

■ POUR LA
SCIENCE

Juillet 1996

édition française de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

**LES MINES
ANTIPERSONNEL**

**LES FACTEURS
DE RISQUE
EN CANCÉROLOGIE**

**LA CEINTURE
DE KUIPER**

**LES RAMEURS
GRECS**

LES BÉLUGAS

**DES LOGICIELS
PLUS SÛRS**



**DOSSIER
SCIENCE ET SPORT**



M 2687 - 225 - 38.00 F

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon

Point de vue

Le constructivisme
par Paul Caro

Les impossibles de la finance

par Christian Walter



Présence de l'histoire

Turpin, chimiste... et excentrique
par Georges Bram et Nguyen Trong Anh

Science et gastronomie

Alimentation curative

Jeu-concours : Droites concourantes du triangle

Perspectives scientifiques :

Jupiter visitée

La qualité de vie

Fond infrarouge

L'ecstasy

Poisson-éléphant

Les adaptations des Sherpas

Écriture ancienne

Des intrus d'Amérique

Marmottes infanticides

La mortalité en Russie

Les vraies dents du filtreur

«Voir» le noyau

Poumon et fluor

Savoir technique

Sacs gonflables, par Robert Resh



Logique et calcul

Les nombres-univers
par Jean-Paul Delahaye

L'image du mois

Mère punaise, par Bernard Chaubet



Analyses de livres

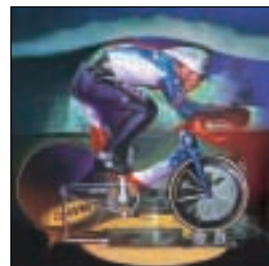
- *À la découverte des réserves naturelles de France*, par Françoise Mosse
- *The Same and not the Same*, par Roald Hoffmann
- *Les créationnistes*, par Jacques Arnould

DOSSIER SPORT ET SCIENCE

L'entraînement des athlètes olympiques

par Jay Kearney

Les sciences du sport permettent aux athlètes de haut niveau d'améliorer leurs performances en développant leurs qualités physiologiques et mentales



Le mythe olympique

Le saut à la perche

Le mouvement d'escalade

Imaginer la performance

La bicyclette idéale

Dopage à la testostérone

Oxygène dopant

Un monde à part

Le public du football

L'urbanisation de la montagne

Les bélugas du Saint-Laurent

par Pierre Béland

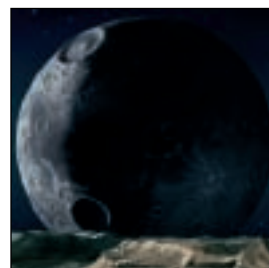
Une loi protège ces baleines blanches contre les chasseurs, mais la pollution industrielle les menace d'extinction.



La ceinture de Kuiper

par Jane Luu
et David Jewitt

Au-delà des orbites de Pluton et de Neptune, un anneau de petits objets ceinture le Système solaire.

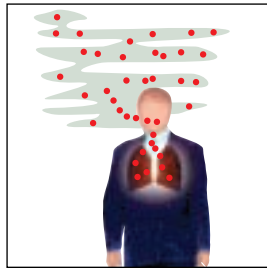


La prédisposition au cancer

72

par Frederica Perera

Afin de prévenir l'apparition de la maladie, les spécialistes d'épidémiologie moléculaire tentent de dépister les personnes les plus susceptibles d'avoir un cancer ; pour ce faire, ils recherchent les signes biologiques d'une telle prédisposition.

**Programmes pour réseaux fiables**

80

par Kenneth Birman
et Robbert van Renesse

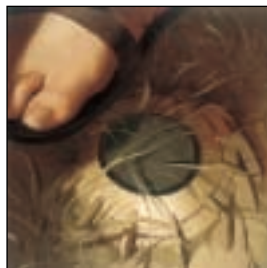
Les techniques qui permettent aux réseaux d'ordinateurs de se réorganiser peuvent rétablir le fonctionnement d'un réseau quand une partie de celui-ci tombe en panne.

**L'horreur des mines antipersonnel**

88

par Gino Stada

Les mines antipersonnel tuent ou mutilent 26 000 personnes par an, surtout des civils et des enfants. Leur interdiction est urgente.

**La technique des rameurs de la Grèce ancienne**

92

par John Hale

Les Athéniens s'imposèrent en Méditerranée parce qu'ils ramaient, assis sur un coussin. Leur technique, longtemps oubliée, a été réinventée par les rameurs de compétition au XIX^e siècle.

**Science et sports...**

Ces mois, l'amateur de sport est comblé avec Roland Garros, le championnat d'Europe de football, le Tour de France et les Jeux olympiques. Pour parfaire sa satisfaction, nous publions un dossier sur la vue scientifique de la pratique sportive (voir *Sport et Science : une alliance contre nature?*, pages 32 à 54). Ce choix peut surprendre, car les deux disciplines entretiennent des rapports lointains et ambigus.

La physique explique le mouvement, c'est sa fonction, mais les coureurs pratiquent les modalités cinématiques de leurs courses depuis quelques millions d'années sans approfondir le rôle des maelströms aériens qui ralentissent leurs progressions...

Les spécialistes du chaos pourraient expliquer les scores des équipes de football en arguant que la dynamique des matchs est sensible aux conditions initiales. Dans la même veine, quel entraîneur érudit oserait-il prétendre que la glorieuse incertitude du sport dépend du principe quantique découvert par Heisenberg?

Le darwinisme sportif reste une discipline balbutiante, et pourtant le confort matériel des sportifs de haut niveau pourrait augmenter leur survie et leur faculté reproductrice. En fouillant bien, la raison de certains exercices pénibles serait élucidée : la motivation des exploits des leveurs de fontes ne seraient-ils pas le désir de séduire et de maîtriser les appâts enveloppés et pondéreux des lanceuses de poids?

Qui dit exercice de force, pense aussitôt dopage. Dans ce domaine, le sport est frappé d'ostracisme : un athlète convaincu de dopage voit ses records invalidés ; un physicien qui découvre une loi naturelle n'est pas soumis à un contrôle. Le théorème de Fermat serait-il invalidé si, pour accompagner son effort, Andrew Wiles avait abusé de l'érythropoïétine exogène?

En revanche, les vents de l'hyperbole soufflent plus du côté des commentateurs sportifs que chez les vulgarisateurs scientifiques : l'envolée du sprinter est plus souvent qualifiée de géniale que les réussites du prix Nobel de chimie... Là encore la science révèle sa faiblesse et une trop grande modestie.

Philippe BOULANGER

Jeux de pistes

Que signifie, dans un article de recherche, l'expression «telle piste semble prometteuse»? Elle signifie : «cette piste n'a rien donné». Jamais en effet un chercheur n'aurait l'inconscience de publier une idée sans avoir tenté de l'exploiter. Cela reviendrait à donner des armes à l'adversaire pour se faire battre de vitesse par lui.

Conseil aux chercheurs néophytes : ne vous lancez jamais sur une piste présentée comme prometteuse !

Souvent intellectuel varié

Voici 10 ou 20 ans, les observateurs notaient que la radio et la télévision tendent à normaliser le langage. Ils expliquaient ce phénomène par un mécanisme psychologique évident : jusqu'au fin fond des campagnes, chacun veut parler «aussi bien» que ceux qui s'expriment sur les ondes nationales.

Aujourd'hui, les mêmes observateurs, ou leurs émules, notent que les particularismes langagiers et les accents régionaux sont loin de s'atténuer. Et ils expliquent ce phénomène par un mécanisme psychologique évident : face à une télévision trop uniforme, chacun veut d'autant plus réaffirmer son identité locale.

Ne nous moquons pas. Pas plus que nous ne nous moquons des grands couturiers. D'une année à l'autre, ces derniers passent de la robe ample à la mini-jupe, et inversement. Est-ce leur faute si la beauté apparaît tantôt en se cachant, tantôt en s'exhibant? Quant à nous, il nous suffit d'imiter les grands couturiers pour avoir l'air beaux. C'est merveilleux !

Les penseurs font pour les esprits ce que les couturiers font pour les corps : ils les habillent. Est-ce leur faute si la vérité, aussi fuyante que la beauté, apparaît tantôt dans une théorie, tantôt dans son contraire? Il serait injuste d'exiger des penseurs qu'ils la saisissent. Demandons-leur simplement des théories, que nous n'avons qu'à répéter après eux.

L'obsession du concept

Les amateurs se souviennent du personnage de Labiche qui, obsédé d'antiquité, flaire du romain partout, jusque dans le tesson de la cruche cassée par un domestique et hâtivement enterrée au fond du jardin. «Cet homme-là trouverait du romain dans une allumette chimique!»

Un nouveau type comique a vu le jour : l'obsédé du concept. Ce personnage voit du concept partout. Il en voit dans la propagande, laquelle est un combat conceptuel, puisqu'elle est une tentative d'ébranler les bases axiomatiques d'un adversaire. Il en voit dans le fait de lire l'heure, puisque c'est calculer modulo 12. Il en voit dans le fait de voyager au moins cher et non au plus court, car, grâce aux mathématiques, il sait que cela revient à suivre une géodésique non euclidienne. La lecture d'un roman policier elle-même est conceptuelle, car sa compréhension nécessite pas mal d'outils théoriques.

Ce personnage n'est pas une caricature littéraire de ceux qui suivent les modes intellectuelles et artistiques. N'est pas Labiche qui veut. Ces réflexions se veulent sérieuses. Leur auteur – on s'en serait douté, hélas – est mathématicien. Jugeant le concept maltraité par l'école, il en entreprend la défense (Pierre Schapira, *Défense du conceptuel*, *Le Monde*, 26 avril 1996).

Pauvre concept! Encore un qui pourrait dire : «Mon Dieu, gardez-moi de mes amis!» Personnifiant ainsi les dégâts causés par le culte du concept, notre auteur tire contre son camp et apporte de l'eau au moulin de ceux qui prônent un retour au «concret». Au fait, comment s'appelle le concept sous-jacent au geste du lecteur qui, lisant une telle prose, se tapote l'index contre la tempe?

La lumière noire

Olbers se demandait pourquoi le ciel nocturne est noir, alors qu'une infinité d'étoiles conjuguent leurs lumières et devraient l'éclairer. On peut, de même, se demander pourquoi, depuis le temps que paraissent des articles «réalisant une percée spectaculaire», le champ de la pensée n'est pas devenu aussi éblouissant que le Soleil.

Peut-être ce second paradoxe a-t-il une explication voisine de celle du premier. Il n'est pas de percée sans gravats, pas de création d'étoiles sans matière sombre associée. Comme les étoiles qui naissent et s'éloignent de nous à la vitesse d'expansion de l'univers, les articles qui font des percées accumulent les gravats, c'est-à-dire des difficultés nouvelles, à travers lesquelles, à nouveau, il faut faire des percées, engendrant de nouveaux gravats. Chaque article emporte avec lui la parcelle de lumière qu'il crée, et le ciel infini du savoir reste noir.

Décourageant

«**C**'est à force d'étudier l'homme que nous nous sommes mis hors d'état de le connaître.» Le pessimisme de Rousseau est-il excessif? Pas sûr. Le savoir semble avoir une fâcheuse tendance à s'interposer entre le monde et celui qui l'étudie : on finit par étudier une théorie pour elle-même, et oublier l'objet que cette théorie tente de décrire.

La discussion reste ouverte. Mais un point ne souffre pas de discussion : la déloyauté qu'il y a à afficher cette citation là où je l'ai vue, c'est-à-dire dans le hall d'entrée, en bas de la bibliothèque Sainte-Geneviève. La jeunesse studieuse est ainsi contrainte de passer devant une affiche signifiant : «Montez étudier, les petits, mais plus vous le ferez, plus vous vous éloignerez de votre but.» C'est ce qu'on appelle ajouter l'injure à la blessure.

Ach so, dit-il en portugais

À chaque langue son génie propre : traduire est un exercice infiniment difficile, quasi impossible. Entre le français et l'anglais, par exemple. Le français, ayant pour idéal la clarté, vise le mot juste, celui qui dit exactement ce que l'on veut dire. L'anglais, au contraire, recherche toujours le mot, la phrase aussi ambigus que possible. Le mot juste en anglais est le mot qui n'est pas juste.

Cette dernière phrase, prise en soi, a déjà de quoi donner le vertige, un de ces vertiges comme les logiciens aiment à en connaître de temps à autre. D'autant plus qu'elle a été prononcée au cours d'une conférence par un Anglais, et que cet Anglais s'exprimait en français! Interpréter ladite phrase devient alors plus étourdissant encore qu'ausculter un paradoxe logique. À elle seule, elle vaut ces systèmes de miroirs parallèles où, à force d'être renvoyé d'une image à une autre, on se croit en mesure d'atteindre l'infini actuel! (Peter Brook, *Le diable c'est l'ennui*, Actes Sud-Papiers, 1991.)

Le mauvais procès des constructivistes

PAUL CARO

Le 22 avril 1996, la revue *Chemical and Engineering News* publie un éditorial intitulé *Le cancer de l'anti-science*, où Allen Bard dénonce les attaques actuelles contre la science. Ces attaques se déploient, d'un côté, sur le front intellectuel, philosophique, historique, politique, sociologique et, de l'autre, sur le front médiatique et populaire : celui des parasciences et du paranormal. A. Bard exhorte ses collègues et les institutions professionnelles à réagir contre une situation qui hypothèque l'avenir de la science. Il accuse le «postmodernisme» d'être responsable de l'image dégradée de la science.

Pour les Américains, le postmodernisme est essentiellement la philosophie française contemporaine, celle des Derrida, Deleuze, Lyotard, Foucault, etc. dont l'influence dans les universités américaines est considérable. On reproche au postmodernisme un éclectisme systématique, de mettre tout sur le même plan, de traiter à égalité les différentes approches de savoir, rationnelles ou non. Pour le postmodernisme, la science serait comme un moyen comme les autres, équivalent aux autres, d'atteindre la vérité ; elle ne pourrait donc revendiquer un statut particulier.

En Europe, le constructivisme, plutôt que le postmodernisme, met directement en cause le système scientifique. «Constructivisme» est un terme ambigu, parce qu'il est utilisé dans des acceptions très différentes. En théorie de l'éducation, il désigne une approche pédagogique où l'étudiant choisit lui-même son chemin et apprend d'une manière interactive, un mode d'apprentissage bien adapté aux réseaux informatiques. Pour la philosophie scientifique, c'est une méthode qui engendre des concepts et des propositions mathématiques d'une manière «génétique», à partir de propositions et de concepts élémentaires ; développée dès 1924 par le Cercle de Vienne, il s'agit de logique mathématique.

Les constructivismes ici visés sont les épistémologies qui contestent, à des degrés divers, le principe de causalité, la logique du raisonnement, et son usage pour l'interprétation des expériences. L'idée de base est que la croyance dans une méthode scientifique unique, valable

dans tous les domaines, est une illusion, un rêve. La confiance dans la science serait du domaine de la foi.

LA SCIENCE N'EST PAS LA VULGARISATION

En apparence, le débat sur l'épistémologie est technique, bourré de références croisées, orné de tout l'apparat universitaire classique. En fait, beaucoup des ouvrages cités dans l'analyse constructiviste de la production scientifique sont des ouvrages destinés au grand public. Ceux-ci décrivent des recherches de pointe, à la mode, présentées comme ayant des implications métaphysiques ou philosophiques considérables. Des questions intéressantes certes, mais marginales par rapport aux travaux de la grande majorité des chercheurs. Réduire la science à ces questions bien connues du public et des médias assure automatiquement une audience aux épistémologues constructivistes.

Le langage de la science est hermétique. La vulgarisation informe utilement le public, mais il s'agit généralement de sujets qui peuvent se «romancer», soit que le chercheur puisse être présenté comme un héros, soit que sa recherche se prête à l'exposition de récit de création, soit que le décor de sa recherche soit mystérieux. Bref, la vulgarisation scientifique est un genre littéraire.

Les constructivistes exploitent un système de vulgarisation qui vise la séduction sociale en présentant le chercheur, le savant, comme un intermédiaire entre le monde quotidien du public et le monde supérieur du savoir. Ils se placent donc dans un cadre dominé par l'argument d'autorité. Pour démolir le principe de causalité, ils s'appuient sur ces textes écrits pour le grand public par des savants célèbres et titrés. Ceux-ci ont du succès parce qu'ils manipulent un discours qui exploite un vocabulaire de nature poétique (fractales, chaos, attracteur étrange, trou noir, complexité...). Ces récits sont construits sur des archétypes mythiques qui permettent de faire passer, à travers des spécialités un peu étroites, d'authentiques et excellentes leçons de science.

Sur cette base déformée, les constructivistes fabriquent un autre récit, où la

science et ses acteurs sont vilipendés. Dans certains ouvrages constructivistes, tel *L'invention de la réalité*, sous la direction de P. Watzlawick (éditions du Seuil), on trouve des attaques hargneuses contre la science et la technique, accusées «d'ôter toute signification à l'homme et à la civilisation». Ce discours n'est pas éloigné des positions anti-humanistes de l'écologie dure, qui refuse à l'homme la place qu'il se serait abusivement octroyée au centre du monde ; il est aussi dans la ligne du fameux manifeste d'*Unabomber*, terroriste américain récemment arrêté, et on le retrouve dans de nombreux écrits plus policés, tels ceux de Jacques Ellul. La communauté scientifique est généralement déroutée par ces attaques haineuses, passionnelles, auxquelles il est difficile d'opposer des raisonnements... qui ne sont pas entendus.

La tentation de répondre à la passion par la passion est grande : dans les colloques, les chercheurs et universitaires qui tentent de s'opposer à la montée du constructivisme en arrivent à suggérer qu'il est à l'épistémologie ce que le nazisme est à la politique et, peut-être, partie de celle-ci.

Le sentiment qu'est venu le temps du pluralisme, de la diversité des approches, autorise nos constructivistes à s'étonner que «la mémoire de l'eau ne puisse constituer un thème fort légitime de recherche fondamentale» (J. -L. Le Moigne, in *Penser le futur*, PSA éditeur). Et de s'indigner que les institutions publiques de recherche ne veulent pas «courir le risque». La «mémoire de l'eau», une affaire proposée par Giorgio Piccardi, un savant italien, dans les années 1950, est typiquement un thème mythique classique qui n'a aucune réalité, ce qui est facile à démontrer : la communauté scientifique internationale, pourtant friande de nouveautés, l'ignore complètement. C'est un exemple de la manière dont les constructivistes, plus sensibles au «médias que qu'au scientifique», mettent tout ce qui paraît «scientifique» sur le même plan, sans esprit critique.

Les communautés scientifiques et techniques devraient combattre les arguments populistes des constructivistes. Je ne crois pas que l'enseignement des sciences puisse, aujourd'hui, redresser rapidement une image du monde scientifique et technique qui se dégrade. La montée des ignorances et des superstitions est l'un des problèmes majeurs de notre temps, et une menace.

Paul CARO est délégué aux affaires scientifiques de la Cité des sciences et de l'industrie, membre correspondant de l'Académie des sciences.

Les impossibles de la finance

CHRISTIAN WALTER

Les fortes fluctuations boursières, krachs et bulles spéculatives, sont mieux modélisées par de nouvelles formes de hasard qui laissent plus de place aux décisions humaines singulières.

Pouvons-nous préserver notre argent contre l'inflation? Serait-ce impossible, car, comme le courant électrique, le pouvoir d'achat ne peut se stocker? L'argent se dévalue, et nous cherchons à placer notre épargne à des taux d'intérêt, variables avec le temps.

Il n'en a pas toujours été ainsi. Avant la Première Guerre mondiale, la situation de la «rente» ou des parités monétaires était plus stable, au point que l'on fabriquait des règles rigides avec des graduations fixes pour calculer les parités de change. Cette constance a été un accident de l'histoire, pourtant, l'idée d'une capitalisation régulière à un taux d'intérêt constant a toujours fait rêver.

LA CAPITALISATION UTOPIQUE

Peut-on capitaliser à l'infini? On connaît la métaphore du franc placé à l'époque de Vercingétorix, qui aurait si bien fructifié qu'il représenterait aujourd'hui la valeur marchande des réserves d'or mondiales ou même plus. Les enfants d'aujourd'hui peuvent regretter l'imprévoyance de leurs aïeux : que n'ont-ils placé un franc à l'époque! Ce regret peut être tempéré par le fait que les héritiers de l'ancêtre prévoyant devraient partager leur richesse avec beaucoup de descendants...

Le siècle des Lumières s'est beaucoup intéressé à la mathématique appliquée et à l'arithmétique sociale. On commençait à étudier les probabilités et les statistiques pour les appliquer à la finance et à l'assurance. De nombreux textes examinent les activités humaines pour y chercher des certitudes de même nature que dans les sciences de la nature. En 1785, un futur guillotiné, Mathon de la Cour écrit une utopie actuarielle : *Le songe d'un*

actuaire, qui concentre les courants de la pensée des Lumières en matière financière et s'achève dans une vision cosmique.

Dans ce songe, le héros, Fortuné Ricard, maître d'arithmétique, établit un testament décrivant l'utilisation future de 5 sommes de 100 livres au cours des six prochains siècles. Après un siècle, la première somme de 100 livres est portée à plus de 13 000 livres et Mathon de la Cour propose de l'utiliser pour financer des prix portant sur des dissertations théologiques.

Après deux siècles, la seconde somme de 100 livres a produit, calcule Mathon, 1 700 000 livres. Là il propose de créer 90 prix de 10 000 livres chacun, prix qui seront décernés chaque année par différentes académies du royaume, 15 prix pour les actions vertueuses – on retrouve les idées des Lumières – 15 pour les ouvrages de sciences et de littérature, 10 ceux d'arithmétique et de calcul, 10 pour les livres d'agriculture, etc.

Trois cent ans après, la troisième somme a produit 226 millions : une partie de ce montant est utilisée pour fonder 500 caisses patriotiques de prêts gratuits (!) et l'autre pour fonder 12 musées dans les plus grandes villes de France.

Au quatrième siècle après le dépôt, les intérêts exponentiels de la quatrième somme sont de 30 milliards et servent à construire 100 villes «de 150 000 âmes chacune», villes dans les zones les plus agréables qu'on pourra trouver en France et Mathon explique où trouver les lieux correspondants. Au cinquième siècle, les intérêts sont consacrés à payer la dette nationale de la France... et de l'Angleterre! Trente milliards constituent des fonds de rente. Mathon de la Cour s'arrête au bout de six siècles, car il ne sait plus quoi faire de son argent...

ACTIONS, OBLIGATIONS ET CAISSE D'ÉPARGNE

Rêve d'actuaire au siècle des Lumières! Examinons une période plus courte où les données sont chiffrées : de 1950 à aujourd'hui, la rentabilité du marché des actions de Paris a été de 6,66 pour cent net d'inflation. Quiconque aurait investi 100 francs il y a 45 ans sur un portefeuille d'actions posséderait aujourd'hui un montant qui représenterait un taux de 6,66 pour cent net d'inflation capitalisé annuellement. Les obligations rapportent 3,97 pour cent net d'inflation, tandis que les placements sur livrets de caisse d'épargne puis sur Sicav monétaire rapportent 0,09 pour cent net.

Sur de longues durées, des catastrophes détruisent les richesses, et sur des périodes moyennement longues, les fluctuations sont notables. La rentabilité certaine est impossible puisque les taux d'intérêt fluctuent : d'où une interrogation sur le risque des placements financiers.

En finance, le risque d'un investissement est la possibilité de ne pas obtenir la rentabilité espérée. On suppose que plus grande est la rentabilité espérée, plus importantes seront les fluctuations, donc le risque. Ainsi, en 1953, la performance brute du marché des actions a été de 26 pour cent, en 1963, de -15 pour cent, en 1978, de 55 pour cent, en 1987, de -24 pour cent. *Fluctuat nec mergitur.*

On caractérise les choix d'investissements par les espérances de gain et les risques associés. Pour ce faire, on détermine statistiquement deux paramètres, la moyenne des rentabilités successives, et leur écart-type (écart-type dénommé, dans le jargon des marchés financiers, la volatilité). Si la rentabilité espérée est de 8 pour cent, et la volatilité de 4 pour cent, il y a 66 pour cent de chance d'avoir une rentabilité réelle égale à 8 ± 4 pour cent, et 95 pour cent de chance d'avoir $8 \pm 7,84$ pour cent. La parabole de la volatilité enveloppe les valeurs possibles de la performance du portefeuille. Plus on accepte de prendre de risque, plus cette prise de risque se traduit par une volatilité élevée, qui modifie la forme de la parabole. Ces différences de rendement et de risque permettent les échanges, certains préférant la rentabilité et le risque, d'autres choisissant les placements sûrs et moins rentables.

