par exemple, un million), ce million de coups ne sera pas influencé par l'excès



3. Marche aléatoire bidimensionnelle.

initial. En outre, si vous faites un grand nombre d'expériences, chacune avec un million de coups supplémentaires, vous obtiendrez en moyenne 500 055F et 500 045P dans la séquence combinée de 1 000 100 lancers : en moyenne, le déséquilibre persiste. Notez toutefois que la fréquence des F passe de $55/100$ ($0,55$) à $500\,055/1\,000\,100$ ($0,500\,005$). La loi des moyennes s'affirme non en éliminant les déséquilibres mais en les noyant.

Au lieu d'une pièce, lançons maintenant un dé et comptons combien de fois chaque face apparaît. Admettons que toutes les faces ont la même probabilité à chaque lancer, égale à $1/6$. Quand nous commençons à jouer, les nombres totaux d'apparitions des différentes faces sont tous égaux à zéro. Après quelques lancers, ces nombres commencent à différer (ils ne peuvent redevenir égaux qu'après au moins six coups). Quelle est la probabilité que les six nombres redeviennent égaux au bout d'un certain temps, si long soit-il ? Je ne connais pas la valeur exacte ; c'est là une lacune que vous pourrez combler, mais nous allons voir que la réponse n'est pas 1, à la différence du jeu de pile ou face.

Réactions

Dans mon article «Bouteilles et rubans», paru dans le numéro de mai 1998, je demandais de découper une bouteille de Klein selon une ligne telle que le résultat soit un unique ruban de Möbius. Alan Bennett a écrit sa solution en verre.



Pour traiter le cas des dés, on doit étendre la marche au hasard à des dimensions supérieures. Par exemple, la marche au hasard la plus simple dans le plan s'effectue sur un quadrillage infini : un point part d'une origine et se déplace par pas successifs égaux vers le Nord, le Sud, l'Est ou l'Ouest, avec, à chaque pas, une probabilité $1/4$ pour chaque direction. La figure 3 représente un chemin typique. Une marche au hasard sur un réseau à trois dimensions est similaire, mais les six directions (Nord, Sud, Est, Ouest, haut, bas) ont chacune une probabilité égale à $1/6$.

On peut calculer que, dans une marche au hasard à deux dimensions, la probabilité de repasser par l'origine au bout d'un certain temps est égale à 1. En revanche, le mathématicien hongrois Stanislaw Ulam, qui fut l'un des inventeurs de la bombe à hydrogène, a prouvé que, dans un espace à trois dimensions, la probabilité de retour à l'origine n'est plus que de l'ordre de $0,35$. Ainsi, si vous vous perdez dans le désert, marchez au hasard : vous retrouverez votre oasis, à condition d'en avoir le temps ; en revanche, si vous vous perdez dans l'espace, vous n'avez qu'une chance sur trois de retrouver la Terre.

Associons aux six directions d'une marche au hasard tridimensionnelle les faces d'un dé : Nord = 1, Sud = 2, Est = 3, Ouest = 4, haut = 5 et bas = 6. Lançons le dé et déplaçons-nous dans la direction qu'il indique. Dans ce cas, revenir à l'origine signifie obtenir autant de 1 que de 2, de 3 que de 4 et de 5 que de 6. Or, nous avons vu que la probabilité que cela se produise est égale à $0,35$. Soulignons que les totaux doivent ici être égaux par paires, alors que, dans le problème des dés, on demande que les six totaux soient égaux : comme cette condition est plus restrictive, la probabilité cherchée est inférieure à $0,35$.

Même la marche au hasard la plus simple, à une dimension, a de nombreuses caractéristiques qui heurtent l'intuition. Choisissez un nombre de lancers de pièce à l'avance, par exemple un million, et observez quel côté est en tête à chaque étape. En moyenne, quelle proportion de ces bilans donnera l'avantage à face ? Penchez-vous pour $1/2$? En fait, cette proportion est la moins vraisemblable, et les proportions extrêmes sont les plus probables : les face sont soit toujours en tête, soit jamais !

William FELLER, *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, vol. 1, deuxième édition, Wiley, New York, 1957.

Les freins hydrauliques

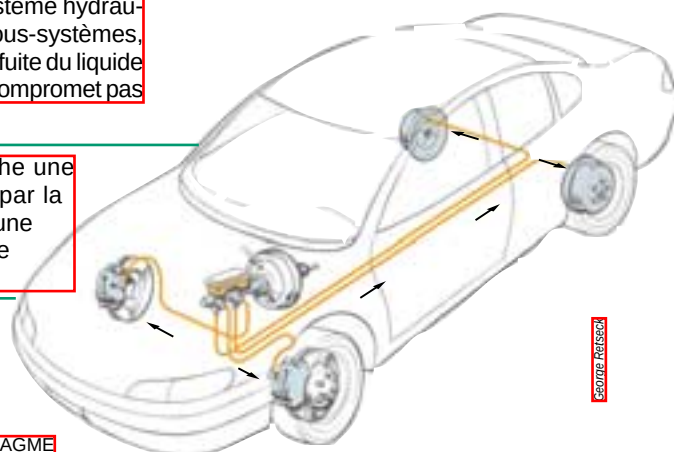
Les freins hydrauliques sont une garantie de sécurité pour les automobilistes. Jusqu'en 1930, dans la plupart des systèmes de freinage, la force appliquée par le pied du conducteur était transmise mécaniquement jusqu'aux roues. Des câbles ou des tiges pressaient alors des patins de freins contre un tambour, ce qui ralentissait les roues. Les systèmes hydrauliques, au contraire, utilisent un fluide afin d'appliquer des forces plus intenses et plus régulières. Quand on presse la pédale de frein, on actionne des pistons contenus dans un maître cylindre qui transforment la force appliquée sur la pédale en pression dans le système hydraulique : des pistons placés dans les cylindres des roues actionnent alors des

freins à tambour ou des freins à disque. Comme la section des cylindres de roue est supérieure à la section du maître cylindre, la force appliquée sur la pédale de frein est amplifiée.

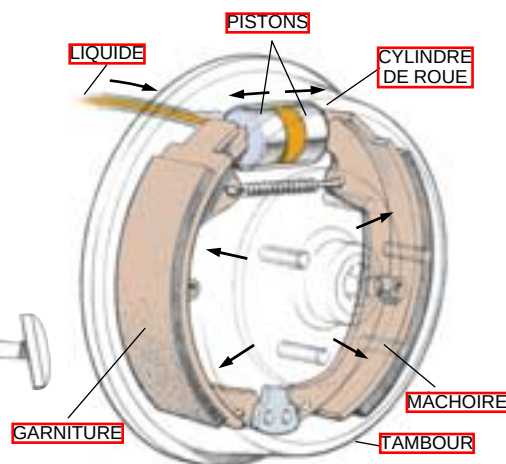
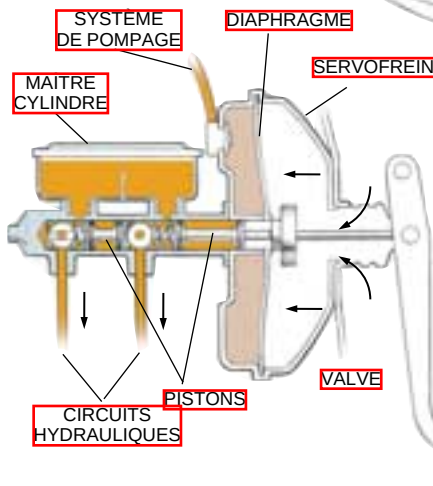
Dans les années 1950, les servofreins, qui augmentent encore la pression du liquide agissant sur les cylindres de roue, ont réduit l'effort que les conducteurs doivent exercer pour freiner. En outre, dans les freins modernes, le système hydraulique est divisé en deux sous-systèmes, de sorte qu'une éventuelle fuite du liquide dans un des systèmes ne compromet pas

le freinage global. Le liquide est envoyé aux freins à partir de deux pistons du maître cylindre. Chaque piston ne dessert qu'un jeu de roues. Dans les systèmes les plus récents, chaque sous-système envoie le liquide vers des roues réparties en diagonale, afin de réduire les risques en cas de fuite du liquide de freins.

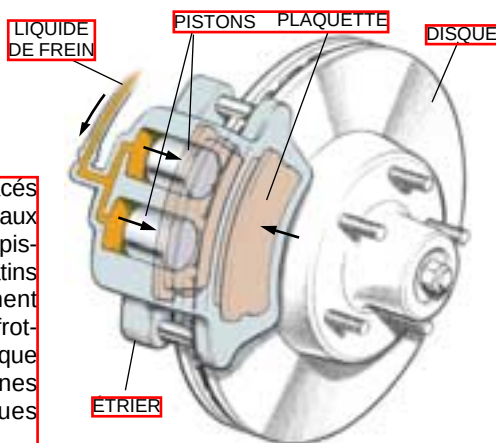
Presser la pédale de freins déclenche une chaîne d'événements qui commence par la transformation de la force exercée en une pression qui actionne les freins à disque ou les freins à tambour.



Les servofreins s'adaptent sur le maître cylindre et amplifient l'action du pied. Quand la pédale de frein est libre, un large diaphragme est dans le vide. Quand le conducteur freine, une valve qui s'ouvre laisse entrer de l'air d'un côté du diaphragme, où règne alors la pression atmosphérique. La différence de pression entre les deux faces du diaphragme pousse ce dernier vers l'intérieur, ce qui active les pistons du maître cylindre. Ce système augmente la puissance du système hydraulique. Le liquide de freinage poussé par ce mouvement pousse alors les pistons dans les cylindres de chaque roue ; puis les pistons actionnent les freins à tambour ou à disque.



Les disques sont généralement placés sur les roues avant, où la chaleur due aux frottements est mieux dissipée. Les pistons dans les freins poussent des patins de freins, dont les garnitures viennent presser un disque métallique. Les frottements ralentissent le disque, ainsi que la roue qui en est solidaire. Certaines automobiles ont des freins à disques sur les quatre roues.