La volatilité annuelle des marchés d'actions est égale à 25 pour cent, celle des obligations françaises de 7,6 pour cent, celle des placements monétaires pratiquement nulle. Gérants profes-

sionnels et épargnants particuliers, se posent la même question : sachant qu'une capitalisation infinie sans risque est utopique, quelle est la prise de risque acceptable ?

RISQUE SYSTÉMATIQUE ET RISQUE SPÉCIFIQUE

On distingue deux risques : le risque «systématique» et le «risque spécifique». Le risque «systématique» est celui du marché global : il correspond au choix d'investir sur une place boursière particulière. L'autre risque, le «risque spécifique», traduit le supplément de variabilité qui résulte de l'achat d'une action particulière. Quand on diversifie suffisamment un portefeuille, on annule l'effet du risque spécifique : seul subsiste le risque systématique.

On retrouve, dans cette séparation en deux composantes du risque, la distinction de Gauss entre erreurs accidentelles et erreurs systématiques. Il s'agit donc de savoir si les fluctuations des rentabilités spécifiques des actions participent bien d'une analyse en termes d'erreurs accidentelles.

Si l'on accepte l'hypothèse que les fluctuations des rentabilités boursières suivent une loi normale (la courbe «en cloche» de Gauss), la loi des grands nombres assure que les rentabilités spécifiques du portefeuille se compentent au cours du temps, et se rapprochent de la rentabilité systématique. Sur une longue période, une gestion active du portefeuille serait inutile, puisque ses performances convergeront vers la performance du marché global. Fortune du théorème central limite, désespoir des gérants de portefeuille.

Si la loi de distribution des rentabilités est normale, les investisseurs attendent tranquillement que le temps passe et que le risque s'annule progressive-

ment, en racine carrée du temps pour une loi gaussienne. En réalité, le marché ne fonctionne pas selon la loi normale, et l'on sait aujourd'hui que la rentabilité spécifique peut représenter une importante contribution à la rentabilité totale : les mesures de performance font apparaître, sur de courtes ou moyennes périodes, des résultats significativement différents de ceux auxquels on pouvait s'attendre dans un univers gaussien. On en rend compte en utilisant non pas une loi gaussienne (ou classique) de répartition des fluctuations, mais une loi où la queue de la distribution est plus étirée.

LA BOURSE N'EST PAS GAUSSIENNE

Remarquons que l'idée que le hasard régit les lois de fluctuations du marché boursier est révolutionnaire. Cette idée a été proposée le 29 mars 1900 par un mathématicien français, Louis Bachelier, qui a soutenu une thèse de doctorat en mathématiques intitulée *Théorie de la spéculation* (devant Henri Poincaré). Dans cette première approche, Bachelier considérait que les fluctuations des valeurs obéissaient à la loi normale de Gauss.

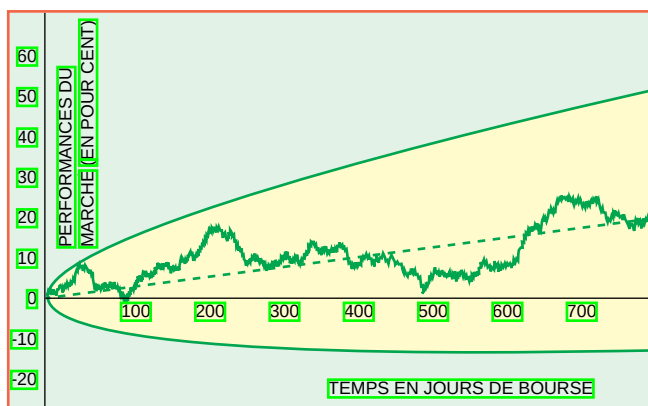
Or nous avons vu que les grandes variations de certaines actions sont plus fréquentes que ne l'indique la loi normale, et qu'elles contribuent notablement à l'évolution globale du marché. Si la bourse est fonction d'aléas très nombreux, ces aléas ne suivent pas, comme l'avait supposé Bachelier, la règle de n'être pas trop dispersés ni trop hétérogènes ; au contraire, les aléas sont parfois fortement hétérogènes. Ainsi, en suivant la démarche, de Bachelier, on est conduit à une loi appelée «stable» de Paul Lévy, qui généralise la loi normale de Gauss aux cas d'aléas

fortement dispersés. Si les fluctuations des rentabilités spécifiques s'apparentent à un «bruit» qui fluctue de manière aléatoire à toutes les échelles de temps autour de l'espérance de rentabilité systématique, ce bruit n'est pas gaussien. Pendant de très longues périodes, plus longues que celles prévues par la loi normale, la rentabilité réelle d'un investissement est bien supérieure (ou inférieure) à l'espérance de rentabilité.

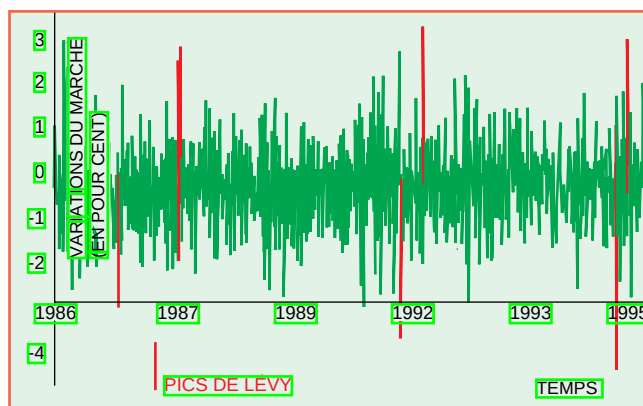
Cette constatation a semblé rouvrir un espace de liberté pour les gestions actives dont les acteurs recherchent des rentabilités spécifiques au moyen de l'analyse financière classique. Quand les fluctuations autour d'une moyenne sont très rapides, toute gestion active est impossible ; c'est le cas des modèles gaussiens de marché, avec vibration de la rentabilité spécifique autour de la rentabilité systématique. Si, au contraire, elles sont amples et lentes, les gestionnaires pourraient intégrer des éléments financiers sur les sociétés et obtenir des performances supérieures à celles du marché. Cette possibilité est-elle opératoire ?

LA TECTONIQUE DES KRACHS

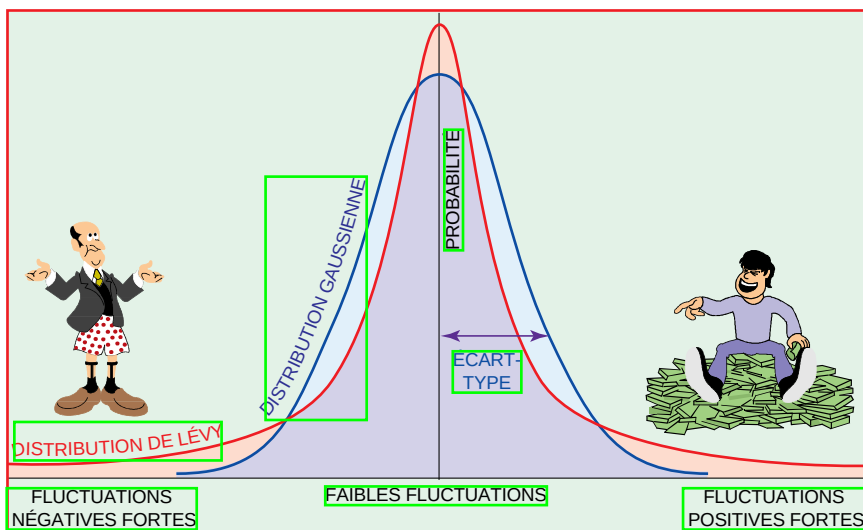
Une meilleure caractérisation des fluctuations, c'est-à-dire une meilleure adéquation à la réalité du marché, permet certainement une meilleure quantification du risque, mais qu'en est-il de la prévisibilité des grandes fluctuations ? Un changement de loi de probabilité permet-il de trouver une certaine forme de prévisibilité ? Après leur avoir fait miroiter un espoir, nous découragerons encore les gestionnaires : le changement de la loi marginale d'un processus aléatoire n'indique rien quant à la prévisibilité de l'événement à venir.



1. Les performances d'un marché gaussien en fonction du temps (en vert) sont encadrées par une parabole de volatilité. La rentabilité moyenne augmente linéairement selon l'axe de la parabole, laquelle correspond à un intervalle de confiance de 95 pour cent.



2. Variations quotidiennes du taux de change dollar-franc sur dix ans, exprimées en pourcentages. On observe un trop grand nombre de grandes valeurs (pics de Lévy, en rouge) par rapport à une variabilité gaussienne : la loi de Lévy rend mieux compte du phénomène.



3. Les amplitudes des fluctuations boursières en fonction de leurs fréquences sont mieux représentées par une distribution à queue étirée et à flancs maigres, comme la distribution de Lévy, que par une distribution de Gauss. Une plus grande probabilité des fortes variations rend mieux compte des krachs et des bulles spéculatives. On explique ces grandes fluctuations par le comportement mimétique des opérateurs boursiers ou par l'effet d'une nouvelle importante comme par exemple l'annonce de la réunification allemande.

Observons avec plus de précision les variations des cours, en utilisant l'indice de la bourse des actions américaines, le *Standard & Poor 500* (SP 500). On calcule la variabilité mensuelle des actions sur une période totale de 70 ans : cette rentabilité mensuelle moyenne est de 0,81 pour cent et la volatilité mensuelle de 5,82 pour cent si l'on aligne au mieux les valeurs mesurées sur une courbe de Gauss. Cela veut dire que le SP 500 peut fluctuer entre 0,81 pour cent $\pm$ 5,82 pour cent dans les deux tiers des cas (intervalle de confiance à 66 pour cent). La baisse maximale observée durant cette période est de -35,28 pour cent sur un mois, soit l'équivalent de six écarts-types. Avec une loi normale, la probabilité qu'une baisse mensuelle des cours soit de cette ampleur est égale à un milliardième ! Cela signifie qu'il faudrait attendre 83 millions d'années pour qu'un tel événement se reproduise !

En utilisant une loi stable de Lévy, l'ajustement des paramètres de cette loi au SP 500 donne une probabilité de 0,002, soit une durée de retour d'environ 40 ans. On voit que l'évaluation des krachs avec des lois larges est bien plus réaliste qu'avec des lois de Gauss.

Hélas cette connaissance de la fréquence de survenance des krachs ne dit rien sur la date du prochain. Il faut donc utiliser une autre approche pour répondre à cette question.

L'exemple des tremblements de terre vient à l'esprit. Une rupture sismique s'apparente à l'existence d'un point critique précédé d'émissions acoustiques, les «grincements des failles»,

signature de cette détérioration progressive : le système s'organise vers la rupture. Pourrait-on mettre en évidence en Bourse des équivalents de grincements de failles, préludes à des secousses plus fortes ?

Le remplacement de la loi normale, s'il ne prévoit pas la date du prochain krach, renseigne malgré tout sur la dynamique du marché boursier. Les queues de distribution décrites par des lois de Pareto-Lévy seraient la trace de phénomènes appelés «critiques auto-organisés» qui régiraient les comportements des opérateurs en interaction.

MODÉLISATION ET PRÉVISIBILITÉ

On essaye de relier un type de comportement à une forme de distribution. Ce faisant, on a redécouvert, depuis une dizaine d'années, les analyses de Keynes sur le mimétisme des opérateurs en situation d'incertitude. En effet, les paniques boursières comme les euphories résultent de processus cumulatifs de baisse ou de hausse des cours. Ces mouvements sont souvent autoréalisateurs.

On relie alors les phénomènes critiques auto-organisés, conduisant aux lois de puissance en physique, et les anticipations autoréférentielles, conduisant aux lois de puissance en finance (krachs et bulles spéculatives).

Les modèles de comportement des opérateurs traitent de l'impact des croyances des agents sur le fonctionnement du système global. Dans les modèles à anticipations rationnelles, on

suppose que les individus prennent leurs décisions de façon autonome, sans interaction.

Aujourd'hui, on imagine plutôt que, dans certaines situations d'incertitude, l'individu n'est plus sûr de son système de prévision personnel, et ce d'autant moins que le climat est incertain. Le gestionnaire de fonds imite alors son voisin. Ce comportement a été observé chez les fonds de pension, dont les gestions présentent des apparences imitatives. Cela n'est pas absurde ni véritablement surprenant. Les gérants de ces fonds, ou les gérants de SICAV, doivent réaliser de bonnes performances en fonction de leurs objectifs. Les classements réguliers des performances des SICAV ou des fonds rappellent en permanence qui fait quoi. Dans l'hypothèse où un gérant n'aurait aucune visibilité sur le marché, et donc aucune confiance dans une quelconque prévision (et en tous cas pas dans la sienne), la meilleure attitude ne consisterait-elle pas à se demander : «Que fait mon voisin ? Si je l'imites et que je me trompe, nous nous tromperons ensemble». La relativité des performances sera alors une protection contre des mauvaises appréciations de gestion. On peut voir dans ce comportement mimétique une conséquence de la concurrence acharnée pour la collecte de l'épargne : l'influence des classements relatifs dans les réallocations de l'épargne entre fonds peut entraîner des pertes d'autonomie chez les gérants qui sont influencés par ceux avec qui ils communiquent.

TACHES SOLAIRES ET FEUX DE FORÊTS

Comment formaliser ce degré de croyance par l'individu en son propre jugement ? Par des modèles de contagion mimétique. Dans ce cas, les anticipations ne seraient plus rationnelles au sens classique du terme, mais autovalidantes ou imitatives. Plus la contagion augmente, plus les vagues de panique diffusent, plus le mimétisme croît et plus on resserre une tension qui se résorbe dans les krachs. Les variantes de cette approche vont des anticipations autoréalisatrices aux modèles «taches solaires».

Supposons que le marché évolue en fonction des taches solaires. On observe alors les taches du Soleil, et on agit comme si elles avaient une influence... qu'elles ont par voie de conséquence. D'autres approches utilisent des automates cellulaires : la variable étudiée est le nombre d'agents paniqués. La structure temporelle fractale de la panique apparaît nettement, comme manifestation d'un état critique auto-organisé. Des fluctuations importantes correspon-

dent à des contagions d'amas de grande taille : un grand nombre d'opérateurs est concerné. La crise est due simplement à la convergence des anticipations, et non à un événement extérieur au marché, comme une annonce d'un résultat économique. Quand une certaine valeur critique est dépassée, le système bascule. Quand le climat d'incertitude du marché devient trop grand, on arrive à des situations où chacun peut quasi simultanément prendre une position acheteuse ou vendeuse. Il y a alors une polarisation des anticipations, et on dit que le marché *percole*.

La percolation du marché s'analyse avec des modèles de type « feux de forêts ». L'existence de vagues de panique laissant derrière elles des espaces vacants, les opérateurs non contaminés étant regroupés en « amas », est analogue à la diffusion des incendies en forêt.

Après un certain temps, la réalité reprend ses droits : le jour où l'on publie le résultat de l'entreprise, le marché revient à la valeur réelle de l'action. Quand la bulle éclate, le saut résultant entre la valeur réelle et la valeur anticipée est trop grand pour être calibré par loi de Gauss : cette loi n'est pas adaptée à la prise en compte des bulles et de leur éclatement.

UNIFICATION THEORIQUE DES GRANDES ET DES PETITES FLUCTUATIONS

Benoît Mandelbrot, par ses travaux sur les variations des prix économiques et spéculatifs, a cherché à rendre compte du caractère commun des fluctuations, quelle que soit leur taille. En cela, son approche s'écartait de la théorie classique qui séparait la tendance du bruit. Les deux modèles de B. Mandelbrot (1963 et 1965) ont décrit les grandes fluctuations et les persistances spéculatives haussières ou baissières, au moyen de lois stables de Lévy et de mouvements browniens fractionnaires : les fractales, dont B. Mandelbrot a prédit l'applicabilité aux phénomènes économiques et boursiers. On peut par une formule lapidaire résumer la caractéristique du marché selon B. Mandelbrot : le marché est très calme, sauf quand il bouge beaucoup. B. Mandelbrot suggérerait de passer d'une conception des marchés fondée sur l'équilibre et la rationalité, conception issue de la physique classique, à une conception qui donnerait plus d'importance à la turbulence et à l'instabilité : la physique des systèmes complexes.

Les progrès de l'informatique et l'augmentation de la disponibilité de la puissance de calcul, comme de l'ensemble des données disponibles, ont permis de

faire apparaître, grâce aux données de haute fréquence (relevé des cotations heure par heure, minute par minute) des phénomènes qui n'étaient pas observés jusqu'alors, et qui ont validé partiellement les intuitions de B. Mandelbrot : par exemple, des corrélations à longue portée ou des structures discontinues. Il n'en reste pas moins que certains phénomènes ne sont pas encore décrits : par exemple, il n'existe pas de théorie reliant les prix et les volumes de transactions. Les séries chronologiques des prix sont étudiées sans référence à la profondeur et à la liquidité du marché. N'est-ce pas réducteur pour la compréhension des bulles spéculatives ?

UNE CONTAGION LOGICIELLE ?

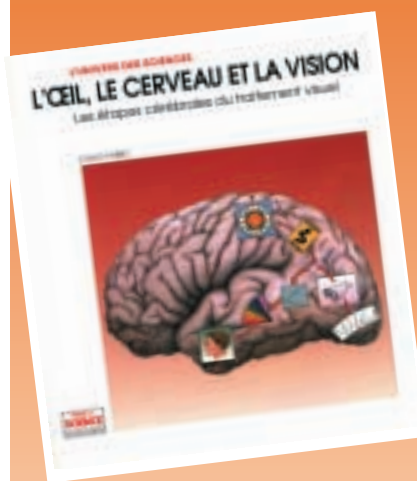
Simultanément, de la même manière que l'informatique permettait une meilleure caractérisation du comportement des marchés boursiers, se sont élevées des voix pour dire que l'informatique était aussi à l'origine des bulles spéculatives qu'elle observait mieux. Il s'agit de la question des programmes automatiques d'achat et de vente de titres, en fonction de filtres de variations données. Les stratégies automatisées ont-elles créé par « contagion logicielle » le krach de 1987 ? Nombre de tests ont porté sur des filtres d'intervention : si un cours a trop monté ou trop baissé par rapport à un niveau hypothétique, un seuil, alors le logiciel, ordonne ou déclenche l'ordre de vente ou d'achat. En fait, ces filtres ne sont pas stables, et aucun automatisme ne peut remplacer l'intuition humaine. B. Mandelbrot a montré en 1965 que les techniques des filtres, dès l'instant où des mécanismes non gaussiens régissent les marchés, étaient voués à l'échec. Aussi, le rôle de l'automatisation des ordres dans les bulles spéculatives n'est pas aussi clair que ses détracteurs le laissent entendre.

La géométrie fractale de B. Mandelbrot représente-t-elle « l'avenir indépassable de la modernité » financière ? Question à laquelle aucun conjecturiste ou actuaire ne pourrait répondre, tant sont variées les voies actuelles en finance théorique.

Christian WALTER est actuaire au Crédit Lyonnais, membre agrégé de l'Institut des Actuaire Français et chargé de cours à l'ESSEC.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, qui sera diffusé sur France Culture le 3 juillet 1996, à 9 heures.

L'UNIVERS DES SCIENCES



L'ŒIL, LE CERVEAU ET LA VISION

L'œil est un avant-poste du cerveau : lorsque nous regardons une scène, la lumière bombarde, dans notre rétine, plus de 100 millions de cellules photoréceptrices ; celles-ci convertissent l'énergie lumineuse en signaux électriques qui sont envoyés vers les aires visuelles de notre cerveau.

240 pages – 185 F
Code 1867

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

Turpin, chimiste... et excentrique

GEORGES BRAM • NGUYEN TRONG ANH

Inventeur d'un explosif efficace, il fut emprisonné injustement, et en perdit l'esprit.

Eugène Turpin fut un chimiste autodidacte talentueux, un écrivain prolifique autant qu'exalté et, bien malgré lui, un personnage de Jules Verne. Né à Paris, en 1848, dans une famille de petits commerçants, il travaille chez un dentiste dès la fin de ses études primaires pour gagner sa vie. Simultanément, il suit les cours du soir du Conservatoire des arts et métiers et ceux de l'Association philotechnique.

Après la guerre de 1870, il ouvre un atelier de fabrication de dentiers, puis de jouets en caoutchouc vulcanisé et découvre la chimie : les matières colorantes alors utilisées pour la teinture des jouets contiennent des sels de plomb et de mercure dont la toxicité détermine plusieurs pays, notamment l'Allemagne, à interdire l'importation des jouets de fabrication française.

Turpin met alors au point, à partir de dérivés du goudron de houille, des colorants inoffensifs, adaptés à l'industrie des jouets ; l'innocuité de ces produits est reconnue par l'Académie des sciences en 1877, et leur inventeur reçoit, pour ces travaux, la médaille d'or et de platine de la Société d'encouragement, et l'Académie des sciences lui décerne un

prix. En 1878, ses produits obtiennent un grand succès au Congrès international d'hygiène de Paris.

Puis, Turpin s'intéresse aux industries liées à l'armement, domaine particulièrement soutenu par les pouvoirs publics pendant ces années où l'on prépare la «revanche», après la défaite de 1870. En 1881, il présente un nouveau système de canon à tir rapide reculant sur son affût (contrairement aux canons précédents, le bâti supportant le canon ne bouge plus) ; son invention sera refusée par l'armée, mais son inventeur prétendra qu'elle a été le modèle de ce qui deviendra, 13 ans plus tard, le canon de 75... Nouvel exemple de récupération industrielle ou affabulation du découvreur ?

Turpin a davantage de succès dans le domaine des explosifs et des bombes. En 1881, il prépare de nouveaux mélanges explosifs, les panclastites (mélange de peroxyde d'azote ou d'acide nitrique concentrés avec un combustible liquide) et surtout, en 1885, la mélinite, c'est-à-dire de l'acide picrique, stable sous forme fondue. Il met au point un détonateur pour cet acide picrique. L'inventeur traite avec l'État, reçoit 250 000 francs et la Légion

d'honneur. La mélinite sera, durant la Première Guerre mondiale, un des explosifs les plus puissants utilisés par l'artillerie française

EN PRISON, À ÉTAMPES

En 1889, Turpin constate que son invention est proposée à une société anglaise par un capitaine d'artillerie territoriale, Triponé. L'année suivante, il dénonce cette trahison qui le spolie de ses droits dans un ouvrage intitulé : «Comment on a vendu la mélinite». Ce brûlot fait grand bruit : Triponé et deux de ses complices sont reconnus coupables de trahison, et condamnés pour avoir vendu aux Anglais un secret d'État.

Quant à Turpin, il est victime de l'atmosphère de défiance et d'espionnage qui règne alors et qui est entretenue par diverses affaires d'espionnage, où interviennent des militaires ou des employés du ministère de la Guerre. Il est poursuivi, accusé d'avoir «divulgué des secrets intéressant la défense nationale», dans son livre. Jugé à huis clos, il est condamné, en 1891, à cinq ans de prison !

Turpin est emprisonné, mais il a des défenseurs hors de sa prison, au parlement et dans la presse qui s'empare de l'affaire, généralement en défendant Turpin. Une campagne de presse en sa faveur commence au début de l'année 1893 : dans son numéro du 23 janvier, le supplément illustré du *Petit Journal* publie, sous le titre «Récompense nationale!» Turpin, les fers aux pieds dans sa prison, songeant aux exploits que l'armée française va réaliser avec sa mélinite !

Le 8 avril, à la veille de la grâce présidentielle dont bénéficie Turpin, le même journal publie en pleine page «La prison d'Étampes» où se trouve encore «M. Turpin, ce martyr». «Le Pilori»



Turpin fait la première page du supplément illustré du *Petit journal*, du 18 juin 1894.



Largement glorifié dans les journaux, Turpin l'est également sur des cartes postales. Il est présenté ici dans son laboratoire, avec pour légende : «Le célèbre inventeur de la mélinite».



Turpin est emprisonné dans la prison d'Étampes (en haut à gauche), car il est accusé d'avoir divulgué un secret d'état : dans un de ses livres, il donne la composition de la mélinite et décrit le détonateur qu'il a mis au point. Or, il avait écrit ce livre pour prouver que son invention avait été vendue aux Anglais par un traître, un capitaine d'artillerie. Le *petit Journal* prend parti pour Turpin en le représentant dans sa cellule et en sous-titrant l'illustration ci-dessus «Récompense nationale!» Quand Turpin est gracié, Le *Pilori* publie une illustration «Le cauchemar de M. de Freycinet» : le ministre de la guerre regarde, furieux, Turpin quitter sa prison (en bas à gauche).

célèbre en première page « La grâce de Turpin » en le montrant dans sa cellule entouré d'ustensiles de chimie et rêvant aux exploits de nos troupes ; dans la même page, « Le cauchemar de M. de Freycinet », alors ministre de la Guerre, illustre la dimension politique qu'a pris cette affaire.

Le *Journal Illustré* commente la grâce présidentielle en publiant le 23 avril un article accompagné d'un portrait de Turpin. Le *Petit Journal* du 29 avril consacre sa première page, sous le titre « Première heure de liberté », à la sortie de Turpin de la prison d'Étampes : il y aura passé près de deux ans. Eugène Turpin sera réhabilité en 1901, mais il n'aura de cesse, jusqu'à sa mort en 1927, de réclamer aux pouvoirs publics la

révision de son procès et la réparation de la spoliation dont il s'estime victime.

LES DÉLIRES DU MARTYR

En 1907, il publie un volumineux mémoire intitulé « Demande en révision ou annulation de procès et traité. Pour la patrie. Comment on m'a volé la mélinite en trahissant la France. Plainte-requête aux pouvoirs publics et à la nation »... Dans cet ouvrage, au ton souvent incantatoire, Turpin n'hésite pas à comparer son cas à l'affaire Dreyfus. Il estime que l'iniquité dont il a été victime est en fait plus grave que les torts subis par le capitaine alsacien. Il écrit, même, au détour d'une ligne, que toute l'affaire Dreyfus n'aurait été déclenchée que pour faire diversion à la sienne!

Turpin n'a pas supporté son incarcération à Étampes. Il y rédige deux ouvrages *L'Univers. La formation des mondes.* et *L'Univers. La cause des phénomènes*, qui lui vaudront d'être classé parmi les « fous littéraires » dans l'anthologie de l'auteur belge

André Blavier. Ces deux ouvrages figureront aussi dans la bibliothèque de Raymond Queneau, dont le catalogue, établi par Gérard Oberlé, a été publié sous le titre « Fous à lier, fous à relier. Excéntriques, fous littéraires, autodidactes, bizarres et autres ».

La formation des mondes est, selon Turpin, un ouvrage de cosmogonie très générale, où « d'étonnantes révélations » sont annoncées. L'auteur y dévoile, entre autres formulations aussi précises qu'inattendues, que, pour obtenir un « gramme de calorique », il faut brûler 500 000 milliards de tonnes de houille, ou qu'une calorie occupe un volume de un mètre cube ; on y apprend également que la lumière émise par le Soleil en 102 millions d'années augmente le poids de la Terre de un kilogramme par mètre carré.

Il affirme avoir déterminé « le poids de la lumière, de la chaleur de l'électricité et du magnétisme » au terme d'études pour lesquelles il a sacrifié ses « loisirs de prisonnier d'État pour délit de patriotisme et de probité ».

Dans *La cause des phénomènes*, il écrit que « le Soleil n'est rien d'autre qu'une immense pile pyro-électrique [...], que les marées sont produites par un phénomène d'induction mutuelle magnéto-électrique », phénomène pour lequel il dépose un brevet ; il affirme que « les chemins de fer, l'électricité et des milliers de choses que nous ne



Le paratomado est l'une des « inventions » fantaisistes de Turpin : l'explosion de charges de mélinite placées en haut de pylônes (au centre) devait détruire les cyclones qui endommagent les villes américaines.



Malgré ses démêlés avec la justice, Turpin est apprécié, et figure souvent en bonne place dans les journaux. Encore en 1915, alors qu'il a 67 ans, il fait la première page (ci-contre) de l'hebdomadaire *Le miroir* : «Une visite officielle : l'inventeur Turpin sur le front. L'infatigable chercheur qui découvrit la mélinite et auquel notre artillerie doit une large part de ses succès, est allé rendre visite à nos soldats. Le voici conversant avec des officiers et des sous-officiers». Turpin proposera deux modèles pour la croix de guerre (ci-dessus), mais ils ne seront pas retenus.

connaissions pas encore, ont été mises en œuvre sur la Lune, alors que la Terre était encore en feu».

LE PARATORNADO

Dans la partie du livre consacrée à la météorologie, Turpin décrit les ravages provoqués aux États-Unis par les cyclones, et imagine une installation, qu'il nomme le *Turpin's paratornado*, qui doit faire exploser les tornades et protéger ainsi les villes américaines exposées. Pour ce faire, il propose d'installer, à proximité de ces villes, un réseau de pylônes de 30 à 40 mètres de hauteur, terminés par une plate-forme qui porterait une charge de 200 kilogrammes de mélinite et un de ses détonateurs. L'explosion des charges de mélinite désintégrerait les cyclones et protégerait les villes menacées. Dès 1884, il envoie au journal *New York Herald*, un projet de paratornado, accompagné d'une notice explicative ; n'ayant pas reçu de réponse, il en conclut que sa lettre a dû s'égarer dans les bureaux du journal !

Les deux ouvrages de Turpin révèlent le caractère mégalomane et paranoïaque de l'auteur, mais aussi une culture scientifique et historique abondante, exacte et pertinente. De surcroît, Turpin, autodidacte, a des connaissances solides sur l'histoire de la chimie.

En 1896, Turpin rencontre Jules Verne à l'occasion de la publication de *Face au drapeau*. Dans ce livre, Jules Verne fait le portrait de Thomas Roch, chimiste français, savant incompris, inventeur d'un explosif, le Fulgurateur, assez puissant pour détruire la planète ; devenu fou, il se suicide en faisant exploser son Fulgurateur.

Sorti de prison depuis moins de trois ans, Turpin était très affecté par l'injus-

tice dont il avait été la victime. Il se reconnaît immédiatement dans le personnage de Thomas Roch qui fait les mêmes découvertes que lui et connaît les mêmes déboires avec les autorités militaires. L'ouvrage contient plusieurs mentions explicites à Turpin et à la mélinite, et l'auteur souligne même : «Il [Roch, alias Turpin] s'était vu exploiter avec une rare audace. N'ayant pu en retirer le bénéfice qu'il devait équitablement attendre, son humeur avait commencé à s'aigrir».

TURPIN ET JULES VERNE

Turpin intente alors un procès en diffamation à Jules Verne, dont l'avocat est Raymond Poincaré, le futur président de la République. Jules Verne et son défenseur nient que le personnage de Thomas Roch ait été inspiré par Turpin, mais sont obligés de reconnaître certaines allusions. Pourtant, Jules Verne écrivant à son frère Paul, nomme son roman «le Turpin»..., mais ces lettres ne seront connues qu'ultérieurement.

Turpin est débouté en première instance, puis en appel, et condamné aux dépens. Les juges reconnaissent que «Jules Verne s'est inspiré de la personnalité et des actes de Turpin», mais considèrent que ceci ne traduit pas chez l'écrivain une intention de nuire au chimiste. Le jugement, très favorable à Jules Verne s'achève ainsi : «Attendu qu'une telle fin [l'ilot où se trouve Thomas Roch est détruit, et le héros retrouve la raison face au pavillon français... d'où le titre du roman] peut servir d'exemple ; qu'il est peu probable qu'en faisant mourir son héros par patriotisme Jules Verne ait pensé à Turpin ; mais que, s'il en était ainsi, celui-ci, loin de se plaindre, ne pourrait qu'être fier qu'on l'ait cru capable d'un pareil dévouement à son pays ; par ces motifs le Tribunal renvoie Jules Verne des fins

de la plainte, et condamne Turpin aux dépens». Ce nouveau déni de justice renforce évidemment chez Turpin la conviction que la société continue à le persécuter ; cela n'améliore pas son caractère.

Il réapparaît dans la presse populaire pendant la Première Guerre mondiale. *Le Miroir*, hebdomadaire spécialisé dans les reportages photographiques, fait sa couverture, le 14 février 1915, d'une photographie montrant «l'infatigable chercheur qui découvrit la mélinite et auquel notre artillerie doit une large part de ses succès» conversant sur le front avec des militaires. En avril 1915, le même journal montre les deux projets que Turpin, aux talents éclectiques, avait proposés pour la croix de guerre dont la création venait d'être votée ; c'est un autre modèle qui sera adopté.

Turpin reste très populaire et ses activités seront illustrées par de nombreuses cartes postales. En 1919, l'hebdomadaire *Sciences et Voyages* propose aux jeunes, dans le cadre d'un concours, de désigner les cinq plus grands savants français en vie, et Turpin figure parmi les personnalités proposées par le journal. À sa mort, en 1927 à Pontoise, des notices nécrologiques lui sont consacrées dans de nombreux journaux.

Georges BRAM travaille à l'Institut de chimie moléculaire d'Orsay, et dans le Groupe d'histoire et de diffusion des sciences d'Orsay. NGUYEN TRONG ANH travaille au Département de chimie de l'École Polytechnique.

Eugène Turpin est l'un des personnages de l'exposition itinérante «Humour et courbes, graphismes acides et chimie souriante», où sont rassemblés des documents de la presse illustrée de la fin du XIX^e siècle (du 23 septembre au 31 octobre, au CNRS, à Paris ; du 1^{er} au 31 décembre, à l'École Polytechnique, à Palaiseau...).

Alimentation curative

Nos cousins primates choisissent leur alimentation en fonction de leurs besoins.

Pour les Grecs, les Barbares étaient ceux qui ne changeaient pas de régime alimentaire quand ils étaient malades. Au Laboratoire d'écologie générale du Muséum, à Brunoy, Claude Marcel Hladik et ses collègues démontrent que les singes seraient proches du monde civilisé : dans certaines circonstances, ils mangent des plantes contenant des alcaloïdes ou de la terre, afin de conserver un régime alimentaire équilibré, voire de traiter des troubles intestinaux.

Les réactions des primates aux solutions sucrées sont sans doute le plus frappant de leur adaptation : plus les animaux sont gros, mieux ils détectent les sucres. Apparemment les gros animaux, repérant mieux les aliments sucrés que les autres, peuvent se procurer davantage d'énergie. Une exception à cette règle qui prévaut tant pour les frugivores que pour les herbivores est le loris *Nycticebus coucang*, peu sensible au sucre ; est-ce parce qu'il doit simultanément tolérer le goût âcre des insectes et d'autres proies que d'autres singes ne tolèrent pas ?

L'homme, du point de vue de son seuil de perception des produits sucrés, est un primate normal : notre masse corporelle est notable, et nous sommes très sensibles au goût sucré. Néanmoins cette base biologique est modulée par l'environnement : les seuils de perception du glucose et du saccharose diffèrent chez les habitants des forêts tropicales et chez ceux des savanes, par exemple. Ainsi les pygmées, qui occupent des forêts où la concentration en sucre dans les fruits est élevée, ont une sensibilité aux goûts sucrés inférieure à celle des populations qui vivent dans les savanes, dont les plantes contiennent moins de sucre.

Les tests de sensibilité aux édulcorants éclairent ces études. Pour notre espèce, la monelline, une protéine présente dans les baies rouges de la liane africaine *Dioscoreophyllum cumminsii*, est 100 000 fois plus sucrée que le saccharose. Mais cette même monelline, dont les primates non humains d'Afrique identifient le goût, n'est pas perçue par les primates américains. La même différence existe pour la thaumatine, une protéine édulcorante

extraite du fruit d'une autre plante africaine *Thaumatococcus daniellii*. La retrouvera-t-on également pour la brazzéine, identifiée en 1994 dans la liane *Pentadiplandra brazzeana* ?

La différenciation des protéines réceptrices des papilles se produit probablement depuis 30 millions d'années, après la séparation des singes platyrrhiniens, dans le Nouveau Monde, et catarrhiniens, dans l'Ancien Monde. Dans leurs environnements respectifs, ces animaux ont trouvé des plantes différentes, avec lesquelles ils ont évolué, puisqu'ils en consommaient les fruits, tout en en dispersant les graines. En Amérique, où l'on n'a pas encore isolé d'édulcorant végétal, la coévolution devrait avoir fait apparaître des molécules originales, qui devraient être sans goût sucré pour les singes de l'Ancien Monde.

On savait depuis plusieurs décennies que les vertébrés pouvaient détecter le chlorure de sodium, et le rechercher en cas de carence : on connaît le cas des



Cette femelle chimpanzé, dans une forêt du Gabon, pèle une tige d'une liane marantacée *Hypselodelphis violacea* pour en extraire un jus qui apporte des acides aminés indispensables.

chevaux, qui ne lèchent les pierres à sel qu'en cas de besoin, et les études de rats carencés ont confirmé ces observations. Dans le milieu naturel et, notamment, dans les forêts, les carences en sel sont rares, mais, en 1978, le biologiste américain John Oates a observé que les singes *Colobus guereza*, qui, timides, restent généralement dans les frondaisons, descendent au sol pour manger les feuilles d'*Hydrocotyle ranunculoides*, qui pousse dans les mares ; or cette plante contient plus de sel que les autres.

MÉDECINE NATURELLE

D'autres primates mangent de la terre sans souffrir de carence en sel : le sol mangé par *Colobus satanas* (un autre colobe qui vit dans la forêt du Gabon) contient moins de sel que les fruits de son alimentation, mais cette consommation a lieu pendant les deux périodes de l'année où l'animal doit compléter son alimentation avec des feuilles très développées (le reste du temps les singes utilisent des jeunes pousses et des jeunes feuilles, ainsi que des fleurs, des fruits et des graines) ; or les feuilles âgées contiennent des polyphénols, ou tannins, qui inhibent la digestion des protéines en formant des complexes avec ces dernières. Comme l'argile et d'autres composés du sol sont de bons absorbants des tannins, on explique la géophagie comme une compensation de l'absorption des tannins. De tes aliments tu feras ta médecine, disait Hippocrate. Nos ancêtres singes lui auraient-ils soufflé l'idée ?

Souvent l'aversion pour les saveurs amères permet d'éviter l'ingestion d'alcaloïdes dangereux, ainsi que de composés astringents tels que les tanins, les terpènes, les saponines et les acides forts. Toutefois tous les composés toxiques ne sont pas amers : la dioscine, alcaloïde létal de l'igname *Dioscorea dumetorum* est presque sans goût. Le règne animal est protégé par le phénomène de néophobie, c'est-à-dire la peur de manger ce qui est nouveau, et par un conditionnement des symptômes postingestifs provoquant l'apparition d'une aversion (observée chez le rat et chez les primates). Inversement on connaît des cas de chimpanzés qui se guérissent en mangeant la plante amère *Vernonia amygdalina*, généralement évitée par les animaux en bonne santé. Cette plante contient plusieurs glycosides stéroïdiens, qui sont efficaces dans le traitement des troubles gastro-intestinaux.

Hervé This

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science*, le 30 juillet 1996, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

Jupiter visitée

La composition de son atmosphère explique sa formation et son évolution.

Comment le Soleil et les planètes qui l'entourent se sont-ils formés ? Les grandes lignes du scénario sont connues : il y a 4,5 milliards d'années une nébuleuse primitive de gaz et de poussières s'est effondrée sur elle-même et a donné naissance au Soleil. Les résidus de ce nuage se sont condensés en petites planètes rocheuses (Mercure, Vénus, Terre et Mars) près du Soleil et en géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) plus loin. Les mesures réalisées par la sonde *Galileo* dans l'atmosphère de Jupiter nous informent directement sur la composition d'une planète géante : elles confirment qu'elle s'est formée à partir d'un noyau rocheux.

Le 7 décembre 1995, la sonde *Galileo* a plongé dans l'atmosphère de Jupiter. Suspendue à un parachute, elle a transmis pendant près d'une heure, avant d'être détruite, des informations sur la composition de l'atmosphère jovienne jusqu'à plus de 200 kilomètres sous le sommet des nuages. Le vaisseau *Galileo*, en orbite 215 000 kilomètres plus haut, a ensuite retransmis ces données vers la Terre.

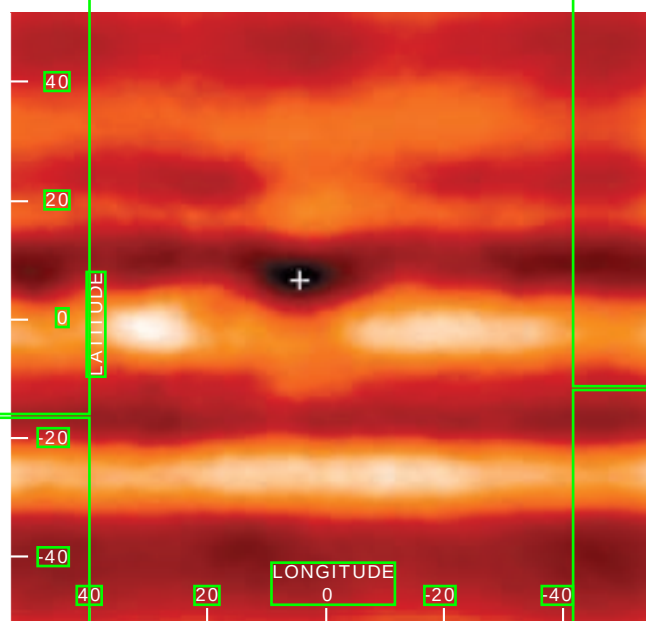
La composition globale de Jupiter est restée inchangée depuis sa formation. L'attraction de l'énorme masse de la planète (318 fois celle de la Terre) empêche en effet les éléments chimiques, même les plus légers, de s'échapper. La comparaison entre la composition de l'atmosphère de Jupiter et celle de la nébuleuse primitive éclaire donc les mécanismes de formation de la planète et son évolution. On déduit la composition de la nébuleuse primitive de celle du Soleil : l'effondrement gravitationnel qui a donné naissance à notre étoile était homogène et a emporté 99,9 pour cent de la masse de la nébuleuse.

On sait, grâce à la spectroscopie, que l'atmosphère de Jupiter est constituée à plus de 99 pour cent d'hydrogène et d'hélium, les deux éléments les plus abondants dans l'Univers. *Galileo* a mesuré une concentration en hélium de 14 pour cent. C'est nettement plus que les 10 pour cent estimés à partir des observations des

sondes *Voyager* en 1979. Même réévaluée, cette concentration ne correspond toutefois qu'aux quatre cinquièmes de l'hélium présent dans la nébuleuse primitive. Où est donc passé ce gaz ?

PLUIE D'HÉLIUM

La température et la pression sont si grandes dans les couches profondes de l'atmosphère de Jupiter que l'hydrogène forme une phase métallique. L'hélium, qui ne se mélange pas avec cette phase, se condense en gouttelettes qui tombent vers le cœur de la planète. Le néon, soluble dans les gout-



Le point de chute de la sonde *Galileo* sur Jupiter (croix blanche) était une région pauvre en nuages. Sur cette image prise de la Terre dans l'infrarouge proche, les zones les moins nuageuses sont les plus sombres.

telettes d'hélium, migre aussi vers l'intérieur de la planète : les mesures de *Galileo* confirment qu'il est moins abondant que prévu. Cette pluie d'hélium se produirait aussi dans l'atmosphère de Saturne, qui contient moins de cinq pour cent d'hélium : l'énergie gravitationnelle ainsi libérée expliquerait le flux thermique anormalement grand émis par la planète.

Le carbone (sous forme de méthane) et le soufre (sous forme de sulfure d'hydrogène) sont, contrairement à l'hélium, plus abondants dans l'atmosphère de Jupiter que dans la nébuleuse primitive :

trois fois pour le carbone et 2,2 fois pour le soufre. *Galileo* a, en revanche, mesuré une concentration atmosphérique de vapeur d'eau cinq fois moins importante que celle de la nébuleuse primitive. Ces abondances sont expliquées par l'histoire de Jupiter.

Un noyau s'est formé d'abord, par accréation de planétésimaux, petits corps rocheux ou glacés. L'attraction gravitationnelle de ce noyau a ensuite piégé les gaz de l'atmosphère. L'augmentation de la température des roches lors de l'accréation du noyau a vaporisé une partie des glaces : l'enveloppe gazeuse a été alors enrichie en éléments lourds, tels le carbone et le soufre. En revanche, l'eau, moins volatile, serait restée dans le cœur solide.

Les différences de composition entre Jupiter et la nébuleuse primitive permettent d'exclure un autre mécanisme de formation : un effondrement local de la nébuleuse, similaire à celui qui a donné naissance au Soleil. La sécheresse relative de l'atmosphère écarte aussi un scénario selon lequel l'excès d'éléments lourds proviendrait de la dissolution dans l'atmosphère de comètes ou de planétésimaux, capturés par le champ gravitationnel de la planète. Ces petits corps rocheux, qui contiennent beaucoup de glace, auraient toutefois enrichi l'atmosphère non seulement en méthane et en sulfure d'hydrogène, mais aussi en eau, ce qui est contraire aux observations.

N'oublions pas cependant que la sonde n'a pénétré l'atmosphère de Jupiter que sur 200 kilomètres d'épaisseur, en un point particulier. Selon les images prises de la Terre, elle a plongé dans une région extraordinairement claire et sèche, sans doute l'une des moins nuageuses de toute la planète. L'instrument de *Galileo* qui a mesuré la densité de particules n'a pas détecté le nuage massif de glace d'eau prédit par les modèles. Le nuage de cristaux d'ammoniac situé à des altitudes plus élevées et visible sur la plus grande partie de Jupiter était aussi absent. Dans cette région, un puissant courant descendant apporterait du gaz sec appauvri en éléments condensables, asséchant l'atmosphère jusque sous l'altitude attendue du nuage d'eau. Il y aurait alors un peu plus d'eau sur Jupiter que *Galileo* n'en a détectée.

Bruno BÉZARD
CNRS, Observatoire de Paris-Meudon

La qualité de vie

Elle augmente depuis le début du siècle.

Ces deux cartes reflètent l'indice de qualité de vie mis au point par des chercheurs américains de l'Université Brown, pour mesurer les progrès des pays en développement. L'indice de qualité de vie d'un pays est fondé, sur l'espérance de vie à l'âge de un an, sur la mortalité infantile et sur la proportions d'illettrés. Les valeurs s'échelonnent de 6,3 pour la Gambie en 1960, à 94 pour le Japon en 1990. L'avantage de cette mesure sur d'autres évaluations de la qualité de vie est qu'elle utilise des résultats établis et non des estimations.