Des freins à tambour équipent généralement les roues arrière des automobiles. Les freins à tambour sont généralement composés d'un cylindre contenant deux mâchoires mobiles. Les pistons du cylindre poussent les mâchoires contre un tambour externe. La garniture des mâchoires de freins frotte contre le tambour, ce qui ralentit la roue.

Stanley Stokes est membre de l'Association des ingénieurs de l'industrie automobile.

Anthropologie

Le premier homme et son temps

Pascal Picq et Alain Mounier.
Éditions Mango, 1997.

La quête des origines humaines, la curiosité de savoir d'où vient l'homme, pour essayer, peut-être, de savoir où il va, remontent sans doute à l'aube des civilisations : les hommes préhistoriques offraient à leurs morts une sépulture et pratiquaient un rituel funéraire impliquant une croyance en un au-delà, en une vie qui se prolongerait après la mort. Lorsque, après avoir probablement redouté et vénéré des puissances telluriques, les hommes ont pensé à façonner dans l'argile des divinités qui leur ressemblaient, l'idée s'est vite imposée d'une création de l'homme lui-même, modelé par les dieux à partir de la même argile avant de recevoir le souffle de la vie. L'homme recréait ainsi l'histoire de ses origines.

Aujourd'hui, toutefois, l'aventure d'Adam n'a plus la cote auprès des scientifiques, de même que les autres histoires qui parsèment les grands mythes fondateurs des religions. La théorie de l'évolution est passé par là, remplaçant les contes de jadis par la recherche des ancêtres disparus. Le grand public aussi ne s'y est pas trompé : il suit toujours avec un vif intérêt les derniers rebondissements de la saga humaine. Les premiers chapitres de la genèse remuent toujours un sentiment obscur, que l'on peut comparer à l'étrange attirance-répulsion pour les monstres et les dragons, qui favorise en partie le succès des histoires de dinosaures.

Le virus de la connaissance du passé peut toucher les grands ou les petits ; ce sont ces derniers qui sont surtout visés par *Le premier homme et son temps*. Il s'agit d'un livre d'images commentées qui pourrait s'intituler «L'origine de l'homme racontée aux enfants». L'ouvrage est composé dans un style décontracté, non dépourvu d'humour. À partir d'une vision du paradis terrestre, on glisse à la découverte d'un crâne d'hominidé en Tanzanie par Mary et Louis Leakey, «La première bombe d'Olduvai éclate». Cette trouvaille allait lancer la recherche des origines humaines en Afrique de l'Est. Suivent une série de photographies ou de dessins commentés sous forme de «flashes» journalistiques : «À quoi sert un gros cerveau», «Les premiers hommes : tout un gang», «Fast food : vite consommé, vite digéré» ou «9 accessoires qui démodent la concurrence».

Comme on le voit, les questions sont abordées de façon ludique et cherchent à répondre à des interrogations posées par un jeune lecteur à propos des premiers hommes : qui sont-ils ? Où les trouve-t-on ? Quels étaient leurs outils ? Comment se nourrissaient-ils ? Quel était leur mode de déplacement ? Quelle était leur sexualité ? Pour faciliter sans doute la compréhension du lecteur, les principales espèces d'hominidés sont affublées de surnoms évocateurs, tels Tête de noix, La Paluche, Belle tronche ou La Cavale. Au passage, les auteurs rendent un hommage justifié à la famille Leakey, père, mère, fils et belle-fille, pour sa contribution exceptionnelle à l'histoire de nos origines.

Pour terminer, un «jeu de l'oie» paléanthropologique propose un test des connaissances acquises et, le cas échéant, une révision de la leçon. On trouve bien, ça et là, quelques approximations hasardeuses. Les auteurs parlent, par exemple, des chercheurs américains qui se sont égarés «parmi les singes du panthéon hindou avec les Ramapithèques, Sivapithèques et autres Bodvapihèques» : les habitants de l'Inde seront surpris de découvrir qu'ils adorent une divinité nommée Bodva, tout autant que les Hongrois apprenant que leur pays se trouve dans le sous-continent indien.

Cet ouvrage, proche parfois de la bande dessinée et plaisamment illustré par de belles photographies, devrait plaire à un jeune public curieux et soucieux d'en savoir un peu plus sur ce monde mystérieux des hommes fossiles : c'est bien ; il devrait aussi lui donner le goût d'en apprendre davantage : c'est mieux.

Louis de Bonis

Histoire des sciences

Il y a 200 ans, les savants en Égypte

Ouvrage collectif publié par le Muséum national d'histoire naturelle et les éditions Nathan, 1998.