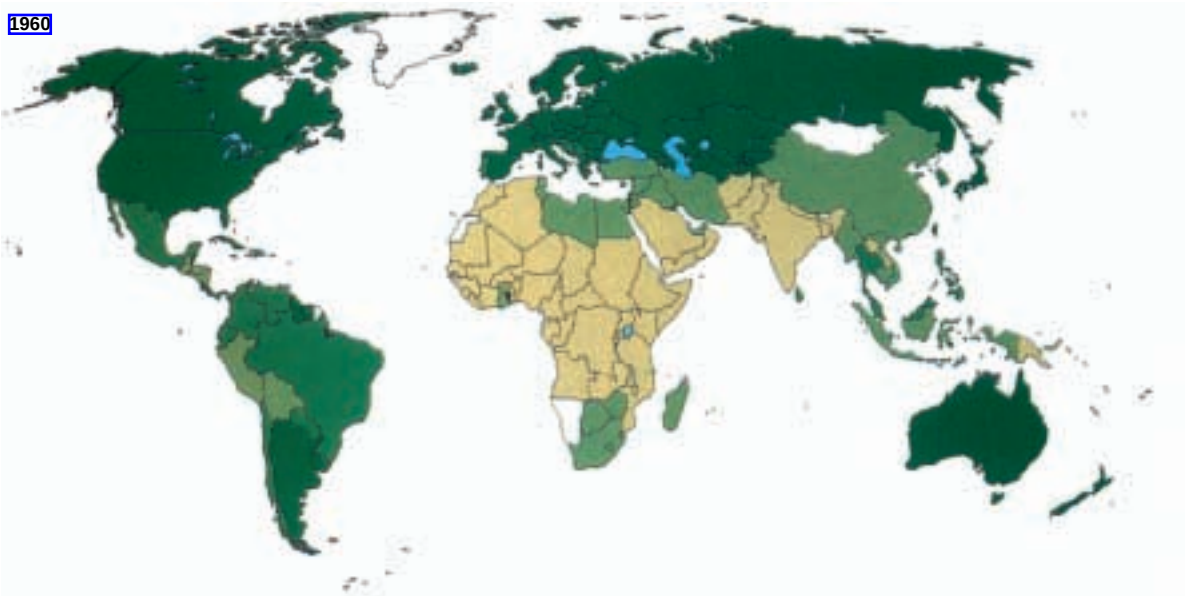
Alors qu'en Iran, par exemple, le produit national brut par habitant vaut moins d'un tiers de ce qu'il est en Arabie Saoudite, les indices de qualité de vie des deux pays sont égaux, ce qui indique que les richesses sont réparties plus équitablement en Iran.

L'examen de ces cartes fait ressortir que, malgré une importante augmentation de la population mondiale, la qualité de vie des pays en développement s'est améliorée, y compris dans ceux de la région sub-saharienne, la plus pauvre du Globe. Des données préliminaires pour

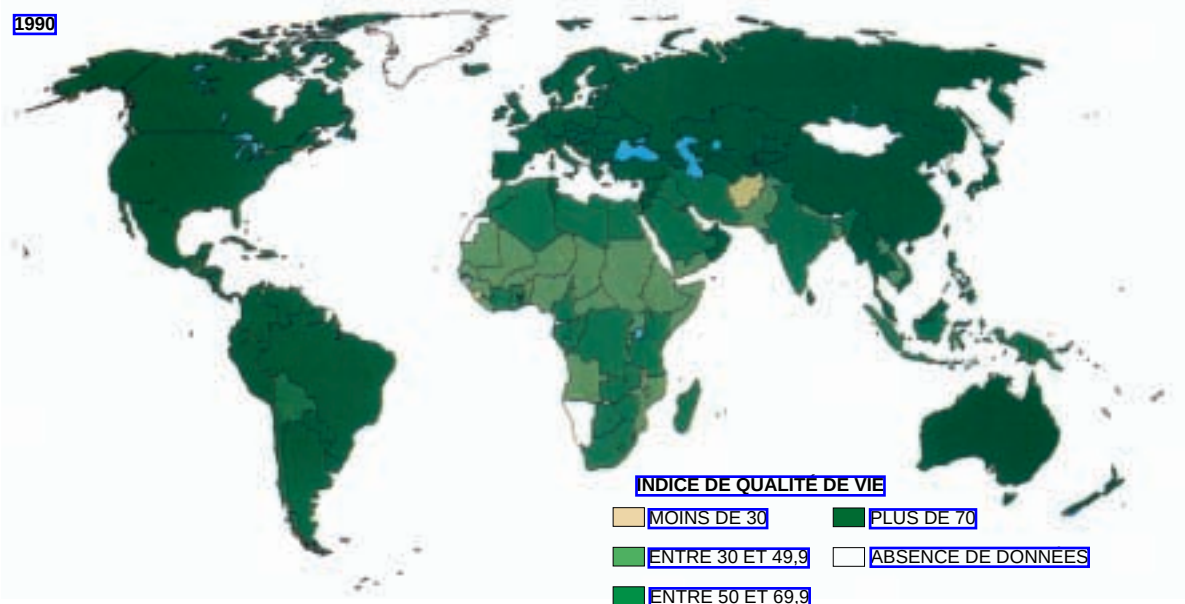
l'année 1993 montrent un progrès important dans la plupart des régions, excepté dans les 13 pays sub-sahariens dont la chute moyenne de l'indice est de 3, résultat d'une augmentation de la mortalité infantile et d'une diminution de l'espérance de vie. Cette chute d'indice est due, en partie, à l'extension de l'épidémie de SIDA qui a touché cette région du Globe plus durement qu'ailleurs.

L'avenir ne sera peut-être pas aussi sombre qu'il n'y paraît, car l'épidémie de SIDA pourrait être enrayée dès le début de la prochaine décennie. De surcroît, les données historiques indiquent une augmentation à peu près constante de l'indice de la qualité de vie : alors que le Sri Lanka avait un indice de 19 en 1921, en 1993, cet indice atteignait 85. N'oublions pas qu'il y a cent ans, la France avait un indice de qualité de vie équivalent à celui des pays sub-sahariens aujourd'hui. □

1960



1990



Fond infrarouge

Le satellite COBE a détecté le rayonnement émis lors de la formation des premières galaxies.

Comment se forment les galaxies ? Cette question est une énigme. Un pas vers la réponse vient d'être franchi : le rayonnement émis par les galaxies à leur formation a été identifié dans les observations du satellite COBE par une équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale à Orsay. Le rayonnement détecté correspond à l'émission des premières générations d'étoiles lorsque l'Univers avait moins d'un milliard d'années.

La formation des galaxies résulte d'une importante concentration de matière en certains points de l'Univers. Lorsque la densité est suffisante, la matière s'effondre sous son propre poids formant ainsi les premières étoiles qui s'agglutinent en galaxies. À la fin de leur vie, l'explosion des étoiles massives dissémine les atomes fabriqués en leur sein qui serviront pour les générations ultérieures d'étoiles.

Ainsi, de génération en génération, la composition des étoiles reflète l'histoire des éléments produits en leur sein. Comme les étoiles moins massives que le Soleil ont une durée de vie supérieure à l'âge de l'Univers (15 milliards d'années), on en observe de toutes les générations. Leur étude montre que l'abondance des atomes lourds, comme le carbone, l'oxygène et le fer, atteint une valeur proche de l'abondance actuelle très tôt dans l'histoire de notre Galaxie : ces atomes ont été formés par les premières générations d'étoiles.

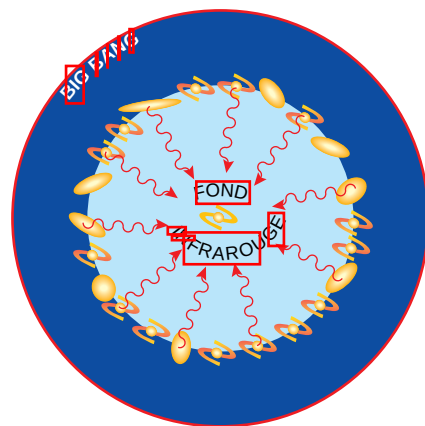
La formation de notre Galaxie a dû coïncider avec une gigantesque flambée d'étoiles, notamment d'étoiles massives qui rejettent après quelques millions d'an-

nées les éléments qu'elles ont synthétisés. Les astrophysiciens pensent donc que, lors de leur formation, les galaxies étaient des objets très lumineux. On prédit cette luminosité en estimant le nombre d'étoiles massives nécessaires pour former les atomes lourds présents dans les galaxies.

Comme les étoiles naissent dans des cocons de gaz et de poussières, le rayonnement visible et ultraviolet des étoiles est absorbé puis émis à une longueur d'onde inférieure, dans l'infrarouge. De plus, depuis l'époque de leur formation, les premières galaxies se sont éloignées de nous en raison de l'expansion de l'Univers. Plus les galaxies sont loin de nous, plus elles s'éloignent vite, ce qui décale la longueur d'onde de ce rayonnement vers le rouge par rapport à l'émission infrarouge des étoiles de notre Galaxie. On s'attend donc à une émission isotrope, dans l'infrarouge.

SOUSTRARE LA GALAXIE

Le satellite d'observation à vocation cosmologique COBE a réalisé une série de cartes du ciel, de l'infrarouge proche aux ondes radio (à des longueurs d'onde comprises entre un millionième de mètre et un centimètre). La détection du rayonnement qui résulte de la formation des premières galaxies, nommé fond extragalactique infrarouge, est difficile car il faut extraire l'émission extragalactique de toutes les autres contributions à l'émission infrarouge détectée par COBE. À ces longueurs d'onde, la brillance du ciel est



Sur cette représentation où notre Galaxie est au centre, des cercles concentriques de rayons croissants représentent des événements simultanés de plus en plus anciens. Un milliard d'années après le Big Bang, lors de la formation des premières galaxies, une intense flambée d'étoiles émet un rayonnement infrarouge.

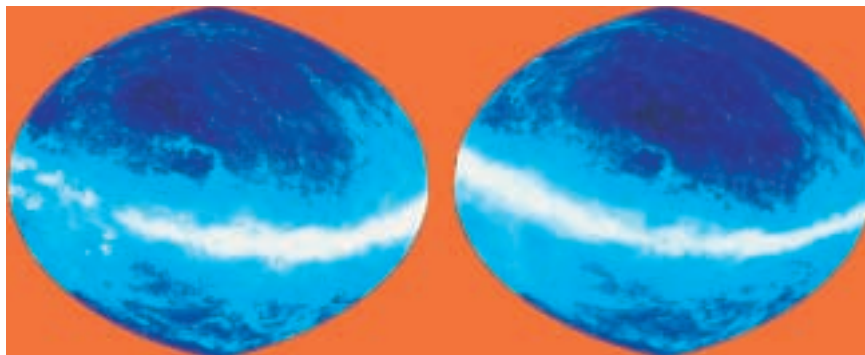
dominée par l'émission de petites poussières distribuées partout dans notre Galaxie et chauffées par les étoiles.

La corrélation entre la distribution de l'émission infrarouge et de l'émission de l'hydrogène permet d'utiliser l'hydrogène comme marqueur des poussières galactiques. À l'aide de l'émission de l'hydrogène qui provient uniquement de notre Galaxie, on estime le spectre de l'émission des poussières galactiques. La soustraction de ce spectre au spectre infrarouge de COBE révèle l'existence d'un résidu isotrope ayant un spectre décalé vers le rouge par rapport à celui de la composante galactique.

Comme le rayonnement est isotrope, ce résidu ne peut venir ni du disque de notre Galaxie, ni de l'intérieur du Système solaire, car toute la matière y est concentrée autour du plan de rotation des planètes. Si cette émission provenait d'un nuage de comète, tel le nuage de Oort, le Soleil serait nimbé d'un halo infrarouge visible de l'extérieur du Système solaire. Comme une telle source d'émission n'est pas détectée autour des étoiles proches (que l'on imagine, de ce point de vue, semblable au Soleil), cette origine est peu vraisemblable. On écarte de même une explication liée à un halo sphérique de grande taille autour de notre Galaxie, car on n'observe pas de tels halos autour des galaxies voisines : l'hypothèse extragalactique est la plus plausible.

De surcroît, l'intensité de l'émission mesurée correspond à celle calculée par les modèles théoriques réalisés avant la détection. La détection du fond extragalactique apporte une information globale sur la formation des galaxies. La détection des objets individuels qui contribuent à ce fond en précisera le scénario.

François BOULANGER, IAS, Orsay



La carte du ciel en infrarouge obtenue par le satellite COBE (à gauche) résulte de l'émission des poussières galactiques plus d'un éventuel fond infrarouge (plus les couleurs sont claires plus l'émission est intense). La ressemblance de cette carte avec celle de l'émission de l'hydrogène (à droite) montre que le gaz est un marqueur des poussières galactiques. Ainsi, on estime la composante infrarouge galactique. En ôtant cette composante à la carte infrarouge globale, on obtient une carte uniforme : le fond extragalactique infrarouge.

L'ecstasy

La drogue entraîne une élévation parfois mortelle de la température corporelle.

Cette substance est apparue sur le marché de la drogue, il y a une dizaine d'années, et le nombre de consommateurs augmente (25 000 personnes auraient déjà consommé cette drogue, en France, 500 000 en Grande-Bretagne). Elle est responsable d'intoxications aiguës et d'hyperthermie, c'est-à-dire d'une augmentation de la température qui dépasse, parfois, les limites compatibles avec la vie.

L'ecstasy est un dérivé de l'amphétamine qui entraîne un fort désir de se lier à autrui. La réduction des inhibitions sociales libèrent l'expression des sentiments et de l'émotivité. L'ecstasy a été qualifiée de «pilule de l'amour», bien qu'elle inhibe les capacités sexuelles. Comme tous les dérivés de l'amphétamine, l'ecstasy augmente la vigilance, améliore l'humeur et donne l'impression d'avoir une énergie musculaire décuplée : les consommateurs dansent pendant des heures.

Elle est généralement consommée lors des soirées rave (du verbe anglais délirer) : des centaines d'adolescents se rassemblent dans des bâtiments désaffectés pour danser toute la nuit au rythme des décibels. L'ecstasy est volontiers associée à d'autres produits tels que l'amphétamine, la cocaïne ou le LSD, mais jamais à l'alcool qui en inhibe les effets.

Outre les effets recher-

chés, l'ecstasy entraîne de nombreux effets indésirables : une hypertension, des troubles du sommeil, une perte de l'appétit, une agitation accompagnée de douleurs musculaires et de tremblements, une contraction des mâchoires, une sudation abondante...

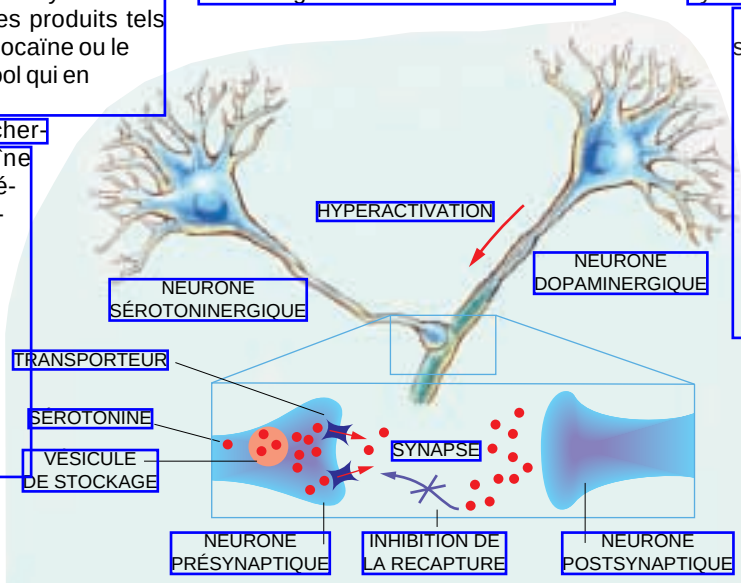
De surcroît, la consommation de la drogue déclenche une forte augmentation de la température corporelle. L'hyperthermie peut atteindre des valeurs extrêmes (au-delà de 42 °C). Les études chez l'animal

ont montré que cette augmentation est d'autant plus forte que la température extérieure est élevée, l'atmosphère confinée, l'environnement bruyant et l'animal déshydraté. Ainsi, l'hyperthermie serait favorisée par les conditions extrêmes qui règnent dans les soirées rave.

ECSTASY, SÉROTONINE ET DOPAMINE

Les études chez l'animal montrent que l'hyperthermie et les troubles comportementaux résultent de l'hyperactivité des neurones qui libèrent la sérotonine, les neurones sérotoninergiques. Ces neurones qui participent à divers mécanismes physiologiques, tels le sommeil, l'agressivité, l'anxiété, l'humeur, ou encore les comportements alimentaires et sexuels, commandent aussi la régulation de la température corporelle.

Les personnes qui succombent à une prise d'ecstasy ne meurent pas directement de l'hyperthermie, mais de ses conséquences, notamment de la coagulation du sang dans de nombreux vaisseaux, et d'une insuffisance rénale aiguë.



En présence d'ecstasy, les neurones sérotoninergiques libèrent tout leur stock de sérotonine ; les transporteurs déversent le neuromédiateur vers l'extérieur, au lieu d'en assurer la recapture, c'est-à-dire le stockage dans le neurone pré-synaptique. L'accumulation de sérotonine dans la fente synaptique est responsable de l'hyperactivation du système dopaminergique, le système du plaisir et de la récompense.

Comment l'ecstasy déclenche-t-elle ses effets euphorisants ? La plupart des drogues, telles que l'héroïne, la cocaïne, l'amphétamine, mais aussi la nicotine et sans doute l'alcool, agissent directement sur le système dopaminergique, le système de la récompense et du plaisir. Contrairement à ces drogues, l'ecstasy agit d'abord, nous l'avons souligné, sur les neurones sérotoninergiques, dont l'activation aboutit, *in fine*, à celle des neurones dopaminergiques.

Les neurones stimulés libèrent les neuromédiateurs dans la fente synaptique, l'espace qui sépare deux neurones. Les neuromédiateurs libérés activent les neurones postsynaptiques qui transmettent les signaux.

Normalement, les concentrations en neuromédiateurs sont contrôlées par divers mécanismes qui les maintiennent constantes. Les neuromédiateurs sont recaptés par les neurones présynaptiques et stockés dans des vésicules. Des «transporteurs», des molécules qui sont localisées sur la membrane neuronale, assurent cette recapture.

L'équilibre est perturbé par l'ecstasy qui, d'une part, entrave la recapture et, d'autre part, entraîne la libération massive des vésicules qui se vident de leur contenu. Les neuromédiateurs sont alors déversés dans la fente synaptique par les transporteurs qui inversent leur fonction : au lieu de conduire les neuromédiateurs de l'extérieur du neurone vers l'intérieur, ils les relarguent dans la fente synaptique.

Le déséquilibre du système sérotoninergique entraîne celui du système dopaminergique qui subit également une inhibition de la recapture et une inversion du transporteur. Les concentrations en sérotonine et en dopamine augmentent notablement dans le cerveau, ce qui explique l'hyperactivité du système dopaminergique.

A long terme, chez le singe, on constate une dégénérescence de certains neurones sérotoninergiques ; les autres subissent des réarrangements anormaux de leurs terminaisons. Les neuropathologistes recherchent si ces anomalies, observées chez le singe, surviennent également chez l'homme.

Sylvain PIROT, Association pour la neuro-psychopharmacologie, Paris

Poisson-éléphant

Il a un cerveau très gourmand en oxygène, peut-être en raison de son système, très élaboré, de réception et d'analyse des signaux électriques.

Le poisson-éléphant ou *Gnathonemus petersii* vit dans les eaux douces des rivières et des lacs d'Afrique tropicale, mais s'adapte aisément en aquarium. Ce petit poisson électrique est caractérisé par un prolongement mentonnier – une sorte de trompe – qu'il utilise pour chercher sa nourriture. Or, Göran Nilsson, à l'Université d'Uppsala, a découvert que le cerveau de ce poisson consomme proportionnellement plus d'oxygène que le cerveau humain.

La consommation d'oxygène du cerveau d'un vertébré est comprise entre deux et huit pour cent de l'oxygène absorbé ; elle atteint 11 à 13 pour cent chez certains primates ; l'homme détenait le record avec 20 pour cent, mais *Gnathonemus petersii* est inégalable : son cerveau consomme près de 60 pour cent de l'oxygène total absorbé !

Pourquoi cette «gourmandise» en oxygène ? G. Nilsson l'attribue à la taille exceptionnelle du cerveau qui représente environ 3,1 pour cent du poids total du poisson (celui de l'homme représente 2,3 pour cent et celui d'un poisson «standard» un pour cent au plus) – et à sa très grande vascularisation. Par ailleurs, le

cervelet, anormalement développé par rapport à celui des autres poissons électriques, pourrait aussi être responsable de la surconsommation d'oxygène. Enfin, ce poisson est doté d'un système de traitement des informations électriques très élaboré.

Gnathonemus petersii est pourvu d'un organe électrique, placé près de la queue et dont les cellules, les électrocytes, émettent de l'électricité. Sous le contrôle d'un centre «rythmeur», situé à l'arrière du cerveau, cet organe produit de brèves impulsions de fréquence variable, qui permettent aux poissons de communiquer entre eux ou de s'orienter.

Quelles sont les particularités de l'activité électrique du poisson-éléphant ? L'équipe de Kirsty Grant, à l'Institut Alfred Fessard, du CNRS à Gif-sur-Yvette, s'intéresse aux mécanismes de la perception et a étudié les circuits électrosensoriels du cerveau de *Gnathonemus petersii*. Les poissons de la famille des mormyridés, à laquelle il appartient, ont trois types d'électrorécepteurs cutanés : les organes ampoulaire, sensibles aux ondes électriques de basse fréquence qu'engendre tout mouvement en milieu aquatique ; les knollenorganes,

qui servent à la communication ; les mormyromastes qui, à la façon des radars, sont utilisés pour la navigation.

SENS ELECTRIQUE

Lorsque le centre rythmeur émet des ordres de décharge le long de la moelle épinière jusqu'aux électromotoneurones, ces derniers excitent les électrocytes et provoquent la décharge de l'organe électrique. Le champ créé autour du poisson est déformé par les obstacles dont la conductivité diffère de celle de l'eau ; ces signaux électriques, modulés par l'environnement, sont captés par les récepteurs cutanés, lesquels donnent au cerveau une représentation de la forme du champ extérieur.

Quelles qu'elles soient, les informations sensorielles utiles doivent être distinguées du bruit de fond ambiant. Pour discerner ses propres signaux de ceux d'autrui, le poisson-éléphant se sert d'un «sens électrique», un système sensoriel qui filtre les messages perçus.

Simultanément au signal émis dans la moelle, le générateur cérébral en transmet une copie vers le cerveau : ce double de l'ordre moteur, nommé décharge corollaire, informe les centres sensoriels cérébraux du poisson de sa propre émission électrique et de l'arrivée imminente d'un signal en retour. En comparant le signal émis et le signal reçu, le poisson sélectionne les informations utiles.

Le sens électrique de *Gnathonemus petersii* fonctionne grâce à ces deux circuits indépendants. Le principe de l'analyse des signaux est similaire pour les trois types d'électrorécepteurs, mais la décharge corollaire est traitée différemment : lorsque le poisson «converse» avec ses congénères, la décharge corollaire masque les émissions du poisson, lequel est comme sourd à sa propre décharge, pendant de brefs instants ; lorsqu'il observe, immobile, les alentours, le système de traitement des informations de *Gnathonemus petersii* fait la soustraction de l'image réémise par l'environnement et de la décharge corollaire, détectant ainsi tout mouvement étranger ; enfin, lorsqu'il se déplace, le poisson-éléphant amplifie le signal en retour, afin de mieux percevoir toute perturbation de son propre champ.

Tout en mémorisant des images de référence, *Gnathonemus petersii* s'adapte instantanément à un environnement changeant. Les chercheurs de Gif-sur-Yvette étudient comment se font ces ajustements «dynamiques» des filtres neuronaux.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Gnathonemus petersii, le poisson-éléphant, a un cerveau qui consomme beaucoup d'oxygène.

Les adaptations des Sherpas

Les Sherpas optimisent la fabrication de l'énergie dans leurs muscles.

En 1875 à bord d'une montgolfière qui atteint l'altitude record de 8 600 mètres, Eustache Crocé-Spinelli et Théodore Sivel meurent d'une syncope due à la diminution de l'oxygène dans l'organisme. Aujourd'hui, en grimant plus progressivement, l'homme résiste au manque d'oxygène. Cependant, tous les alpinistes ne s'adaptent pas de la même façon : Peter Hochachka et ses collègues de l'Université de Vancouver ont montré que le cœur des Sherpas, peuple montagnard du Népal, utilisaient l'oxygène de manière plus efficace que les natifs de basse altitude.

Lors de l'effort, la contraction des fibres musculaires est assurée principalement par la dégradation de l'adénosine triphosphate (ATP), le carburant des muscles. Or, l'organisme ne dispose que d'une petite réserve d'ATP. Deux métabolismes, contrôlés par des enzymes, fabriquent ce carburant : le métabolisme anaérobie et le métabolisme aérobie. Le premier mécanisme fabrique de l'ATP en l'absence d'oxygène par dégradation du glucose (glycolyse anaérobie). L'acide lactique, produit final de ce mécanisme biochimique, inhibe l'activité des enzymes responsables de la glycolyse, limitant la production de l'ATP.