L'expédition d'Égypte de Napoléon Bonaparte avait tout pour entrer dans la légende. Que l'on imagine : une armée moderne refait le voyage des Croisés du Moyen Âge (de l'Égypte, ils iront jusqu'à Saint Jean d'Acre !), commandée par un général en chef éclairé, héritier de l'époque des Lumières. Il a

d'ailleurs été élu à l'Académie des sciences, dans la section de mécanique, et les remarques pédagogiques à son embryon de Grande Armée resteront légendaires («Soldats, du haut de ces pyramides, quarante siècles vous contemplent !»). Quand il n'est pas avec son état-major, il entretient des discussions philosophiques avec des scientifiques déjà reconnus comme le mathématicien Gaspard Monge, le chimiste Claude Berthollet, le minéralogiste Dieudonné Dolomieu, ou en passe de le devenir comme le mathématicien Joseph Fourier, le physicien Étienne Malus, le naturaliste Marie Jules Savigny, le zoologiste Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, le chirurgien Dominique Larrey.

Pourtant l'expédition est réellement militaire ; il y a des batailles, avec les horreurs qui y sont associées (Larrey termine de se faire la main et ne saura sauver le maréchal Jean Lannes à Essling) et la mise en œuvre d'une stratégie (voir le livre d'Henri Laurens sur l'Expédition d'Égypte, heureusement réédité). De ce point de vue, c'est un échec : la flotte est immédiatement détruite par Nelson à Aboukir, et Bonaparte a des allures de déserteur, quand il revient hâtivement en France. Le coup d'État du 18 Brumaire arrivera bien à propos pour faire taire les contestataires.

L'iconographie montrant l'expédition sera la plupart du temps extrêmement valorisante pour notre général en chef. Dans *les Pestiférés de Jaffa*, le peintre Antoine Gros met en scène un roi touchant les écrouelles, un roi tout puissant et si inspiré qu'on ne peut le voir qu'en vainqueur. Les contemporains semblent avoir réellement vécu cette image, eux qui reçoivent Bonaparte de retour d'Égypte en héros, comme le vainqueur de l'Autriche qui osa partir pour une contrée lointaine.

La présence des savants enrichit la légende. L'image d'Épinal y voit des individus désintéressés, oublieux des relations entre le monde militaire et les sciences et les arts. Pourtant ces relations deviennent cruciales : Bonaparte est le représentant d'une arme «scientifique», l'artillerie. L'École polytechnique, récemment créée, sert de vivier d'ingénieurs pour l'armée. On trouve d'ailleurs de nombreux polytechniciens en Égypte ; les plus jeunes passent leur examen de sortie à peine débarqués à Aboukir. Nombre d'entre eux s'intéressent au pays qu'ils traversent et sont de zélés compagnons pour ces «savants» recrutés par Bonaparte.

Pourquoi ces savants sont-ils présents ? Cet excellent petit livre, réalisé à propos de l'exposition qui se tient actuellement au Muséum national d'histoire

naturelle, l'explique bien. Initialement Bonaparte a voulu l'expédition, parce qu'il cherchait une issue de secours, au cas où la France aurait dû céder le cap de Bonne Espérance. Les membres du Directoire étaient contents de se débarrasser de ce général passablement encombrant, alors que Talleyrand qui, à son habitude, flaire le bon cheval, le favorise en tant que ministre des Affaires étrangères. La mission est en fait bien vague «couper l'isthme de Suez et assurer la libre et exclusive possession de la mer Rouge».

La commission des sciences et des arts de l'armée d'Orient est la suite logique des voyages du siècle des Lumières, mais on peut également y voir une volonté d'appropriation d'un pays à conquérir ; les montgolfières furent amenées pour impressionner les Caireotes, et Berthollet réalise des expériences de chimie pour montrer la puissance des connaissances de l'envahisseur (le tout, en fait, en pure perte). L'Institut d'Égypte, fondé en août 1798, associe d'ailleurs les savants aux militaires (on y rencontre des officiers du génie, mais également des généraux «classiques» comme Jean-Baptiste Kléber et Louis Desaix). Dans les comptes rendus de cet Institut, si on trouve une explication scientifique du mirage par Monge, on apprend aussi de multiples recettes éminemment pratiques prouvant que ces savants sont au service de l'armée. Citons la construction de moulins, l'amélioration de la cuisson du pain, la fabrication de la bière sans houblon, la clarification de l'eau du Nil, la production de poudre, la taille de nouveaux uniformes...

Cette commission des sciences et des arts est séduisante, parce qu'elle a su aller au-delà de son but affiché. Fascinés par l'Égypte, emportés par leur fougue, les savants se livrent tout d'un coup, en parallèle ou à la place de leurs travaux premiers, à une enquête approfondie dont le désintéressement fait le charme. Cette enquête est géographique, archéologique, ethnologique, culturelle, naturaliste... Elle débouchera sur cette merveille qu'est la *Description de l'Égypte*, dont l'impression s'échelonna entre 1809 et 1828, et sur le décryptage des hiéroglyphes par Jean-François Champollion (qu'aurait-il fait sans la pierre de Rosette ?), sur le percement du canal de Suez (qu'aurait fait Lesseps sans ces nouvelles cartes ?) et sur la passion des Français pour l'Égypte.

Alors, oublions les batailles, savourons – en toute connaissance de cause – les anecdotes qui nous font revivre ces savants au labeur dans des conditions épouvantables. Penchons-nous avec plaisir sur la source de l'égyptomanie qui renaît périodiquement dans notre pays.

Hervé LE GUYADER



Le 23 août 1798, au Caire, Bonaparte fonde l'Institut d'Égypte, sur le modèle de l'Institut de France. Sur cette représentation, il est accueilli par Gaspard Monge, à une session.

Épistémologie

Une même éthique pour tous ?

H. Atlan, C.J. Cela-Condé, M. Delmas-Marty, O. de Dinechin, S. Dubet, A. Fagot-Largeault, L. Ferry, F. Héritier, J. Mehler, A. Mérad, F. Ramus et L. Sève. Éditions Odile Jacob, 1997.

La dernière publication du Comité consultatif national d'éthique pose une question à laquelle ne peut échapper celui qui est en quête de normes, et, plus encore, de normes susceptibles de transcender les règles et les pratiques reçues, ou, à tout le moins, conçues comme telles : l'éthique peut-elle être la même pour tous ? L'enjeu est d'importance, dès lors que l'éthique se veut non seulement au-dessus des lois, mais aussi valable en tous temps et en tous lieux. Car c'est ainsi qu'elle se présente.

Pourtant, il est facile, avec Montaigne, d'observer qu'«ici, on vit de chair humaine ; que là c'est office de piété de tuer son père en certain âge ; ailleurs les pères ordonnent des enfants encore au ventre des mères ceux qu'ils veulent être nourris et conservés, et ceux qu'ils veulent être abandonnés et tués» (ainsi que le relève Anne Fagot-Largeault dans la première des études

qui composent l'ouvrage, «Les problèmes du relativisme moral»).

Si l'éthique aime (avec raison) se démarquer du droit, le juriste que je suis ne peut manquer de noter que le droit recèle la même interrogation. Vivre de chair humaine et tuer son vieux père, est-ce affaire d'éthique ? De droit ? Ou de mœurs ? Dans le recueil que publie le Comité d'éthique, Mireille Delmas-Marty pose d'ailleurs la question : «Le droit est-il universalisable ?» Elle avance une réponse positive, dont elle entrevoit la raison d'être dans l'émergence de normes, même peu nombreuses, auxquelles adhèreraient les nations.

Est-ce bien certain ? Les grands textes juridiques internationaux ou ayant une telle prétention réalisent souvent un consensus sur des mots qui masquent les divergences de fond. Dans la Déclaration universelle des droits de l'homme, le terme de propriété était de ceux-là : Washington et Moscou l'interprétaient très différemment. Et que penser, pour choisir un exemple qui intéresse la science, de la «dignité» humaine dont fait état la récente Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme ?

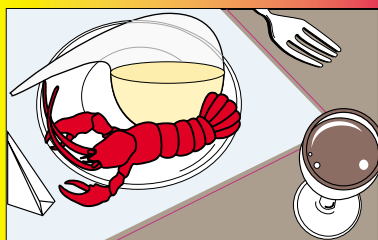
On n'oubliera pas non plus qu'aujourd'hui, où les valeurs sont en débat, certaines d'entre elles ne sont pas plus universelles que l'éthique, rêvée, «pour tous lieux et tous temps» : les valeurs religieuses, souvent, les valeurs coraniques certainement, puisque le Coran, incréé, est la parole divine «pour tous lieux et tous temps». La «visée huma-

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 25 juin 1998.

FRANCE

info

niste» de l'islam dont fait état Ali Mérad dans l'ouvrage («Éthique et diversité culturelle : une approche islamique») reste quelque chose de trop vague pour dépasser cet accord sur les mots que j'évoquais précédemment.

Absolu contre absolu : faut-il donc se résigner au relativisme ? L'ouvrage du Comité d'éthique s'y refuse, et vivement. Toutefois, aussi savantes soient les contributions, je n'ai pas l'impression qu'elles apportent la réponse qui permettrait de sortir d'une alternative qu'on pourrait qualifier de diabolique, pour rester dans un registre théologique. Car, s'il est vrai que le relativisme éthique ou juridique ne permet de fonder aucun choix de société (qu'il s'agisse de vie quotidienne ou d'activité scientifique), l'affirmation de règles transcendantes qui permettraient de fonder de tels choix est contestable. Les règles transcendantes ne sont pas trop difficiles à trouver, sans doute, si on les cherche en Dieu, encore que chacun ait sa manière d'«accueillir» Dieu, mais *quid* d'une société laïcisée ? Et qui dira à l'homme neuronal que le Bien est ici et là le Mal ?

La contribution d'Henri Atlan («Les niveaux de l'éthique») est peut-être, à cet égard, celle qui mérite le plus d'attention : il propose de récuser ce qu'il nomme la «vue en tout ou rien», selon laquelle il n'y a pas de moyen terme entre la reconnaissance de valeurs universelles et la négation d'une telle possibilité. Pour lui, une telle vision des choses «ignore la réalité de notre situation intermédiaire, où des jugements normatifs, explicites ou implicites sur ce qui est bien et sur ce qui est mal, sont hérités, socialement et culturellement. [...] Et cette situation est universelle, même si les contenus des systèmes de valeurs et de normes ne le sont pas».