Durant les efforts longs, l'ATP est surtout fabriquée par le métabolisme aérobie. Les glucides et les lipides y sont dégradés pour former de l'ATP. La capacité de cette transformation, mesurée par la consommation maximale d'oxygène, est limitée en altitude : à 8 800 mètres, la pression partielle en oxygène est trois fois inférieure à sa valeur au niveau de la mer.

Les performances physiologiques des Sherpas sont supérieures à celles des alpinistes. Les Sherpas ont une plus grande capacité de travail pour une même consommation limitée d'oxygène. De plus, ils produisent moins d'acide lactique pour une même puissance développée. Ces paradoxes traduisent une adaptation

structurelle et fonctionnelle des cellules des muscles.

La structure des muscles des Sherpas a été comparée à celle de sujets caucasiens après un séjour en altitude : le type et l'organisation des fibres sont identiques. En revanche, l'activité enzymatique des fibres musculaires explique pourquoi ces populations peuvent porter de lourds fardeaux sur les sentiers himalayens. En étudiant l'activité des enzymes présentes dans le muscle, on constate une diminution de l'activité de la pyruvate kinase, une enzyme qui intervient dans la glycolyse anaérobie, et de la lactate déshydrogénase enzyme qui forme ensuite l'acide lactique. De plus l'activité de l'enzyme citrate synthase qui contrôle la glycolyse aérobie est également diminuée. À quoi est due l'endurance exceptionnelle des Sherpas si leurs capacités aérobies et anaérobies sont inférieures?



Ces Sherpas, marchant en altitude, utilisent de faibles quantités d'oxygène plus efficacement que les alpinistes.

L'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION D'ATP

P. Hochachka et ses collègues ont montré que les cellules musculaires des Sherpas optimisaient la production d'énergie musculaire. L'optimisation peut se faire de trois manières : par augmentation de la production d'ATP par quantité de glucide ou de lipide dégradé, par optimisation de la production d'ATP par molécule d'oxygène consommée et par augmentation du travail musculaire par molécule d'ATP consommée.

La baisse de l'activité de la lactate déshydrogénase confirme le premier point : pour chaque molécule de glucose oxydée, la formation d'acide lactique est diminuée chez les Sherpas et, ainsi, la fabrication d'ATP se fait préférentiellement par la voie aérobie. Celle-ci est plus efficace car chaque molécule de glucose fournit 36 molécules d'ATP, alors que la dégradation par la voie anaérobie n'est pas complète et ne produit que trois molécules d'ATP.

Le second point vient d'être également confirmé par cette même équipe, qui a étudié le métabolisme musculaire cardiaque de Sherpas par tomographie en émission de positons. Cette étude a montré que le cœur des Sherpas utilise préférentiellement le glucose plutôt que les acides gras libres. Or, le rendement, par molécule d'oxygène, de la glycolyse aérobie est supérieur à celui de la dégradation des acides gras (la lipolyse) : par rapport aux muscles des natifs de basse altitude, les muscles des Sherpas produisent entre 25 et 60 pour cent d'ATP en plus pour chaque molécule d'oxygène consommée.

Cette modification serait un critère d'adaptation à l'altitude d'origine probablement génétique, puisque le cœur des Sherpas utilise plus de glucose non seulement en altitude, mais également plusieurs semaines après un séjour au niveau de la mer. Les Sherpas produisent donc plus d'ATP avec une moindre production d'acide lactique, bien que leurs capacités maximales aérobies et anaérobies soient diminuées. D'autres études seront nécessaires pour savoir si le rendement musculaire (augmentation du travail musculaire par molécule d'ATP consommée) est accru dans cette population.

G. SAVOUREY et J. BITTEL
Centre de recherches du Service de santé des armées, Grenoble

JEU-CONCOURS N°25

PIERRE TOUGNE

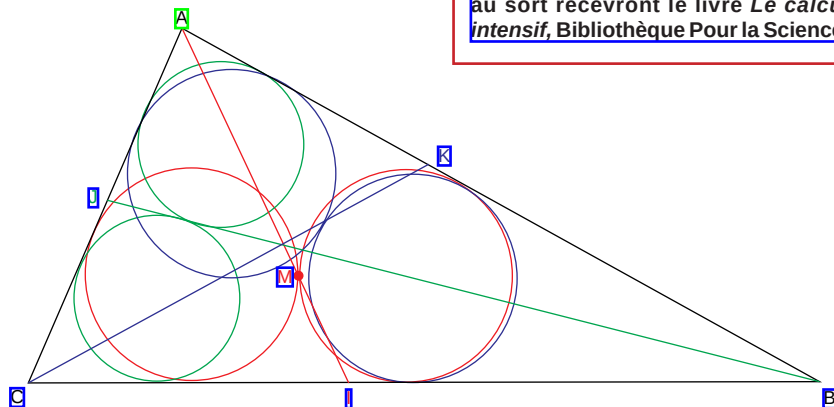
DROITES CONCURRENTES DU TRIANGLE

Jusque dans les années 1960, avant l'arrivée des mathématiques modernes, les propriétés du triangle jouaient un grand rôle dans l'enseignement des mathématiques. Peut-être exagéré, car un livre était paru sur les 273 propriétés du triangle... Pourquoi ce chiffre 273? Pour rappeler les propriétés du zéro absolu?

Nous vous proposons ce mois un problème désuet sur le triangle. Dans un triangle ABC , on trace deux cercles égaux (en rouge), le premier étant tangent aux cotés AB et BC et l'autre aux cotés

AC et BC , ces deux cercles étant, de plus, tangents entre eux, au point M . On trace AM . On effectue la même opération pour les cercles verts et bleus, et l'on trace les droites CK et BJ , passant par les points de contact des paires de cercles. Démontrez que ces trois droites sont concurrentes.

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 juillet 1996, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.



RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°23

Si a et b désignent respectivement les chiffres des dizaines et des unités d'un nombre, son carré se terminera comme le carré de $10a + b$, c'est-à-dire comme $100a^2 + 20ab + b^2$. Donc ses deux derniers chiffres seront ceux de $b(10a + b) \bmod 100$ (reste après division par 100).

On doit donc résoudre $b(200 + b) \equiv 11x \bmod 100$ avec $x = 0, 1, 4, 5, 6, 9$ (seuls chiffres terminant un carré). Il est facile de voir qu'il n'y a de solution que pour $x = 4$ et que les terminaisons possibles sont 0, 12, 38, 62 et 88. Les nombreux lecteurs qui ont résolu le problème seront peut-être fiers de savoir que s'ils l'avaient fait en 1871, leur nom serait apparu dans la monumentale histoire de la théorie des nombres d'Eugène Dickson (1919)!

Pour la deuxième question, rectifions d'abord trois «coquilles» : le dernier nombre entier de 1 à 100 par ordre alphabétique est 23 et non 0, dans la liste en chiffres romains : il faut glisser CCCIC entre CCCI et CCCII, enfin le premier nombre impair par ordre alphabétique est cent billions cent cinq. Pour trouver le premier cube par ordre alphabétique, on remarque que les candidats doivent commencer par cent billions puis cent ou cinq ou cinquante, etc. Les cubes croissants très vite, on trouve rapidement que ce nombre est $100\ 155\ 921\ 984\ 000 = (46\ 440)^3$, soit cent billions cent cinquante cinq milliards neuf cent vingt et un million neuf cent quatre vingt quatre mille (ouf!). En chiffres romains, un lecteur me fait remarquer qu'il faut aller chercher bien moins loin, soit $343 = 7^3$, c'est-à-dire CCCXLIII.

Écriture ancienne

Des inscriptions en linéaire A retrouvées en Turquie.

Toutes les langues disparues n'ont pas trouvé leur pierre de Rosette. C'est notamment le cas du linéaire A découvert par l'archéologue britannique Arthur Evans, au début du siècle, à Cnossos, en Crète. Des vestiges similaires viennent d'être mis au jour en Turquie.

Evans avait fait ressortir de terre le palais de Cnossos, en Crète, et y avait trouvé de nombreuses tablettes d'argile couvertes d'inscriptions mystérieuses, qu'il dénomma le linéaire A et le linéaire B. Pendant 20 ans, il tenta en vain, avec ses collègues, de décrypter ces tablettes. En 1952, un jeune architecte britannique, Michael Ventris, décoda le linéaire B, et conclut que ce langage était un grec archaïque. En revanche, le linéaire A, plus ancien et moins bien conservé, semblait d'une origine différente, inconnue.

Certains archéologues pensent que le linéaire A était la langue des Hittites



Des poteries minoennes ont été découvertes en Turquie. Les inscriptions (en haut) sont en linéaire A. Elles ressemblent à celles découvertes en Crète, vers 1900. Les Minoens de Crète étaient peut-être originaires de Turquie.

qui, il y a 4 000 ans, dominaient le territoire correspondant aujourd'hui à la Turquie. Selon d'autres, les symboles du linéaire A représenteraient des mots sémitiques. Enfin, le mystérieux dialecte des Minoens n'est peut-être lié à aucun des langages connus.

On ignore quasiment tout de l'origine et de l'expansion de la civilisation minoenne, si bien que les découvertes récentes de Wolf-Dietrich Niemeier, de l'Université de Heidelberg, ont particulièrement intéressé les archéologues : il a mis au jour, en Turquie, des vestiges minoens qui portent des inscriptions en linéaire A. La connexion entre les anciens habitants de la Crète et ceux du continent, à l'Est de l'île, semble établie. Les Minoens étaient-ils originaires de la Turquie, à l'Est de la Crète ?

UN EMPIRE MARITIME ?

W.-D. Niemeier a commencé à travailler sur les ruines de Milet, en 1994. Il a continué les fouilles entreprises par des équipes allemandes au cours des années 1950 et 1960. Il a installé de puissantes pompes pour évacuer l'eau qui recouvrait les vestiges ; cela lui a permis d'atteindre des couches encore plus profondes que ses prédécesseurs. Quand il découvrit un vestige portant des inscriptions en linéaire A, au cours de sa première campagne de fouille, il ne mesura pas l'importance de sa découverte. Il songea qu'il s'agissait de graffitis sans signification.

La deuxième année, deux nouvelles pièces, qui portaient des inscriptions similaires, furent extraites. Il reconnut alors qu'elles étaient en linéaire A. La pièce découverte l'année précédente s'adaptait parfaitement à ces deux nouveaux fragments. Les trois fragments portent trois inscriptions, ce qui est insuffisant pour progresser dans le décodage de cette écriture.

Des vestiges minoens ayant été trouvés sur diverses îles de la mer Égée, les archéologues s'interrogent : il y a 3 600 ans, les Minoens régnaient-ils sur un empire maritime qui s'étendaient de la Turquie à la Crète ? Les îles de la mer Égée étaient-elles des colonies minoennes ? Les Minoens se contentaient-ils d'y exporter leurs objets manufacturés ? On trouve des porcelaines chinoises dans l'Angleterre victorienne, ce qui ne signifie pas que la Chine ait dominé les îles britanniques !

D'après le type d'argile utilisée pour les poteries, les objets étaient fabriqués à Milet. Les symboles en linéaire A y étaient inscrits avant la cuisson. Le mystère du linéaire A reste entier, mais la découverte de nouveaux vestiges devrait aider les archéologues à le déchiffrer. □

Des intrus d'Amérique

Des insectes d'une famille naguère inconnue en France s'attaque aux arbres fruitiers du Midi.

La découverte d'une nouvelle espèce d'insectes n'est pas extraordinaire : chaque année, les entomologistes en décrivent, environ, une dizaine en France. Cependant l'apparition d'une nouvelle famille est un fait beaucoup plus rare, qui mérite une mention particulière. Or, depuis quelques années, trois espèces de flatides ont été reconnues sur notre territoire.

Cette famille, proche de l'ensemble pucerons, cigales, etc., est surtout présente dans les régions tropicales, et comprend des espèces assez grandes (de l'ordre du centimètre) aux couleurs souvent vives. Certaines présentent un mimétisme qui les rend difficiles à distinguer dans leur environnement : les unes se regroupant de façon à simuler une grappe florale, d'autres se plaquant sur les écorces envahies de lichens.

On n'a longtemps connu aucun flatide français. En 1965, on en récolte une

espèce. Puis William Della Giustina, de la Station INRA de Versailles, décrit une nouvelle espèce de Corse, *Phantia michelina*. Parallèlement il suit l'invasion d'une espèce américaine, *Metcalfa pruinosa*, attirant ainsi l'attention sur la famille des flatides.

Le «flatide pruineux» venu d'Amérique est largement répandu dans le Nouveau Monde, du Canada au Brésil, y compris dans certaines îles des Antilles. En Europe, il a été détecté pour la première fois en 1979, autour de Trévise, d'où il s'est d'abord dispersé dans une partie de l'Italie du Nord. Poursuivant son extension, il a atteint la Suisse et la France. Puis, il a d'abord colonisé un territoire compris entre la frontière italienne et le Petit-Rhône, puis est venu occuper la moitié occidentale du pourtour méditerranéen, jusqu'à la frontière espagnole. Le flatide pruineux remonte aujourd'hui vers le Nord.



Le flatide pruineux, venu d'Amérique, envahit le Sud de l'Europe. Suçant la sève des arbres, il produit un miellat qui bonifie le miel, mais il affaiblit les arbres fruitiers.

Cet insecte de sept à neuf millimètres de long a un corps sombre, recouvert par une pruinosité blanchâtre. Les larves, plus claires, s'entourent également d'exsudations cireuses pâles.

Sous nos climats, après l'accouplement, la femelle pond en septembre dans les infractuosités de l'écorce de divers arbres et arbustes. Après l'hivernation sous la forme d'œufs, les éclosions se succèdent du début juin à la mi-juillet, et les larves passent par cinq stades avant de devenir adultes, à partir de la mi-juillet. En septembre, le cycle recommence et les accouplements s'effectuent pendant la nuit, principalement entre minuit et le lever du jour. Aux premiers jours de novembre, les adultes disparaissent. Il n'y a qu'une génération par an.

SUCEUR DE SÈVE

Ce flatide envahisseur vit sur de nombreuses plantes : citronnier, oranger, vigne, pêcher, pommier, poirier, figuier, prunier, frêne, platane, peuplier, laurier-rose, rosier, aubépine, ronce, vigne-vierge... Comme tous les hémiptères, il est piqueur : avec son rostre, il prélève la sève des plantes et rejette un liquide sucré, le miellat, qui favorise le développement de champignons (fumagines), lesquels recouvrent les tissus végétaux d'une sorte de suie noire.

Une conséquence imprévue de cette invasion est l'attraction des abeilles pour le miellat, excrété à une époque où les fleurs sont rares dans le Sud-Est. Le miel ainsi produit a un goût agréable, qui le fait rechercher par les apiculteurs.

Cependant, l'insecte est gênant, car il affaiblit les plantes en suçant leur sève. L'échelonnement des éclosions et la présence du revêtement cireux le font échapper aux insecticides chimiques, qui doivent de surcroît épargner les abeilles, utiles pollinisatrices. Une lutte biologique serait-elle possible ? On a observé que divers prédateurs indigènes se sont adaptés à cette nouvelle proie (coccinelles, chrysopes...), mais elles ne limitent pas suffisamment les populations de flatides. Aussi les biologistes se tournent vers des prédateurs ou des parasitoïdes qui vivent dans les pays d'origine de ce *Metcalfa*. Les agronomes italiens ont ainsi importé des États-Unis l'hyménoptère *Neodryinus typhlocibae* : ces guêpes, dont les pattes antérieures sont transformées en pinces, saisissent leurs jeunes proies et les piquent en y déposant un œuf. Celui-ci donne naissance à une larve qui vivra en ectoparasite et, en fin de développement, achèvera sa victime en la dévorant.

Jacques d'AGUILAR

Marmottes infanticides

Des mâles tuent la progéniture de leur compagne.

Cronos, le Temps qui broie tout sur son passage, dévorait ses enfants. La réalité rejoint parfois le mythe : de nombreux animaux tuent ou dévorent leurs petits. Leurs raisons sont toutefois plus prosaïques que celles du père (malgré lui) des dieux. Des marmottes mâles qui intègrent un nouveau groupe tuent des petits de leur nouvelle femelle : ils s'assurent ainsi qu'elle leur donnera une descendance.

La marmotte alpine vit en groupe : un couple d'adultes reproducteurs est entouré d'individus issus de ses portées successives. Lorsque le mâle reproducteur n'est pas visible sur son territoire pendant quelques heures, qu'il en explore les limites, qu'il reste dans un terrier ou qu'il soit mort, un mâle d'un autre groupe tente parfois de le remplacer. S'il y parvient, ce nouveau mâle, potentiellement reproducteur, tue des jeunes du groupe, nés dans l'année.

Quelle est la cause de ces agressions ? Des réponses diverses ont été proposées pour d'autres espèces de Sciuridés (la famille de rongeurs à laquelle appartient la marmotte) qui pratiquent aussi l'infanticide, mais elles ne sont pas satisfaisantes

dans le cas de la marmotte. Les jeunes ne sont pas tués pour être mangés : les corps retrouvés ne portent qu'une morsure à la nuque. L'adulte ne tue pas non plus pour éviter de prodiguer des soins : le mâle reproducteur a surtout une activité de surveillance du territoire et les jeunes ne le sollicitent pas particulièrement. Enfin, ces actes ne sont pas commis par des individus pathologiquement violents : nous avons observé des infanticides commis par plusieurs mâles et seulement dans le cas où ils intègrent un nouveau groupe.

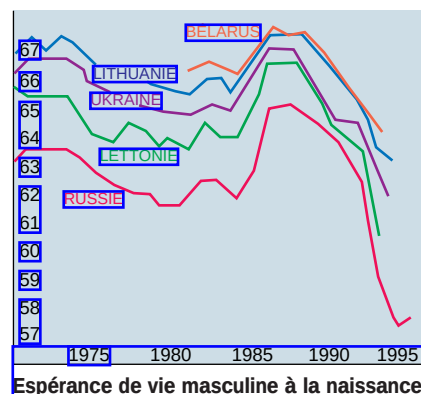
Chez certains primates et chez les lions, l'infanticide favorise la reproduction du mâle nouveau venu : la perte des jeunes accélère le retour de la femelle à la réceptivité sexuelle. Cette stratégie est inapplicable chez la marmotte alpine : le rut n'a lieu qu'une fois par an, au début du printemps, juste après l'hibernation. Le nouveau mâle ne peut donc hâter la naissance de sa progéniture. En revanche, il peut s'assurer que sa partenaire sera en état de se reproduire le moment venu.

Pendant l'hibernation, qui rassemble tout le groupe, la présence de jeunes entraîne une dépense énergétique supplémentaire pour les parents. Lors des réveils périodiques où la température corporelle des animaux redevient à peu près normale, les adultes réchauffent les plus jeunes : ces derniers économisent leurs réserves de graisse et leurs chances de survie augmentent. Si la mère dépense ainsi trop d'énergie, elle est épuisée et incapable de se reproduire à la sortie de l'hibernation. En pratiquant l'infanticide, le nouveau mâle réduit ce risque et préserve ses chances d'avoir une descendance.

Catherine PERRIN

La mortalité en Russie

Elle est en forte diminution depuis 1990.



Espérance de vie masculine à la naissance.

Le recul de l'espérance de vie, en particulier masculine, a amené de nombreuses spéculations sur la dégradation du système de santé russe, sur l'alcoolisme, sur les tensions sociales et politiques. La dégradation semble s'être interrompue en 1995, année où l'on observerait une diminution du nombre de décès (2197 mille en 1995 contre 2301 mille en 1994), ce qui correspondrait à une augmentation de l'espérance de vie, 58,1 ans pour les hommes et 72,0 pour les femmes, contre 57,6 et 71,2 en 1994.

En 1993, on était revenu à la situation qui prévalait au début des années 1980, avant que la politique de lutte contre l'alcoolisme ne diminue provisoirement la mortalité. Avant 1980, l'espérance de vie diminuait constamment et lentement, depuis le milieu des années 1960. Si cette dégradation s'était poursuivie, on serait proche de la situation actuelle. Les décès de personnes qui, en l'absence de la lutte contre l'alcoolisme, n'auraient pas survécu, expliquent-ils que la mortalité soit aujourd'hui plus importante que s'il n'y avait eu que continuation de la dégradation ? Ou bien l'augmentation observée en 1993 et 1994 reflète-t-elle une réelle dégradation des conditions de vie et des conditions sanitaires ? L'analogie des évolutions russes et de celles observées dans les autres États européens de l'ex-URSS confirme que la dégradation est un prolongement des tendances longues et le reflet des changements récents.

Extrait de l'article de Alain BLUM dans *Population et Sociétés* Juin 1996. INED



Cette jeune marmotte a été tuée d'une morsure à la nuque. Son agresseur, un mâle qui a remplacé le reproducteur du groupe, améliore les conditions d'hibernation de la femelle en éliminant les plus jeunes individus : il s'assure ainsi qu'elle pourra se reproduire au printemps suivant.

Les vraies dents du filtreur

Un ptérosaure utilisait un dispositif à fanons pour retenir les animalcules dont ils se nourrissaient.

Apparentés à la fois aux crocodiles et aux dinosaures, les ptérosaures, ou reptiles volants, furent les premiers vertébrés supérieurs à acquérir la maîtrise du vol aérien. L'un d'entre eux, *Pterodaustro*, avait une mandibule portant de très nombreux fanons, avec lesquels il filtrait les animalcules aquatiques. On croyait que ces fanons étaient des expansions cornées, mais des études histologiques, au microscope électronique à balayage, ont montré que ces fanons étaient des dents allongées.

Pterodaustro fait partie de ce groupe animal qui apparut il y a 220 millions d'années et qui prospéra, avec des tailles et des morphologies variées, pour disparaître avec les dinosaures, il y a 65 millions d'années. *Pterodaustro*, étymologiquement l'« aile du Sud », fut découvert en 1970 dans des terrains datés de 140 millions d'années, en Amérique du Sud. C'était un animal de taille moyenne, d'une envergure de 1,50 mètre environ. Il se nourrissait en filtrant l'eau à l'aide d'un bec fortement courbé vers le haut et portant, sur

toute sa longueur, une extraordinaire quantité de longs « fanons », fines baguettes juxtaposées, très serrées : 25 par centimètre en moyenne, soit plus de 1 000 sur toute la mandibule.

Extrêmement fines, ces baguettes, plus de 100 fois plus hautes que larges, semblaient être des formations cornées plutôt que des dents. De surcroît, chez les vertébrés supérieurs filtreurs (certains reptiles, oiseaux et mammifères), les dents assurent rarement la fonction de filtration. Aujourd'hui, seul le phoque crabier *Lobodon carcinophagus* filtre, dans une certaine mesure, les petits crustacés dont il se nourrit grâce à de vraies dents, mais celles-ci sont larges et découpées. Le plus souvent, la filtration est réalisée par des structures de remplacement cornées, en grand nombre, qui ont l'avantage d'atteindre des tailles considérables tout en conservant une souplesse (les fanons des cétacés mysticètes, les lamelles du bec de certains oiseaux limicoles). La disparition des dents et la présence d'un bec corné étant connues chez certains ptérosaures, on avait imaginé que *Pterodaustro* était muni de fanons cornés flexibles.

Grâce à une étude histologique sur un nouveau spécimen argentin, L. M. Chiappe, du Muséum d'histoire naturelle de New York, et A. Chinsamy, au Cap, ont prouvé que la mandibule de *Pterodaustro* portait de vraies dents : l'observation au microscope de coupes fines a mis en évidence une structure typiquement dentaire, avec une mince couche d'émail entourant la dentine, elle-même creusée d'une cavité pulpaire. La dentine est percée de nombreux canaux qui s'organisent radialement autour de la cavité pulpaire.

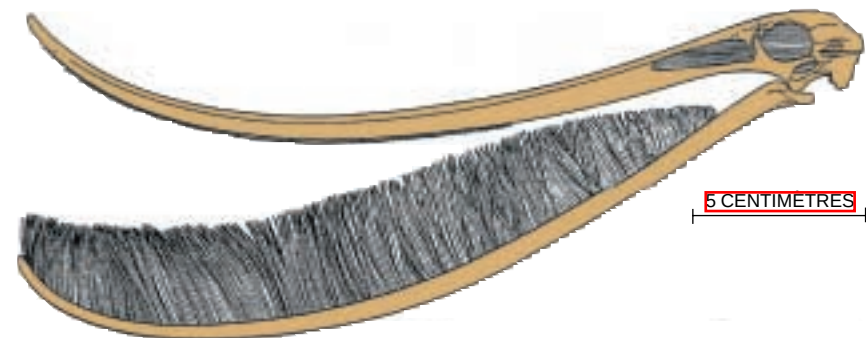
Certains poissons filtreurs, tel le requin pèlerin, possèdent également des dents modifiées, très allongées, mais aucun vertébré supérieur n'a des dents aussi fines que *Pterodaustro*, qui détient également le record du nombre des dents. La dentition de *Pterodaustro* est d'autant plus originale et étonnante que les quelque 500 dents portées par la mâchoire supérieure sont nettement différentes des dents inférieures, de forme spatulée, plus classique et de petite taille.

Cette découverte amènera à réinterpréter le fonctionnement de cet appareil filtreur pour expliquer comment ces dents, qui mesurent moins de deux dixièmes de millimètre à la base pour une hauteur de plusieurs centimètres, résistaient aux contraintes mécaniques et assuraient leur fonction de filtre.

Sylvain DUFFAUD, Laboratoire de paléontologie des vertébrés et de paléontologie humaine, Université Paris VI



Fossile de *Pterodaustro* complet. Le quatrième doigt des ptérosaures, allongé, servait à soutenir la membrane alaire.



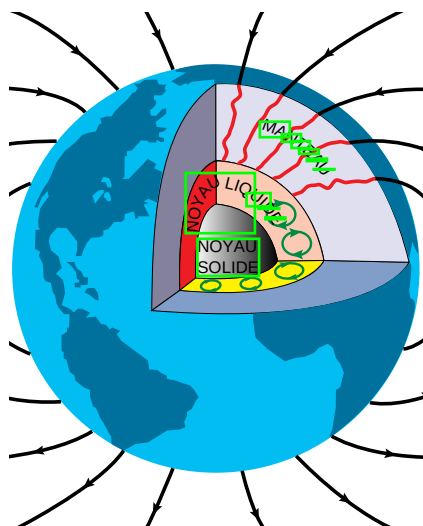
Reconstitution classique, mais désormais caduque, du crâne de *Pterodaustro*, avec ses fanons souples.

«Voir» le noyau

Le manteau terrestre est très transparent au champ magnétique produit dans le noyau.

Le champ magnétique mesuré à la surface de la Terre reflète-t-il le champ créé dans le noyau ? Grâce à l'étude des enregistrements magnétiques obtenus depuis une cinquantaine d'années, nous avons montré que le manteau terrestre est un bon isolant électrique : il est donc très «transparent» aux signaux magnétiques, ce qui confirme le fait que nous sommes en mesure de voir «en direct» ce qu'il se passe à la surface du noyau.

Parce que, jusqu'à aujourd'hui, aucun forage n'a dépassé 15 kilomètres de profondeur, nous n'avons accès qu'à des informations indirectes sur la Terre profonde, fournies par la sismologie, la géodésie ou la géochimie. L'exploitation combinée de ces informations indique qu'à la suite de sa formation la Terre s'est différenciée en un manteau de silicate et un noyau de fer et de nickel liquide. Le refroidissement de cet alliage fait lentement croître une graine solide et engendre des mouvements de convection dans le liquide. Ces mouvements d'un liquide conducteur électrique à travers le champ magnétique



Le champ magnétique de la Terre est engendré à l'intérieur du noyau liquide par les mouvements du fer. L'altération de certains signaux magnétiques par le manteau terrestre permet de mesurer sa conductivité électrique.

terrestre induit un courant électrique qui permet d'entretenir ce champ magnétique, extraordinaire témoin de la dynamique terrestre.

Avant de parvenir à la surface de la Terre, le champ magnétique est altéré par la traversée du manteau, faiblement conducteur. En régime variable, le champ magnétique et le champ électrique sont couplés : une variation du champ magnétique dans le manteau fait donc apparaître un champ électrique. Dans le manteau conducteur, ce champ électrique induit un courant électrique qui crée à son tour un champ magnétique, qui s'ajoute au champ initial. Pour apprécier l'importance de cette altération du champ magnétique, il est essentiel d'estimer la conductivité électrique du manteau.

On mesure, en laboratoire, la conductivité électrique du silicate du manteau à très hautes pression et température (plusieurs dizaines de milliers d'atmosphères, 400 °C). Le comportement semi-conducteur des silicates permet alors d'extrapoler les mesures aux conditions du manteau profond (100 000 atmosphères, 2 000 à 3 000 °C). C'est ainsi qu'une autre équipe de notre Institut avait déjà estimé une conductivité électrique d'environ 10 siemens par mètre pour le manteau profond, 10 000 fois inférieure à celle du fer.

Avec des collègues de l'Université de Rennes, nous avons maintenant estimé cette conductivité en étudiant directement la façon dont le manteau déforme un signal magnétique qui provient du noyau. Nous avons exploité le fait que le champ principal présente à intervalles irréguliers de brusques changements de tendance, les «secousses magnétiques». Reprenant 50 années d'observations magnétiques, nous avons caractérisé la secousse magnétique qui se produisit en 1970 : celle-ci peut être décrite presque parfaitement au moyen de ce que les mathématiciens nomment une singularité (l'apparition d'un pic ou d'une marche dans un signal sont des exemples de singularités, la secousse magnétique étant d'une nature un peu différente). Comme la conductivité du manteau ne pouvait qu'atténuer ces signaux et non les engendrer, la secousse a été créée dans le noyau. Nous avons alors mesuré le champ parasite résultant qui correspond à l'écart, par rapport à une singularité parfaite, de la secousse magnétique observée. Cela nous a permis d'estimer une conductivité moyenne pour le manteau inférieur (15 siemens par mètre), en remarquable accord avec la valeur obtenue en laboratoire.

M. ALEXANDRESCU et G. HULOT, Institut de Physique du Globe de Paris

Poumon et fluor

Des liquides fluorés pour soigner les poumons.

Les sociétés pharmaceutiques Alliance Pharmaceutical et Hoechst Marion Roussel s'allient pour mettre au point un nouveau traitement des syndromes de détresse respiratoire. Pourquoi cet intérêt ? L'histoire commence en 1966, quand Leland Clark plonge un rat dans un fluorocarbure liquide (dont les molécules sont composées d'atomes de carbone, d'hydrogène et de fluor), saturé d'oxygène : l'animal survit, parce qu'il trouve dans le liquide assez d'oxygène pour respirer : l'acte de respirer, c'est-à-dire de gonfler les poumons, ne sert qu'à y faire entrer de l'air, enrichi en oxygène, puis à faire sortir de l'air chargé de dioxyde de carbone. Les absorptions d'oxygène et les rejets de dioxyde de carbone, au contact des alvéoles pulmonaires, sont des diffusions de molécules sans relation avec l'acte mécanique de la respiration. Or le fluorocarbure utilisé était inerte, bon solvant des gaz respiratoires, et il s'étalait bien sur les alvéoles pulmonaires, ce qui facilitait les échanges des gaz dissous en grande quantité.

Pendant que diverses équipes cherchaient à utiliser les composés fluorés afin d'obtenir du «sang artificiel», quelques équipes cherchaient à utiliser des fluorocarbures pour véhiculer des médicaments jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Comme de nombreux médicaments ne sont pas solubles dans les fluorocarbures, Jean Riess, Marie-Pierre Krafft et Véronique Sadtler, à Nice, ont cherché des émulsions inverses, où l'eau est dispersée dans le fluorocarbure sous la forme de gouttelettes séparées par des molécules tensioactives, avec une extrémité soluble dans l'eau et une extrémité soluble dans le fluorocarbure.

De telles émulsions inverses stables ont été obtenues en mars 1996, grâce à des molécules tensioactives composées d'une longue chaîne constituée seulement d'atomes de carbone et de fluor, liée à une partie rendue très soluble dans l'eau par l'association d'atomes d'oxygène, d'azote et de phosphore. Diverses substances actives (antibiotiques, bronchodilatateurs, corticostéroïdes, agents mucolytiques ou anticancéreux) y ont déjà été incorporées. Les émulsions inverses formées sont aujourd'hui évaluées chez l'animal. □

Sacs gonflables

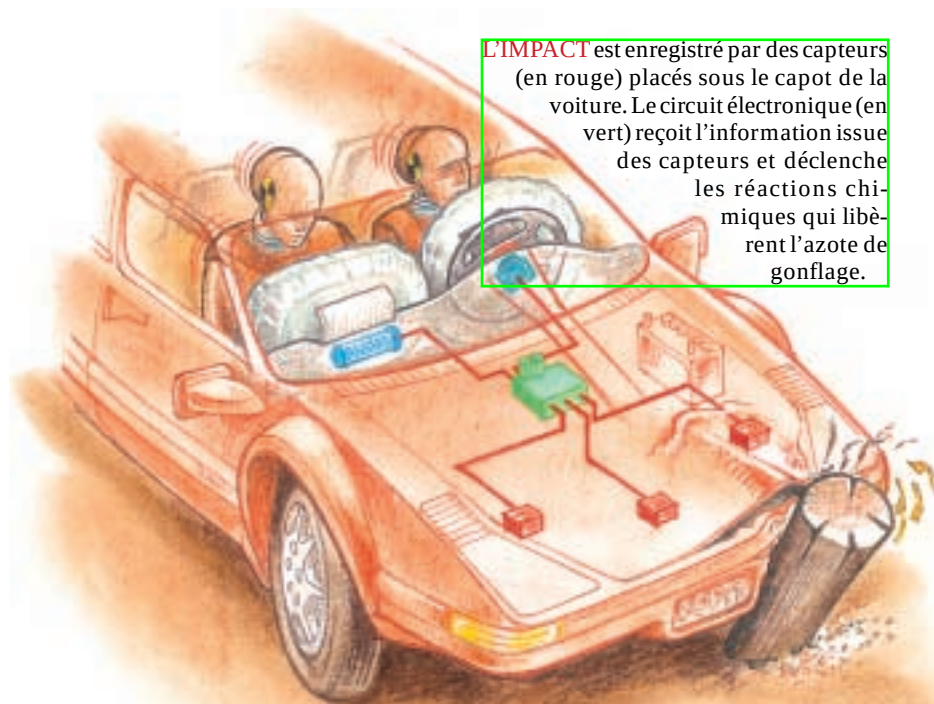
ROBERT RESH

L'idée de protéger les automobilistes des chocs par un coussin gonflable date de la Seconde guerre mondiale. Un premier brevet américain porte sur un «dispositif gonflable pour les atterrissages brutaux».

Les sacs gonflables (*air-bags*) des automobiles incorporent de multiples composants mis au point pendant les vingt dernières années. Toutefois les premiers dispositifs étaient peu fiables et coûteux. La principale difficulté portait sur le stockage et la libération du gaz comprimé. Y avait-il assez de place pour une capsule de gaz comprimé? Pouvait-on maintenir le gaz sous pression pendant toute la durée de vie de la voiture? Comment faire pour qu'il se dilate très vite? Comment assurer une grande fiabilité à toutes températures? Et surtout comment éviter que le bruit de la détonation n'assourdisse les passagers?

La solution est apparue dans les années 1970 : les dispositifs de gonflage à propulseurs solides. Une réaction chimique libère de l'azote chaud dans le sac. Ces dispositifs ont été commercialisés dans les années 1980 sur les voitures de sport américaines.

Aux États-Unis, on évalue à 600 le nombre de vies préservées grâce à ces sacs gonflables, et ce nombre augmentera à mesure qu'un plus grand nombre d'automobiles seront équipées. Les ingénieurs poursuivent les recherches sur des appareils réutilisables, plus petits et assurant une meilleure protection.



L'IMPACT est enregistré par des capteurs (en rouge) placés sous le capot de la voiture. Le circuit électronique (en vert) reçoit l'information issue des capteurs et déclenche les réactions chimiques qui libèrent l'azote de gonflage.

LES CAPTEURS utilisent soit un interrupteur mécanique qui se ferme quand le déplacement d'une masse établit un contact ou un interrupteur électronique déclenché par un petit accéléromètre disposé sur une puce.

MÉCANIQUE



ELECTRONIQUE



25 MILLISECONDES



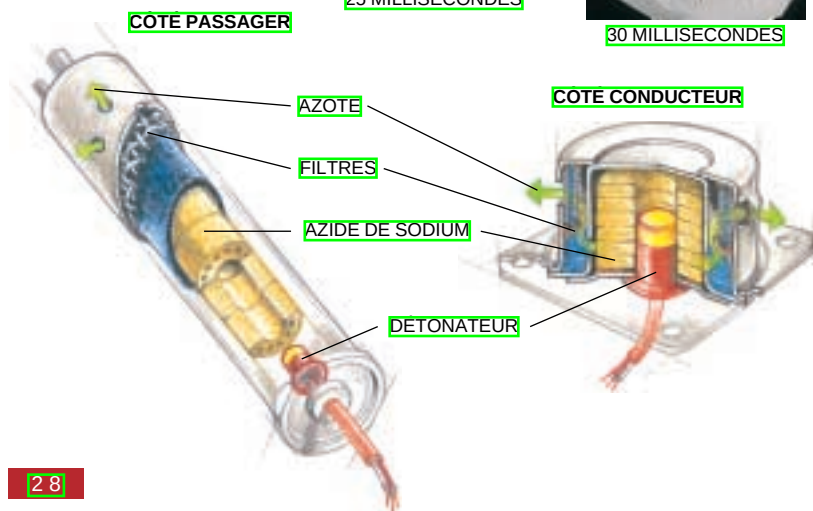
30 MILLISECONDES



40 MILLISECONDES



55 MILLISECONDES



LES GONFLEURS sont constitués d'un détonateur qui enflamme des grains d'azide de sodium et d'oxydant. Ces éléments brûlent dans la boîte métallique produisant une bouffée d'azote chaud. Les particules d'oxyde de sodium sont arrêtées par un filtre. Les dispositifs sont cylindriques du côté passager et en forme de disque du côté conducteur pour tenir au centre du volant.



L'alliance

du sport et de la science est pourtant fructueuse pour les deux partenaires. Les pages suivantes en donnent un aperçu : les sportifs bénéficient des progrès scientifiques, et la science apprend beaucoup en observant les sportifs, de tous niveaux. Les diverses activités sportives offrent un champ d'expérimentation original pour de nombreuses disciplines scientifiques et sont un terrain privilégié d'interdisciplinarité.

LE SPORT ET LA SCIENCE SONT-ILS COMPATIBLES?

Aveuglés par la futilité du sport, les chercheurs des sciences «sérieuses» ont peur de se fourvoyer, par une médiatisation qui les cantonnerait dans un domaine non reconnu par leurs confrères. Ils ont l'impression que les recherches sur le sport, dirigées uniquement vers les applications, interdiraient toute avancée des connaissances fondamentales. Du côté des sportifs, entraîneurs et pratiquants, la recherche, parce que mal connue, est souvent perçue comme une perte de temps. Dans bien des cas, le scientifique apparaît comme un concurrent avec lequel on doit partager le pouvoir. Un certain obscurantisme fait même conclure parfois que la science serait préjudiciable à l'entraînement et aux résultats en compétition.

La science étudie surtout des phénomènes reproductibles, créés ou simplement observés. Pour comparer des événements, afin d'en déduire les mécanismes ou de vérifier des hypothèses, les chercheurs mesurent ou règlent le plus précisément possible les paramètres importants. Les sports, grâce aux règles qui les codifient, simplifient et normalisent des activités humaines, qu'elles permettent ainsi d'étudier. Une série de courses de 100 mètres constitue une série d'expériences comparables entre elles : le départ est toujours donné de la même façon, la piste a toujours la même forme, la vitesse du vent est mesurée et la distance parcourue est toujours la même. Les recherches sur la coordination des mouvements, la physiologie de l'effort, l'activité musculaire ou l'élasticité des sols y trouvent de précieuses données.

SPORT ET SCIENCE : UNE ALLIANCE

En outre, la pratique du sport crée des situations extrêmes, physiques, psychologiques ou sociales, plus difficilement accessibles dans d'autres conditions. Des individus soumettent leur corps à des exercices intenses qui les transforment ; on peut créer, afin d'en comprendre les mécanismes, des situations de stress ou de coopération dans des équipes ; la fiabilité de matériaux nouveaux est éprouvée par les fortes contraintes de la compétition.

Comment, en retour, la science profite-t-elle aux sportifs ? Les scientifiques qui comprennent mieux la mécanique du corps humain au cours d'un saut à la perche, l'acquisition des gestes de l'expert en escalade, les mécanismes de l'imagerie mentale ou l'aérodynamisme des coureurs cyclistes autorisent de meilleures pratiques sportives. La recherche fait progresser le sport en améliorant la compréhension de ce qu'il est, et en accroissant le plaisir et le confort de tous les sportifs amateurs, qu'ils essaient de battre leur record personnel au marathon, qu'ils jouent au rugby tous les dimanches entre amis ou qu'ils nagent occasionnellement pendant l'été. La progression des records n'est qu'une conséquence, somme toute mineure.

ROGER BAMBUCK, président du Groupe de recherches sur le sport du CNRS, ancien ministre.

CONTRE NATURE?



Le mythe olympique

Le sport moderne est né à Rome.

La flamme olympique qui brillera à Atlanta du 19 juillet au 4 août prochains a été indûment allumée à Olympie : si le Comité international olympique était fidèle à l'histoire, cette flamme viendrait de Rome. Contrairement à la légende créée par Pierre de Coubertin, fondateur des Jeux olympiques modernes, les précédents antiques au sport contemporain sont en effet plus romains que grecs. C'est seulement à Rome que l'on trouve la conception du sport-spectacle et le rôle parfois démesuré de l'argent dans les compétitions. C'est aussi à Rome que l'on constate l'existence d'organisations structurées semblables à nos grands clubs de football, les factions, qui se distinguaient par leurs couleurs : les Bleus, les Verts, les Blancs et les Rouges. On y criait déjà «Allez les Verts!» (ou plutôt «*prasinii felicitari*») des siècles avant que les supporters du club de football de Saint-

Etienne ne reprennent la formule. Les nombreuses sources littéraires, iconographiques et épigraphiques nous informent en détail de ces pratiques.

Les jeux du cirque (*ludi circenses*) ne sont pas les combats de gladiateurs (*munera*) ni les chrétiens jetés aux lions : ce sont, pour l'essentiel, des compétitions hippiques et athlétiques. Elles se disputent dans un édifice approprié, le cirque. Le plus connu est le Grand Cirque de Rome, Circus Maximus, situé dans une vallée, entre les collines du Palatin et de l'Aventin, où auraient été enlevées les Sabines, sous le règne du fondateur, Romulus. Au début de notre ère, sous le règne d'Auguste, le Grand Cirque, de 620 mètres de long et 180 mètres de large, pouvait accueillir 150 000 spectateurs au moins : c'était, jusqu'à l'époque contemporaine, le plus grand édifice de spectacle du monde (la France n'a toujours pas de stade de

100 000 places). Le stade d'Olympie, en revanche, n'a jamais été équipé de gradins pour les spectateurs : on mesure, sur ce critère, la différence de mentalité entre les deux sociétés antiques.

Etant donné la taille de ces monuments et les dépenses nécessaires à leur construction, quelques cirques seulement ont été construits en Gaule romaine, dans les plus grandes villes. À Lyon, on connaît une très belle mosaïque illustrant les jeux du cirque ; à Vienne, la «Pyramide», toujours en place, ornait le mur-barrière situé dans l'axe de l'arène, autour duquel tournaient chars et chevaux. Le cirque d'Arles, édifié au II^e siècle de notre ère sur les bords du Rhône, a été en partie dégagé lors de fouilles récentes. Il est long de 450 mètres, et ses gradins sont entièrement construits sur pilotis de chêne et de pin.



L'un des pugilistes saigne abondamment au cours de ce violent combat de boxe. L'arbitre tient une baguette qui lui sert à séparer les combattants. Cette scène figure sur le pavement du IV^e siècle d'un petit établissement thermal situé près de Gafsa, en Tunisie.

Les pieux de chêne, plus résistants, sont disposés aux endroits qui supportaient les plus lourdes charges.

LES CLUBS S'ARRACHENT LES VEDETTES

Les courses de chars sont la compétition reine. La plus prisée est la course de quadriges : les chars sont tirés par quatre chevaux, deux attelés sous le joug à un timon et les deux autres reliés à la caisse du char par une simple courroie. Ce sont des courses de galop : le film *Ben Hur* retrace avec une certaine justesse cette épreuve endiablée, qui se déroulait sur sept tours (environ cinq kilomètres). Le cocher, debout sur son char, a les guides nouées autour de la taille : cette technique, qui laisse les mains libres, est dangereuse en cas de chute. Elle a été empruntée aux Étrusques dès le VII^e siècle avant notre ère, comme bien d'autres aspects des jeux romains.

Les meilleurs cochers étaient des vedettes : souvent esclaves au début de leur carrière, ils gagnaient ensuite des sommes fabuleuses et se faisaient parfois transférer d'une faction à l'autre, contre compensation. Des inscriptions sur pierre relatent leurs exploits avec un luxe de détails.

Des documents iconographiques, fresques ou mosaïques, soulignent que, de l'époque des rois étrusques jusqu'à l'Antiquité tardive, les Romains ont aussi



Le vainqueur d'épreuves athlétiques (nu, au centre) est récompensé par une palme et, vraisemblablement, par une couronne dont le coiffent les deux personnages qui l'entourent. Cette scène provient de la même mosaïque que celle de la page précédente.

apprécié des spectacles de jeux athlétiques. Les sports de combat, surtout le terrible pugilat, qui se pratiquait parfois avec des «gants» (les cestés) munis de pointes, étaient parmi les spectacles favoris des Romains. La mosaïque en noir et blanc qui couvrait le sol du vestiaire des thermes de Porta Marina, à Ostie, au début du II^e siècle de notre ère, montre divers athlètes professionnels (boxeurs, lutteurs, discobole, sauteur en lon-

gueur...), et même un ballon que l'on pourrait croire fabriqué pour la récente Coupe d'Europe de football. Le somptueux «tapis» du début du IV^e siècle, découvert récemment près de Gafsa, en Tunisie, est décoré de nombreux athlètes, répartis sur quatre registres : coureurs à pied, sauteur en longueur, discobole, lutteurs, boxeurs et pancratiastes (à la fois boxeurs et lutteurs). Des prix, qui ne sont pas seulement honorifiques, comme l'indique la présence de sacs d'argent, attendent les vainqueurs.

A Rome, le sport n'est pas réservé aux professionnels : de nombreux citoyens romains se livraient à divers exercices physiques tels que le jeu de balle ou même le cerceau. Le Champ de Mars, vaste plaine située au Nord-Ouest du Capitole, devait ressembler à notre Bois de Boulogne un dimanche matin. Les thermes disposaient aussi d'installations adéquates pour les sportifs, qui pouvaient ensuite se délasser et se baigner.

Dans le domaine sportif, le «gréco-centrisme» est un écueil. L'influence étrusque a, par exemple, été plus grande sur Rome que l'influence grecque : les fresques funéraires étrusques, telles celles de la tombe des Olympiades, mises au jour à Tarquinia dans ces dernières décennies, en sont la preuve éclatante. L'histoire du sport a d'ailleurs commencé il y a près de 5 000 ans, à Sumer et en Égypte, bien avant les Jeux olympiques.

Jean-Paul THUILLIER
École normale supérieure, Paris



Sur la mosaïque des thermes de Porta Marina, au milieu d'athlètes qui s'entraînent, un «ballon» à une allure contemporaine (au centre).

Jean-Paul THUILLIER, *Le sport dans la Rome antique*, éditions Errance, 1996.

Le saut à la perche

Pour évaluer les performances, les mécaniciens filment les perchistes.