Le jeu de l'éthique consiste alors à découvrir comment, à travers l'expérience universelle du mal et de la douleur, se sont construites des représentations sociales différentes de l'éthique (et j'ajouterai du droit) et à savoir les confronter, non dans une pure abstraction, mais à l'occasion de situations pratiques, quitte à s'accorder parfois dans l'ambiguïté (le mot est sous la plume de H. Atlan).

Les «niveaux» éthiques sont-ils ceux qui sont décrits ? Ni éthicien, ni philosophe, ni biologiste (puisque l'éthique enfante aujourd'hui une bioéthique...), ni prêtre ou rabbin, je dirai simplement, comme juriste assez peu conformiste, que la question initiale n'a sans doute pas de réponse s'il s'agit de discerner un existant : l'existant de l'éthique ou

du droit universels. Dans une planète variée, je ne trouve pas choquant que le discours éthique (comme celui du «droit naturel») soit jugé arrogant, quand il s'affirme comme une sorte de vérité révélée. L'éthique n'est sans doute pas quelque chose de donné, pas plus que le droit. Si le propre de l'homme est de se construire, l'éthique, comme le droit, est à construire. C'est bien ce que dit Jean-Pierre Changeux quand il évoque une «invention de l'éthique». Reste à construire, à inventer, en dialoguant, en débattant, en confrontant les points de vue. Et en acceptant aussi que le dialogue ait des limites et ne résolve pas tout.

Une même éthique pour tous ? Une même éthique pour les hommes (de bonne volonté) qui auront décidé d'avoir une même éthique, parce qu'ils se seront reconnus semblables et différents. Une éthique pour laquelle universalité se conjuguerait avec créativité.

Michel VIVANT

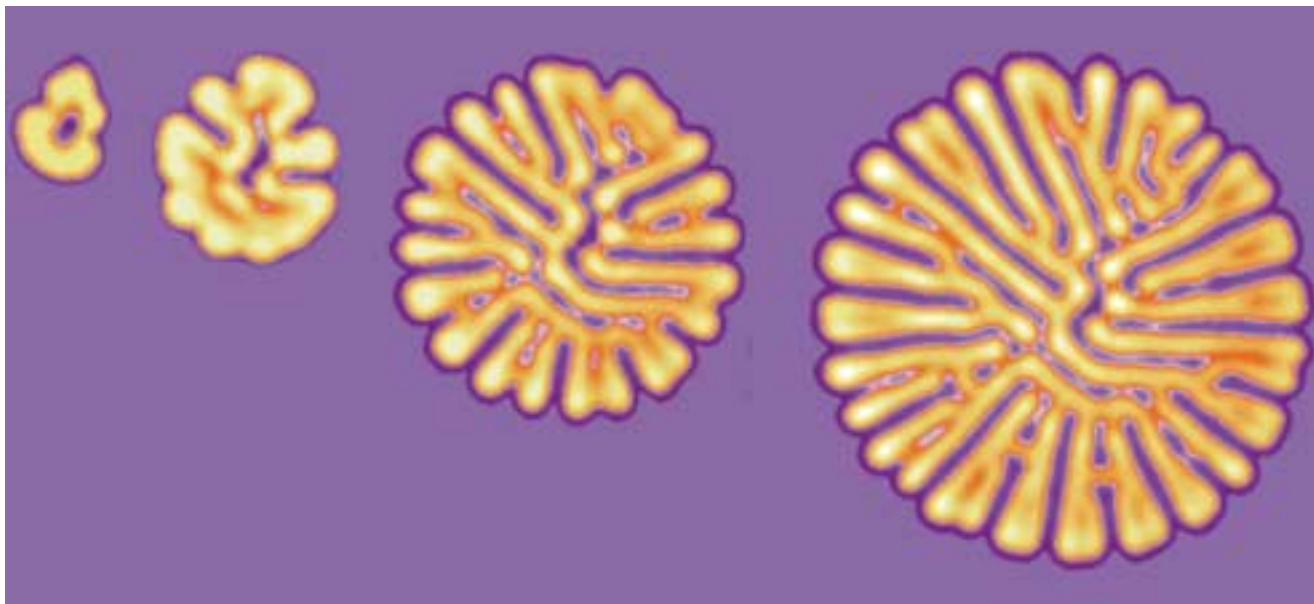
Chimie

Rythmes et formes en chimie

Adolphe Pacault et Jean-Jacques Perraud. Presses Universitaires de France, 1997.

Au cours de la 25^e réunion de la Société de chimie-physique, qui se tenait à Dijon du 9 au 12 juillet 1974, Adolphe Pacault présenta une expérience mémorable : une horloge dont la base de temps était constituée par les oscillations entretenues d'une réaction chimique. Cette anecdote est relatée en page 75 de l'ouvrage d'A. Pacault et de J.-J. Perraud, mais la modestie des auteurs les empêche de préciser qu'Ilya Prigogine, prix Nobel de chimie en 1977, a souvent affirmé qu'il avait compris ce jour-là toute la portée de la découverte des réactions oscillantes.