Au saut à la perche, après une course d'élan, on plante une perche dans un butoir. L'appui sur la perche flexible transforme alors le mouvement horizontal du perchiste en un mouvement vertical. Pourquoi le perchiste ukrainien Sergueï Bubka est-il le seul perchiste au monde à franchir 6,10 mètres ? Cet exploit aurait été inimaginable sans la flexibilité des perches en fibre de verre. Afin d'améliorer encore

les perches de saut et pour comprendre quels sont les facteurs de la performance, nous mesurons, à l'aide de dynamomètres, les forces exercées sur la perche, et analysons le mouvement des perchistes avec des caméras. Ainsi, nous avons corrélé la position du sauteur et les forces exercées lors des différentes phases du saut.

Pour l'analyse des forces, on recourt à deux dynamomètres. Le premier, placé

sous le butoir, mesure l'évolution des efforts (selon trois axes de coordonnées perpendiculaires) développés par le système formé par la perche et le perchiste sur le butoir au cours du saut. Le second, incorporé dans la piste d'élan, détermine la force exercée par le perchiste sur la piste lors du dernier appui avant le décollage.

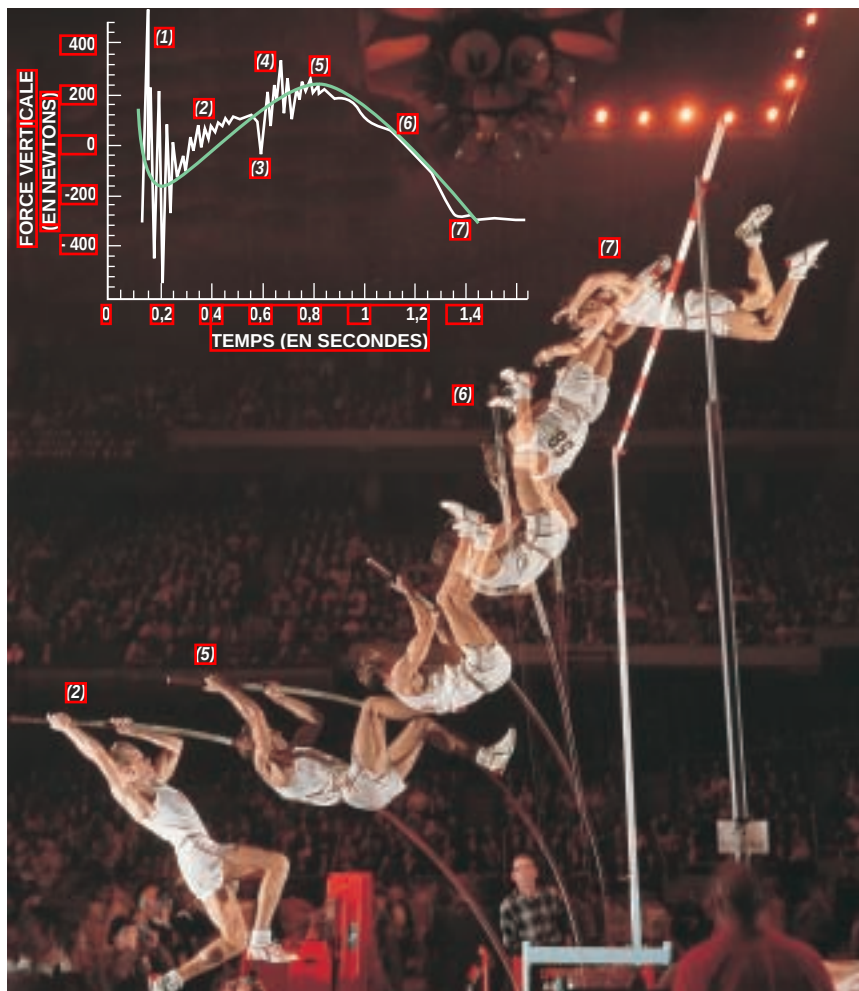
L'analyse de la position est assurée par quatre caméras qui enregistrent les trajectoires tridimensionnelles de chaque articulation du perchiste et de certains points de la perche. En utilisant ces trajectoires, nous avons reconstitué, au cours du saut, le déplacement, la vitesse et l'accélération du centre de gravité du sauteur, ainsi que celui du système perche-perchiste selon trois axes. En outre, l'analyse vidéo a permis de calculer le moment cinétique du sauteur (qui traduit la rotation du corps) et son énergie cinétique.

LES FORCES ET L'ENREGISTREMENT VIDÉO

La cinématique est plus riche que la dynamique : la relation fondamentale de la dynamique indique que la somme des forces exercées sur un système est égale à sa masse multipliée par son accélération. L'analyse des images vidéo permet de trouver, par deux dérivations temporelles successives de la trajectoire, l'accélération du système formé par la perche et le perchiste, d'où l'on déduit la force appliquée dans le butoir. En revanche, si, par deux intégrations temporelles successives de cette force, on calcule la trajectoire du centre de masse perche-perchiste, on ne peut connaître les positions relatives des différentes parties du corps. Comme la fréquence d'acquisition des dynamomètres (3 000 hertz) est supérieure à celle des caméras (50 hertz), les deux approches sont nécessaires. De surcroît, la dynamique fournit des résultats en temps réel, tandis que l'analyse de la cinématique requiert plusieurs heures de dépouillements et de calculs.

Pour la première fois, nous avons montré que la force calculée par les simulations numériques à partir de l'analyse des images vidéo était semblable à celle mesurée avec le dynamomètre (voir la figure). Ce résultat, qui montre la fiabilité des modélisations fondées sur l'analyse de la dynamique, est la première étape d'une simulation, laquelle, en intégrant l'ensemble des paramètres mécaniques mesurés ou calculés, permettra un entraînement assisté par ordinateur.

J. MORLIER, M. CID, A. GÉRARD
CNRS, URA 867, GDR Sport
Université de Bordeaux 1



La composante verticale de la force appliquée dans le butoir (courbe blanche) permet de caractériser les différentes phases du saut. Le perchiste plante sa perche (1), puis la perche s'infléchit et le perchiste groupe ses membres (2). La perche glisse dans le butoir (3) et se bloque au fond du butoir (4). La perche est à son maximum de flexion (5), le perchiste se redresse, se renverse (6) et lâche finalement la perche (7). Cette force est comparée à celle calculée à partir des images vidéo (courbe verte).

Le mouvement d'escalade

Celui du grimpeur entraîné, harmonieux et fluide, correspond à une économie de fréquences.

Chez l'enfant, la marche est une succession de pas gérés de façon indépendante. À mesure que la coordination musculaire et articulaire s'affine et que le cerveau établit les réseaux nécessaires à la locomotion, la marche devient plus fluide ; chaque pas fait alors partie d'un ensemble, le déséquilibre déclenché par un pas servant à engendrer le suivant. Peut-on quantifier les mécanismes de l'apprentissage de la locomotion ? Les lois de la physique sont-elles applicables à cet apprentissage ? Nous avons, dans cette optique, modélisé le mouvement d'escalade et suivi son évolution au cours de l'apprentissage : à mesure que l'expertise s'améliore, le mouvement devient harmonieux... et harmonique. Tel celui d'un oscillateur harmonique, le mouvement d'un grimpeur expert est assimilable à un mouvement de balancier ; les fréquences de tous ses mouvements sont des multiples d'une fréquence fondamentale.

On classe les chemins d'escalade en fonction de leur difficulté, sur une échelle qui s'étend de un à neuf, chaque échelon étant lui-même subdivisé en trois sous-niveaux. Les grimpeurs experts franchissent des chemins dont la difficulté est supérieure à sept. Les autres sont qualifiés de non-experts.

Nous avons étudié le mouvement de grimpeurs experts et non experts. Pour ce faire, nous avons construit, à l'École nationale de ski et d'alpinisme de Chamonix, une voie d'escalade sur une structure artificielle d'escalade de dix mètres de hauteur et de difficulté moyenne. Nous repérons le grimpeur par une marque fluorescente collée à la hauteur du bassin et nous le filmons. La trajectoire du grimpeur, assimilée à celle du repère fluorescent, est enregistrée et analysée. On demande à chaque sujet de grimper dix fois de suite la même voie d'escalade, afin d'obtenir une série de mesures qui traduisent

l'adaptation plus ou moins rapide du grimpeur aux contraintes exercées par la pesanteur et par l'environnement.

L'analyse de la trajectoire des grimpeurs expérimentés montre que, au début, la gestuelle est limitée, mais que dès la deuxième tentative, le répertoire augmente et la motricité est optimisée. Selon notre modèle, les deux premières trajectoires du grimpeur expert ne sont pas harmoniques, mais les suivantes le deviennent. On peut assimiler le grimpeur expert à un oscillateur. En outre, le comportement moteur harmonique minimise l'énergie mécanique dépensée, même pour les pas de grande amplitude. Au contraire, les sujets non experts gèrent leur progression pas à pas, comme un enfant qui commence à marcher. À mesure qu'ils apprennent à connaître la paroi, leur mouvement devient plus fluide et, à la dixième tentative, leur mouvement se rapproche de celui d'un expert.



Un grimpeur expert franchit les parois difficiles avec un mouvement régulier de balancier, qui minimise l'énergie mécanique dépensée.

Ce modèle harmonique est adapté à l'interprétation des comportements moteurs rythmés. L'adaptation aux contraintes environnementales, que nous qualifions d'apprentissage, représente l'optimisation d'un comportement moteur complexe. Lorsqu'une contrainte nouvelle est appliquée au système, le comportement moteur est perturbé et la trajectoire du grimpeur s'éloigne de l'harmonie. Puis, au cours des répétitions, le comportement moteur s'en rapproche à nouveau. Cette convergence est plus rapide chez le sujet expert (trois essais suffisent) que chez le sujet non expert (plus de dix essais sont nécessaires).

Enfin, nous avons mis en évidence que les deux dynamiques (celle de l'expert et celle du non-expert) sont de natures différentes, que l'on ne passe pas de l'une à l'autre par un optimisation progressive, mais par un mécanisme discret (par paliers).

LA QUALITÉ HARMONIQUE DU MOUVEMENT

Notre analyse met l'accent sur la qualité harmonieuse de la prestation et non sur le résultat d'une performance où la force musculaire peut pallier les manques de plasticité et d'adaptabilité du comportement moteur. Nous avons constaté qu'en compétition, certains grimpeurs compensent une absence d'harmonie de leur comportement moteur par une force musculaire qui leur permet d'atteindre le but. Une telle dépense d'énergie n'est pas compatible avec un effort de longue durée en milieu naturel, de sorte que les grimpeurs de compétition, qui n'ont pas un mouvement harmonique, manquent d'endurance.

Nous allons poursuivre cette étude en recherchant si l'habileté motrice, qui aboutit à une expertise, s'accompagne nécessairement de l'apparition d'un mouvement de type harmonique, notamment si l'apprentissage de la marche en terrain accidenté suit les mêmes lois que l'apprentissage de l'escalade. Ce type d'étude devrait aussi faciliter la rééducation des personnes accidentées qui ont subi des lésions osseuses ou neurologiques : en analysant comment ces personnes réapprennent à marcher, nous pensons les aider à retrouver un mouvement harmonique.

Gilles DIETRICH, INSEP, Paris
Patrick CORDIER, ENSA, Chamonix

Imaginer la performance

On suit en temps réel la qualité de l'entraînement par imagerie mentale.

Quel athlète n'a jamais rêvé à sa prochaine compétition? Qu'ils mettent en scène la victoire ou l'échec, ces rêves n'ont pas de conséquences mesurables. Le rêve éveillé est, en revanche, utile au sportif de haut niveau : l'entraînement par imagerie mentale, au cours duquel l'athlète retrouve, sans effectuer aucun mouvement, toutes les sensations visuelles, tactiles et motrices associées à l'action elle-même, améliore les performances. Au cours de cet «entraînement interne», le comportement du système neurovégétatif (qui régule les fonctions organiques viscérales et somatiques telles que la respiration ou la rythmicité cardiaque) est caractéristique, comme en situation réelle, de la qualité de la performance. Un entraîneur qui suit les manifestations du système nerveux autonome d'un sportif peut donc l'aider à améliorer ses images mentales.

Dans la plupart des disciplines sportives, l'entraînement par imagerie mentale améliore les performances. L'efficacité de cette pratique varie toutefois selon les individus, le type de tâche et le niveau d'apprentissage. Tandis que les deux derniers paramètres sont facilement identifiables et que leur rôle est connu, la compréhension de la variabilité interindividuelle nécessite l'accès aux images mentales créées par chacun.

Constituant fondamental du psychisme pour les Grecs, l'image mentale ne fut analysée, jusqu'au XX^e siècle, que par introspection psychologique. Michel Denis, de l'Université d'Orsay, a rattaché l'activité d'imagerie à l'étude plus générale de la représentation cognitive et aux activités sémantiques.

L'image mentale est plus difficile à aborder en neurophysiologie : comment en mesurer les caractéristiques? Les travaux des équipes de Roger She-

SPORTIF EN PLEINE IMAGERIE MENTALE

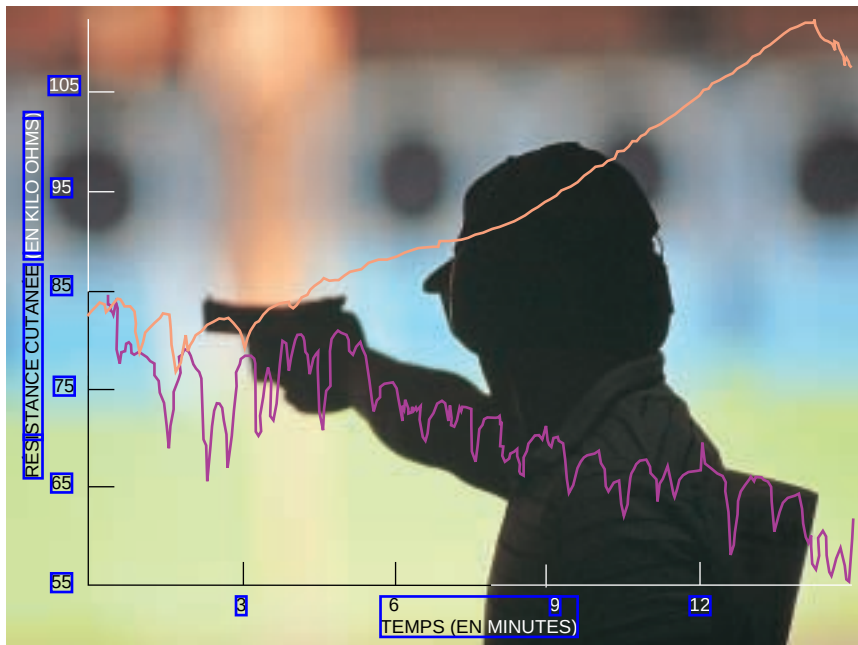


pard, à Stanford, et de Stephen Kosslyn, à Harvard, ont montré que les images sont, sous certains aspects, analogues aux objets qu'elles représentent. Par exemple, en imagerie mentale, le temps nécessaire pour vérifier une caractéristique d'un dessin connu dépend de la distance réelle entre le point fixé mentalement par le sujet et la caractéristique à examiner. Ainsi, quand on laisse un sujet mémoriser le dessin d'une tour et qu'on lui demande ensuite, les yeux fermés, de fixer mentalement la base de cette tour, il indiquera plus rapidement la couleur de la porte que celle du drapeau qui flotte au sommet. De la même façon, la comparaison des tailles de deux objets est d'autant plus rapide qu'elles sont différentes.

La construction d'une image mentale emprunte un canal sensoriel : elle fait appel aux souvenirs de sensations visuelles, tactiles, motrices, olfactives. Son apparition active les régions qui jouent un rôle dans la programmation des réponses motrices correspondantes et déclenchent l'activation du système neurovégétatif.

ENREGISTRER LES IMAGES MENTALES

Les techniques actuelles de mesure de l'activité du cerveau, suivi électrique des ondes cérébrales ou caméra à positions, sont impossibles à mettre en œuvre chez un sportif en mouvement. Les manifestations du système neurovégétatif sont en revanche plus accessibles. Nous avons mis au point des capteurs miniaturisés qui, posés sur la peau, enregistrent six paramètres : potentiel, résistance, irrigation sanguine et température cutanées, et fréquences instantanées cardiaque et respiratoire. Avec Karoline Delemer, Corinne Deshaumes-Molinaro, René Roure et Christian Collet, nous avons ainsi suivi, en temps réel et sans perturber le déroulement



La résistance cutanée d'un tireur au pistolet, pendant un exercice d'imagerie mentale, varie comme en situation réelle. On observe les mêmes profils caractéristiques dans les deux situations lorsque le tir est réussi (en orange) ou raté (en violet). Selon les individus, de telles similitudes, qui reflètent une activité identique du système neurovégétatif, sont observables sur différents autres paramètres : irrigation sanguine, température ou potentiel cutané, fréquences cardiaque ou respiratoire.

de l'action, la traduction neurovégétative des processus affectifs qui accompagnent le traitement cognitif du signal lors d'actions réelles et d'exercices d'imagerie mentale.

L'étude de différentes activités sportives démontre que la réponse des six paramètres du système neurovégétatif dépend de la réussite ou de l'échec du geste réalisé. La réponse du système nerveux autonome à une situation dépend de l'individu observé, de son activité et de l'organe sur lequel on effectue des mesures : chaque paramètre est plus ou moins révélateur de la réussite du geste et ce, pour chaque individu.

Comment le système neurovégétatif réagit-il lors d'un exercice d'imagerie mentale, alors qu'aucun mouvement ne se produit ? Au cours de l'épreuve de tir du pentathlon moderne, la durée du blocage respiratoire précédant le tir est du même ordre de grandeur en situation réelle et pendant l'imagerie mentale. Les athlètes les plus performants renforcent avec l'entraînement la similitude des manifestations du système nerveux autonome entre la situation réelle et l'imagerie mentale.

Ces conséquences de l'action sur le système neurovégétatif ont d'abord été découvertes pour une épreuve de tir, où le sportif doit s'isoler de son environnement. Elles viennent d'être retrouvées pour la réception du service au volley-ball, qui exige au contraire une attention soutenue à des informations extérieures. L'analyse des six paramètres du système neurovégétatif pendant toute la tâche et pendant la pratique de l'imagerie mentale correspondante permet de suivre les différentes phases de la répétition mentale.

En outre, une note a été attribuée à l'exercice d'imagerie mentale, en prenant en compte quatre critères : l'existence de réponse du système neurovégétatif, l'évolution de la vigilance au cours de la tâche, l'activité spontanée (qui indique l'anxiété situationnelle) et la concentration (appréciée par le blocage cardiorespiratoire). L'excellente corrélation de cette note avec l'amélioration de la performance démontre qu'elle caractérise effectivement la qualité de l'imagerie mentale dans diverses situations. Les sportifs disposent désormais d'un outil de suivi objectif de cet exercice, qui permettra d'améliorer le déroulement des entraînements, pour le plus grand bénéfice des performances.

Evelyn VERNET-MAURY
et André DITTMAR,
Université Lyon 1,
CNRS, UMR 5611, INSA



L'entraînement des athlètes olympiques

Les sciences du sport permettent aux athlètes de haut niveau d'améliorer leurs performances en développant leurs qualités physiologiques et mentales.



Il y a 25 siècles, Milon de Crotone avait décidé de devenir l'homme le plus fort du monde : pour s'entraîner, il faisait quotidiennement le tour d'une étable en portant un veau à bout de bras, au-dessus de la tête. Sa force augmenta avec le poids du veau, jusqu'à ce qu'il souleva une vache adulte.

Milon de Crotone, qui remporta cinq fois l'épreuve de lutte à Olympie, avait compris l'un des principes fondamentaux de la science du sport contemporaine : l'entraînement progressif, par une sollicitation des muscles à l'aide de charges croissantes, est le lot des 10 000 athlètes de 197 pays qui se rendront à Atlanta pour le centenaire des Jeux olympiques modernes.

La science du sport peut-elle aider les athlètes à mieux s'entraîner ? Depuis 50 ans, la connaissance du métabolisme humain permet d'adapter progressivement leur physiologie à la nature des performances qu'ils doivent accomplir. La force et l'endurance ne sont pas également nécessaires dans toutes les disciplines. La conduite des entraînements est ajustée pour que les compétiteurs soient au sommet de leur forme le jour des compétitions importantes.

Les spécialistes de biomécanique utilisent des ordinateurs, des caméras vidéo et des capteurs de force pour analyser les mouvements et optimiser leur coordination et leur précision. La psychologie s'allie à la physiologie pour entraîner les athlètes, car des muscles puissants ou qui résistent à la fatigue ne suffisent pas pour remporter une médaille d'or : la concentration et la motivation, tout aussi indispensables, sont

améliorées par l'entraînement mental. Ainsi les champions vont-ils toujours « plus vite, plus haut, plus fort », comme le souhaitait Pierre de Coubertin.

La majorité des sports sollicitent intensément les muscles : lors de chaque mouvement, ceux-ci se contractent et consomment de l'énergie. Celle-ci provient de la dissociation de l'adénosine triphosphate (ATP), molécule formée d'une base (l'adénine), d'un sucre (le ribose) et de trois groupes phosphate. Notre capacité de stockage musculaire de l'ATP est restreinte : quand l'effort est maximal, l'ATP disponible dans les muscles est consommée en quelques secondes seulement. Pour maintenir l'activité, le corps synthétise l'ATP de trois façons étroitement liées. La voie métabolique qu'il privilégie, à chaque instant, dépend de la puissance musculaire requise et de la durée de l'activité.

Métabolisme aérobie et anaérobie

La voie de production d'ATP qui est mise en œuvre le plus rapidement utilise la phosphocréatine, autre molécule énergétique à groupe phosphate. L'énergie libérée par la dégradation de phosphocréatine sert à la synthèse d'ATP. Cette voie ne fonctionne que pendant dix secondes au maximum, lors d'un sprint par exemple. Ensuite, le corps produit l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP par deux autres voies, la glycolyse anaérobie et la glycolyse aérobie.