Il y a 30 ans, un chimiste ordinaire aurait refusé de croire à l'existence même d'une réaction chimique oscillante. Comment ces réactions ont-elles été découvertes ? Par quel cheminement a-t-on compris le lien entre les structurations spontanées de l'espace et du temps observées à l'aide de ces réactions et la thermodynamique des processus hors (et loin) de l'équilibre, puis la théorie du chaos détermi-



215 • Patrick de Kepper

D'étranges motifs «floraux» se déploient transitoirement lors du développement de la structure de Turing qui apparaît au cours de certaines réactions chimiques. Ces structures «transitoires» semblent résulter de l'interaction entre l'instabilité de Turing et

d'autres instabilités morphologiques. Différents stades du développement de ces motifs transitoires ont été enregistrés à des intervalles de dix minutes par Patrick de Kepper et ses collègues de l'Université de Bordeaux.

niste? Enfin, comment le thème de recherche lancé par A. Pacault à Bordeaux, au début des années 1970, a-t-il débouché récemment sur l'obtention des premières «structures de Turing», dont le mathématicien anglais Alan Turing avait prévu l'existence en 1952? Ce qui fait la valeur de cet ouvrage, c'est que les réponses à ces questions sont apportées par un des témoins majeurs de l'histoire de ces découvertes, secondé par un jeune chercheur qui a rassemblé un corpus comprenant les souvenirs des principaux acteurs impliqués dans cette recherche à travers le monde.

L'histoire des réactions oscillantes, faite (comme c'est souvent le cas) de hasards, de rencontres fortuites, de découvertes oubliées et réinventées, de modèles théoriques développés indépendamment des expériences, est clairement et agréablement racontée dans ce livre. Les auteurs ont voulu préserver la mémoire de cet aspect de la science contemporaine. Il faut souhaiter que cet exemple incite d'autres collègues à contribuer de la sorte à l'histoire de leur discipline.

Un seul regret : que ce passionnant texte soit publié dans la collection «Que sais-je?», coincé entre *L'organisation mondiale de la santé* (n° 3224) et *Le multiculturalisme* (n° 3226). On s'interrogera sans doute longtemps encore sur la politique des éditeurs.

La lecture de ce livre est vivement conseillée à qui s'intéresse à la chimie («l'inscription de l'irréversibilité dans la matière», selon la belle définition d'I. Pri-

gogine) et, plus généralement, à toute personne intéressée par la façon dont les chercheurs vivent l'émergence et le développement d'une nouvelle problématique de recherche.

Alain FUCHS

Société

Le débat sur le paranormal

Jean-Claude Pecker, Jean-Paul Krivine, Jean-Pierre Thomas. La documentation française (collection Problèmes politiques et sociaux), 1997.

Ce livre est intéressant et utile. C'est une collection de textes d'origines diverses, réunis par Jean-Paul Krivine et Jean-Pierre

Thomas, sur les croyances en vogue, les parasciences, les sectes, la science, ses dérivés et ses valeurs, les conséquences juridiques de l'exercice des sciences et des parasciences. Le concepteur et l'organisateur est l'astrophysicien Jean-Claude Pecker. Il affiche la couleur dès les premières lignes de l'introduction : «Qu'est-ce que le paranormal? Ce qui, par définition, n'est pas «normal» [...] : c'est l'ensemble de tous les faits supposés, de tous les mécanismes, de toutes les techniques, de toutes les croyances en contradic-

tion flagrante avec les faits avérés par l'expérience scientifique acquise depuis des siècles, au prix des efforts de milliers de savants. Ainsi les fantômes, les tables tournantes, [...] contredisent la physique la plus élémentaire : optique, gravitation [...] ; la lévitation contredit la gravitation ; le créationnisme nie les faits établis par l'expérience des géologues depuis trois siècles ; les gigantesques êtres extraterrestres ne sont que des imaginations, impossibles pour des raisons mécaniques. Une technique paranormale (de guérison le plus souvent) est en conflit avec les techniques utilisées par la science, qui s'appuie non seulement sur l'expérience, mais aussi sur la compréhension profonde des phénomènes. Ainsi l'homéopathie est-elle une technique paranormale, contradictoire avec la théorie atomique et moléculaire d'Avogadro et de Dalton, sans laquelle il n'y aurait aucune physique possible.»

J'évoquerai ici quatre points : l'état de l'opinion publique ; les dérives et les impostures dans le milieu scientifique ; l'homéopathie ; la vulgarisation scientifique et l'esprit critique.

L'état de l'opinion est révélé par quelques données chiffrées : 40 000 voyants en France, avec un chiffre d'affaires de 20 milliards de francs ; selon un sondage SOFRES de 1993, 55 pour cent des Français croient à la transmission de pensée, 58 pour cent pensent que l'astrologie est une science, 52 pour cent des jeunes entre 18 et 24 ans croient aux rêves prémonitoires. L'évolution sur dix ans accuse un pro-

POURLA 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, Hélène Maurey, Philippe Pajot (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 : Didier Andrivon, Daniel Collobert, Bettina Debû, Paul Decaix, Philippe Godlewski, Marie-Thérèse Landousy, Olivier Le Fric, Gérard Maral, Anders Møller, Claude Olivier, Albrecht Ott, Guy Paulus.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.

Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 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 : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 114A et 114B.

grès notable – si l'on peut dire – de la croyance en la transmission de pensée (de 42 à 55 pour cent). Des tableaux montrent la relation des croyances avec l'âge, le sexe, la profession, les pratiques religieuses et les options politiques. Par exemple, les plus rétifs à expliquer les caractères par les signes astrologiques sont les agriculteurs (suivis par les ouvriers, suivis par les cadres) ; les communistes et les électeurs du Front national ; les catholiques réguliers et les athées ; les plus de 65 ans. Les jeunes, les femmes, les verts sont plus enclins à l'explication astrologique.

Cependant la science jouit d'une image positive : 81 pour cent des personnes sondées considèrent que, «en définitive, le développement de la science entraîne le progrès de l'humanité» ; d'ailleurs, pour beaucoup, la science intégrera un jour l'astrologie, la transmission de pensée et les OVNI. Donc il ne suffit pas de dire que l'état de l'opinion est alarmant. Il est révélateur d'un trouble profond de notre société, mais, en même temps, d'une aspiration à un autre système de valeurs et de repères. C'est tout au moins ma lecture des documents présentés.

Face au paranormal, le milieu scientifique est loin d'être homogène. La pensée rationnelle est particulièrement bien représentée par J.-Cl. Pecker et Evry Schatzman, ainsi que par une série de textes de Michel Rouzé et d'Isaac Asimov ; elle imprègne la quasi-totalité des articles. Pour en revenir au tableau de la page 25, 35 pour cent des anciens étudiants en sciences croient à l'astrologie. La biochimiste Suzel Fuzeau-Bresch leur prête main forte. En 1962, le physicien Yves Rocard avait cru donner une explication scientifique de la détection de l'eau par les sourciers. M. Rouzé signale fort heureusement un texte postérieur, de 1974, où Rocard se livre à une sorte d'auto-critique.

Tout un chapitre du livre met en scène la fraude scientifique, les manœuvres, les erreurs et les impostures. Naturellement la mémoire de l'eau et la fusion froide sont évoquées. Une page me paraît mériter réflexion, tout particulièrement : c'est le rôle pervers que peut avoir, et a déjà, sur la recherche scientifique la quête d'une reconnaissance médiatique.

Quoique J.-Cl. Pecker l'épingale dès le premier alinéa, l'homéopathie n'est pas étudiée systématiquement dans le livre. Elle figure, au milieu des parasciences et des médecines parallèles, dans un article inédit de M. Rouzé, et aussi, en filigrane, dans l'évocation de la mémoire de l'eau. Elle ne figure pas

dans les médecines parallèles étudiées par Catherine Coroller, pour la raison qu'elle est pratiquée par des médecins. Il me semble que l'homéopathie mérite d'être un sujet d'éthique pharmaceutique : comment peut-on vendre comme médicament un produit dont on ne connaît pas la composition ? Car l'indication des dilutions ne dit rien de la composition réelle. Le très intéressant article de Guy Ourisson, dans le numéro spécial de *Pour la Science* de novembre 1997, qui est une démolition en règle du *Guide de l'homéopathie*, paru hélas chez Odile Jacob, ne me paraît pas aborder cette question.

Le livre contient bien d'autres choses précieuses, quoique difficiles à trouver faute d'une table des matières détaillée. Les auteurs ont sans doute voulu que le lecteur soit actif, et se constitue lui-même son répertoire des articles ?

Je me bornerai au dernier chapitre («Le développement du mouvement sceptique») et, surtout, au dernier article, de Marceau Felden, sur les enjeux de la vulgarisation scientifique. Il est vrai, comme le dit M. Felden, que l'on constate l'existence d'un décalage de plus en plus inquiétant entre les acquis du savoir rationnel tel qu'il progresse et la perception qu'en ont la plupart de nos contemporains ; c'est une sérieuse menace. Est-ce seulement «par défaut d'information scientifique» ? Si c'était le cas, comment expliquer l'existence de ce décalage chez les étudiants en sciences ? N'est-ce pas plutôt par défaut de culture scientifique et de culture générale ?

Devant l'avalanche des données de toutes sortes, nous avons besoin d'un esprit critique solide et aiguisé (le «scepticisme») qui nous permette d'opérer les premiers choix et les premiers tris, de soumettre en permanence à la révision l'information ainsi choisie et triée. Cet esprit critique est inséparable de notre culture – scientifique et aussi historique, sociale, politique – et notre culture se nourrit de son exercice.

C'est assez sur ce sujet. Les rédacteurs et les lecteurs de la revue *Pour la Science* savent bien comment s'articulent dans leur pratique la vulgarisation scientifique et l'esprit critique.

Jean-Pierre KAHANE

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>