La glycolyse anaérobie intervient en premier. Les cellules produisent de l'énergie en dégradant du glucose ou du

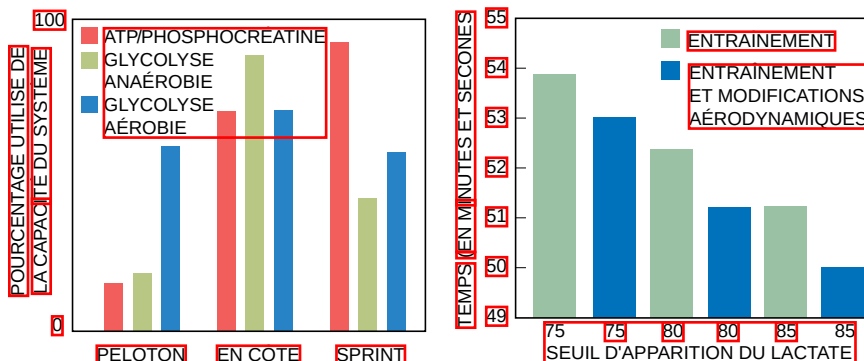
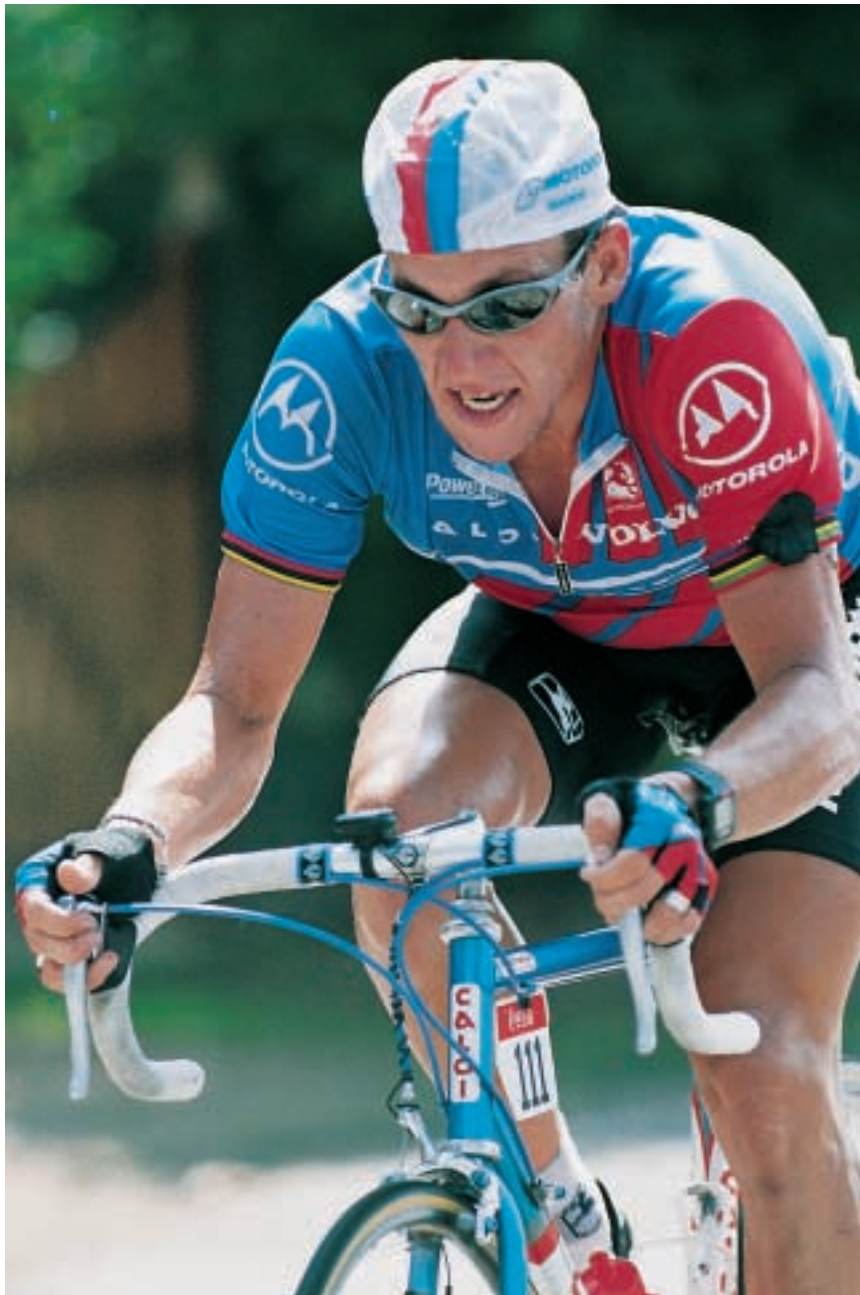
glycogène, contenus dans les muscles. Malheureusement, cette réaction produit du lactate, qui s'accumule dans les muscles et s'y transforme en acide lactique. Après quelques minutes d'effort intense, l'acide lactique provoque des sensations de brûlures musculaires.

L'entraînement habitue les muscles des athlètes à supporter de fortes concentrations en acide lactique. Toutefois l'acide lactique et le lactate finissent toujours par inhiber la contraction musculaire. Le corps ne peut donc faire appel à la glycolyse anaérobie que pour des efforts assez brefs.

Pour les épreuves d'endurance, le corps obtient de l'énergie par le métabolisme aérobie, qui est une dégradation des sucres, des graisses et des protéines en présence d'oxygène. À l'inverse du métabolisme anaérobie, la glycolyse aérobie n'est pas activée instantanément. Ce n'est qu'après une ou deux minutes d'effort intense que le rythme cardiorespiratoire assure un apport d'oxygène suffisant à la cellule musculaire. Pendant ce délai, les muscles fonctionnent grâce à l'ATP stockée ou produite par dégradation de phosphocréatine et par glycolyse anaérobie. Avec l'activation de la voie aérobie, les autres voies métaboliques fonctionnent à un niveau inférieur : de l'acide lactique et du lactate sont toujours produits, mais

1. LA COURSE DE DEMI-FOND, que pratique Marie-José Pérec, victorieuse sur 400 mètres aux Jeux olympiques de 1992, requiert puissance et vitesse. Les muscles tirent leur énergie du métabolisme anaérobie et du métabolisme aérobie, qui doivent tous deux être performants.





2. LE MÉTABOLISME DU CYCLISME varie au cours d'une épreuve sur route (à gauche). Les performances de Lance Armstrong (en haut), champion du monde sur route en 1993, ont été analysées au centre d'entraînement américain de Colorado Springs. On lui a recommandé de modifier sa position en selle, afin d'améliorer son aérodynamisme, et de s'entraîner de façon à retarder l'accumulation de l'acide lactique dans ses muscles. En suivant ces deux conseils, il a gagné près de quatre minutes sur un parcours de 40 kilomètres (en vert, les gains dus à l'entraînement seul ; en bleu, les gains dus à l'entraînement et à l'amélioration de l'aérodynamisme).

ils sont consommés par des muscles moins actifs ou métabolisés dans le foie, ce qui évite leur accumulation.

En dépit de son efficacité, le métabolisme aérobie produit de l'énergie en quantité limitée. Des besoins temporaires supplémentaires des muscles doivent être satisfaits par les autres voies de synthèse de l'ATP. Un joueur de football, au milieu d'une mi-temps de 45 minutes, tire essentiellement son énergie du métabolisme aérobie. Quand il sprinte, son corps utilise immédiatement en complément l'ATP stockée ou l'ATP produite par la voie de la phosphocréatine. Quand ce sprint se prolonge plus de 15 secondes, la glycolyse anaérobie prend le relais. Puis, ce sprint terminé, le métabolisme aérobie redevient prépondérant, tandis que les capacités des autres voies métaboliques sont régénérées.

Les entraîneurs doivent connaître les besoins énergétiques de leurs sports afin d'ajuster l'intensité ou la durée de l'entraînement de telle façon que le fonctionnement aérobie et anaérobie des athlètes soit optimal. Progressivement, l'entraînement produit des modifications physiologiques adaptées aux besoins d'un sport donné. Ainsi l'entraînement d'un coureur de fond développe-t-il les capacités d'endurance qui reposent sur le métabolisme aérobie, tandis que celui d'un haltérophile se concentre sur la force et la puissance alimentées par la voie anaérobie.

De faibles gains, mais précieux

L'entraîneur d'un athlète de haut niveau doit gérer des investissements qui semblent de moins en moins rentables : en début de carrière, 50 à 100 heures d'entraînement engendrent une amélioration de 10 à 15 pour cent des performances mais, après quelques années, 1 000 heures d'efforts intenses font parfois gagner à peine un pour cent. En revanche, le gain marginal obtenu par les entraînements d'athlètes bien entraînés rapporte gros : l'écart entre la médaille d'or et la médaille d'argent du 100 mètres messieurs n'était, aux Jeux olympiques de 1992, que de six centièmes de seconde, soit 0,6 pour cent du temps de course.

Aux Jeux olympiques d'Atlanta, l'épreuve de plus longue durée sera la course cycliste individuelle messieurs sur route, qui durera près de cinq heures. Cette épreuve de 228 kilomètres



3. TIM McRAE, de l'équipe américaine d'haltérophilie, exécute un épaulé-jeté de 130 kilogrammes. Deux caméras rapides le filment afin d'analyser son mouvement. En combinant les prises de vues des deux caméras, on obtient une image en trois dimensions (en bas).

rassemblera des concurrents dont l'entraînement sera optimisé pour un effort aérobie soutenu. Le coureur américain Lance Armstrong y remportera-t-il une médaille? Champion du monde sur route en 1993, il a gagné une étape du Tour de France en 1995, et la Flèche wallonne en 1996.

Les aptitudes de L. Armstrong se sont révélées dès son jeune âge. À 15 ans, sa capacité aérobie exceptionnelle le plaçait parmi les meilleurs athlètes mondiaux. La capacité aérobie, révélatrice des capacités cardiorespiratoires, est évaluée par la consommation maximale d'oxygène, nommée $VO_2\text{max}$ (l'oxygène est ensuite fourni aux cellules musculaires pour synthétiser l'ATP). La $VO_2\text{max}$ de L. Armstrong était de 80 millilitres d'oxygène par kilogramme de poids corporel et par minute. À 24 ans, il conserve cette $VO_2\text{max}$, qui est presque le double de la moyenne observée chez les hommes en bonne santé.

Dans le cadre de sa préparation pour les Jeux olympiques, L. Armstrong a fait plusieurs séjours au plus grand centre d'entraînement du Comité olympique américain, à Colorado Springs. Durant l'un de ses séjours, il s'est soumis à une évaluation du métabolisme sur cyclo-ergomètre, appareil qui contrôle avec précision l'effort physique (l'intensité et la vitesse de pédalage de l'athlète). Sa $VO_2\text{max}$, son rythme cardiaque et la concentration en acide lactique dans ses muscles ont été mesurés. Sa $VO_2\text{max}$ était la plus élevée de toutes celles mesurées chez les cyclistes américains. Sa puissance maximale était de 525 watts.

Les physiologistes ont aussi mesuré la vitesse d'accumulation du lactate dans ses muscles. Le seuil d'apparition de lactate est exprimé en pourcentage de la $VO_2\text{max}$ et correspond à la valeur à partir de laquelle l'accumulation du



lactate s'accélère. Chez L. Armstrong, ce seuil d'apparition de lactate était à 75 pour cent de sa $VO_2\text{max}$, soit dix pour cent de moins que la moyenne des meilleurs cyclistes américains. Aussi les entraîneurs lui ont-ils recommandé de s'entraîner plus souvent à un niveau d'effort égal ou légèrement supérieur à ce seuil, ce qui modifie les fonctions circulatoire, nerveuse et enzymatique, et repousse ainsi le seuil d'apparition de lactate. Son seuil d'apparition de lactate est passé de 75 à 79 pour cent. L. Armstrong, qui parcourt maintenant, en entraînement ou en course, jusqu'à 40 000 kilomètres par an, contre environ 1 600 kilomètres

à 15 ans, a enregistré de meilleurs résultats lors de ses dernières courses.

Un exercice explosif

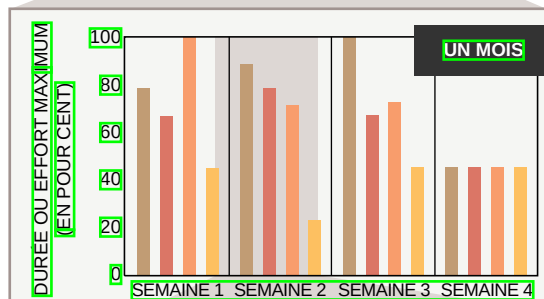
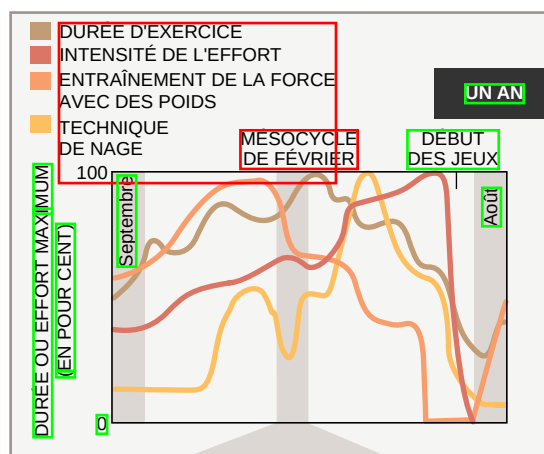
La physiologie d'un haltérophile est à l'opposé de celle d'un cycliste. L'haltérophilie est l'épreuve la plus brève des Jeux olympiques, et fait appel quasi exclusivement à la force et à la puissance musculaire. Soulever 120 à 250 kilogrammes requiert une puissance de 3 000 watts pendant une seconde. L'haltérophile puise l'énergie dans l'ATP stockée dans les muscles et dans la dégradation de la phosphocréatine. Pendant la longue période de récupération qui sépare, à l'entraînement, chaque série de cinq levers, ces réserves d'énergie se reconstituent par voie aérobie.

Tim McRae, qui souleve plus de deux fois son propre poids, a été cinq fois champion des États-Unis ; il détient les records nationaux dans trois catégories de poids pour l'arraché et l'épaulé-jeté. Dans l'arraché, l'athlète tient la barre avec les deux mains écar-

tées de deux à trois largeurs d'épaules. Il la tire d'abord jusqu'à la hauteur de la poitrine, puis s'accroupit en dessous en l'élevant au-dessus de sa tête, bras tendus ; enfin il se remet debout en maintenant la barre à bout de bras. L'épaulé-jeté se réalise avec les mains moins écartées : l'athlète amène la barre au niveau de sa poitrine et fléchit les jambes pour la stabiliser sur ses épaules avant de se relever. Après une pause, il étend complètement les bras et une puissante poussée verticale des jambes l'aide à soulever la barre.

La morphologie de T. McRae (des jambes courtes, un long torse et une belle musculature) est bien adaptée à l'haltérophilie. Sa petite taille (1,60 mètre) lui permet de soulever la barre moins haut que ses concurrents. Son aptitude physique la plus remarquable est peut-être sa détente : il saute à près d'un mètre de haut sans élan, ce qui donne une idée de la puissance des jambes que requiert l'haltérophilie.

Toutefois T. McRae ne gagnera probablement pas de médaille à Atlanta,



	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI	DIMANCHE
MATIN	ENDURANCE (AÉROBIE)	ENDURANCE (AÉROBIE)		EFFORTS AU SEUIL DE LACTATE	ENDURANCE (AÉROBIE)	EFFORTS AU SEUIL DE LACTATE	EXERCICES INDIVIDUALISÉS
MIDI	FORCE : LEVERS DE POIDS	EFFORTS INTENSES (ANAÉROBIE)	FORCE : LEVERS DE POIDS		ENDURANCE (AÉROBIE)		UNE SEMAINE
APRES-MIDI			COURSE DE FOND	FORCE : LEVERS DE POIDS	COURSE DE DEMI-FOND		
	15 séries de 15 coups d'aviron à 100 pour cent		sur 8 kilomètres		15 courses de 400 mètres		
	Quatre exercices de 25 minutes chacun, à un rythme cardiaque de 148 à 160 pulsations par minute		Entre trois à cinq séries de dix levers différents, répétés cinq à dix fois à 90 pour cent de l'effort maximum		Quatre exercices de dix minutes chacun, à un rythme cardiaque de 190 pulsations par minute		



4. L'EQUIPE AMERICAINE D'AVIRON, dont les sœurs McCagg (ci-dessus) sont membres, s'entraîne en suivant un programme décomposé en années, trimestres, mois, semaines et jours. La durée de l'intensité et le type d'effort sont soigneusement diversifiés, jusqu'au moment du relâchement de l'entraînement, juste avant le début des Jeux olympiques.



car les athlètes des anciens pays du bloc soviétique sont meilleurs et mieux entraînés. Les haltérophiles américains ont toutefois adopté depuis peu quelques méthodes d'entraînement de leurs concurrents : depuis cinq ans, Dragomir Cioroslan, un entraîneur d'origine roumaine qui a gagné une médaille de bronze aux Jeux olympiques de 1984, a mis en place un programme annuel très structuré, semblable à celui qu'il pratiquait en Roumanie.

Cet entraînement est organisé en périodes, qui vont des séances quotidiennes à des cycles annuels. Les capacités athlétiques et les aptitudes physiologiques sont ainsi développées de façon structurées. Les haltérophiles préparent trois ou quatre compétitions importantes dans l'année. Chacune est précédée d'un macrocycle de deux à quatre mois, lui-même décomposé en plusieurs mésocycles plus courts.

Un macrocycle débute par un mésocycle préparatoire de huit à dix semaines. Chaque semaine, les athlètes effectuent 600 efforts à 80 ou 90 pour cent de leur performance maximale. Ces séances d'entraînement, avec des efforts répétés mais d'intensité moyenne, modifient les muscles, le tissu conjonctif, les ligaments et les autres tissus mous. Ainsi ces athlètes parviennent à lever des poids plus lourds au cours du cycle d'entraînement suivant.

L'objectif du second mésocycle, qui dure quatre à cinq semaines, est le développement de la force et de la puissance ; les haltérophiles doivent effectuer moins de leviers (200 à 300 par semaine), mais avec des poids plus

lourds, entre 90 et 100 pour cent de la capacité des athlètes. Le dernier mésocycle comprend deux phases qui conduisent à la compétition. Pendant la première, l'athlète travaille à une intensité maximale, afin de s'assurer que la force et la puissance acquises au cours des périodes d'entraînement précédentes se traduisent en gain de performances. La dernière semaine de ce mésocycle est une phase de récupération : la réduction du nombre et de l'intensité des exercices permet à l'athlète de récupérer des efforts de l'entraînement, sans perdre les bénéfices de sa préparation intensive.

Coordonner les mouvements

Les haltérophiles, comme d'autres sportifs, s'efforcent d'améliorer la précision de leurs gestes. L'haltérophilie est l'un des sports les plus exigeants, de ce point de vue : elle requiert une excellente coordination des mouvements. Quand les différents groupes de muscles, des extenseurs du genou et de la hanche aux muscles des épaules et des bras, ne sont pas synchronisés, l'haltérophile ne soulève pas la barre assez haut ou se balance dangereusement d'avant en arrière.

Sarah Smith, biomécanicienne au centre d'entraînement de Colorado Springs, a étudié chez T. McRae la régularité de la trajectoire en forme de S que la barre doit suivre du sol jusqu'à l'extension complète, à l'aide de deux caméras et de deux plates-formes de force qui enregistrent les forces exer-

5. TAMMY FORSTER se prépare pour l'épreuve de carabine à 50 mètres des Jeux olympiques.

cées par chaque pied. Si la charge des deux pieds diffère, l'haltérophile peut perdre la symétrie entre les deux mains : il soulève l'un des côtés de la barre plus vite que l'autre. Les asymétries lors du lever gênent la stabilisation de la barre au moment de l'arraché : cette observation a conduit à des perfectionnements techniques.

T. McRae soulève-t-il plus du double de son propre poids grâce à sa pratique précoce du sport ou grâce à ses gènes ? Selon le physiologiste Per-Olof Åstrand, pour devenir un athlète olympique, il faut bien choisir ses parents. À l'Université de Laval, au Canada, Claude Bouchard a étudié à quel point l'hérédité intervient dans les capacités des athlètes de haut niveau. Dans les années 1980, il a mené une étude sur des vrais et des faux jumeaux qui n'avaient pas d'activité sportive régulière. Certains couples de jumeaux ont doublé leur consommation maximale d'oxygène après 15 à 20 semaines d'entraînement physique, tandis que d'autres ont peu amélioré leur condition physique. Aujourd'hui C. Bouchard cherche des marqueurs génétiques qui distingueraient les individus que l'entraînement fait beaucoup progresser.

Aucun programme d'entraînement de haut niveau n'a encore sélectionné des concurrents ayant des «gènes athlétiques», mais on approche de ce type de sélection. De nombreux pays, telle l'ex-République démocratique allemande, identifiaient leurs sportifs de

haut niveau en recherchant, chez des jeunes, des caractéristiques physiques contrôlées génétiquement. Les Australiens ont montré que ces pratiques sont applicables même dans un pays qui ne contrôle pas strictement la vie de ses citoyens : la Fédération australienne d'aviron a mis au point un profil d'athlètes féminines potentiellement capables de devenir des championnes. Des critères tels que la taille, la teneur en graisses corporelles, la longueur des membres et l'endurance cardio-vasculaire ont été pris en compte, sans que les rameuses qui ne présentaient pas ces caractéristiques soient systématiquement exclues. Ce programme a produit des athlètes de niveau international en deux ans.

Si un programme de ce type existait aux États-Unis, il aurait sélectionné deux vraies jumelles, Mary et Betsy McCagg, qui sont parfaitement adaptées à leur sport. Toutes deux mesurent 1,88 mètre et pèsent 79 kilogrammes. Leur pourcentage de graisses corporelles est inférieur à la moyenne des hommes de leur âge (la majeure partie de leur poids correspond à du muscle), et leurs longues jambes facilitent l'exécution d'un coup d'aviron long et puissant.

La carrière sportive des sœurs McCagg illustre aussi que les gènes ne serviraient à rien sans un environnement favorable à la pratique du sport. Leur père, leur grand-père et de nombreux autres membres de leur famille ont pratiqué l'aviron pendant leurs études supérieures. Elles-mêmes se sont entraînées et ont disputé des compétitions à haut niveau pendant toute leur scolarité.

Elles participent aux compétitions dans les équipes de huit ou de deux où chaque membre d'équipage manœuvre un seul aviron, à deux mains. Les 2 000 mètres qu'elles parcourent en six ou sept minutes requièrent une grande puissance musculaire, une bonne capacité aérobie et une aptitude à exploiter la glycolyse anaérobie pour augmenter la puissance musculaire en fin de course.

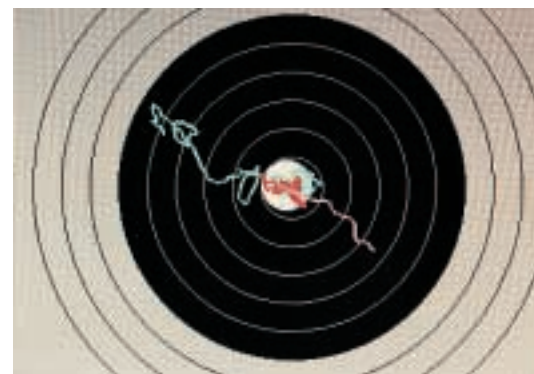
Les sœurs McCagg et les autres membres de l'équipe américaine d'aviron sont venus au centre d'entraînement de Colorado Springs, en 1991, pour une évaluation physiologique et biomécanique, afin de déterminer la cause des difficultés rencontrées au cours des 500 derniers mètres de course. Leurs entraîneurs pensaient que leurs capacités anaérobies étaient insuffisantes pour augmenter la puissance dans le sprint final. En réalité, les membres de l'équipe avaient atteint un niveau de performance anaérobie équivalent à celui des meilleurs rameurs mondiaux, mais leurs capacités aérobies étaient trop faibles : les rameuses accumulaient trop de lactate dans leurs muscles au cours des 1 500 premiers mètres de course.

Hartmut Buschbacher, ancien entraîneur de l'équipe féminine d'aviron d'Allemagne de l'Est, arriva aux États-Unis avec de nouvelles idées pour résoudre ce problème. Il mit rapidement en place un programme d'entraînement par cycles, pour un groupe de 15 rameuses soigneusement sélectionnées : des exercices d'endurance alternent avec des exercices de musculation et de puissance, afin de corriger le déficit en glycolyse aérobie. Cette stratégie a payé : le huit féminin américain a gagné le championnat du monde en 1995.

Un moral d'acier

Pour gagner aux Jeux olympiques, les athlètes doivent être en parfaite condition physique, mais ils doivent aussi se concentrer et se motiver pour réussir des performances. La psychologie du sport est née il y a presque un siècle, lorsque l'on a découvert que, dans certains sports, les performances des athlètes étaient meilleures lorsqu'ils s'affrontaient que lors des épreuves contre la montre. Dans les années 1970, Georges Rioux, de l'INSEP, et Raymond Chappuis ont introduit la psychologie du sport en France en étudiant les relations entre les joueurs dans les sports d'équipe. Les entraîneurs ont, à cette époque, commencé à appliquer tout un ensemble de techniques cognitives et comportementales, et de nouvelles recherches ont montré que l'entraînement mental améliore à lui seul les performances motrices.

Le tir est l'une des disciplines olympiques qui requiert la plus grande concentration : la force physique y est de moindre importance. Quand elle n'était âgée que de quatre ans, la tireuse Tammy Forster s'est jurée d'aller aux Jeux olympiques afin d'égaliser la gymnaste soviétique Olga Korbut, qui remporta deux médailles d'or aux Jeux de Munich. Le tir est le sport qui s'est imposé à elle parce que, dans l'arrière-cour du domicile familial, son père s'entraînait pour des compétitions de carabine ; chaque membre de la famille apprit à utiliser et à entretenir une arme. Comme l'entourage familial des sœurs McCagg, l'entourage familial de Tammy Forster était favorable : lorsque son engagement dans la haute compétition se



6. UN LASER fixé sur sa carabine permet de suivre au cours du temps la visée de Tammy Forster (ci-dessus). Elle a ainsi constaté que les ajustements successifs qu'elle réalisait étaient préjudiciables à sa précision.



7. DES CHAUSSURES SPECIALES assurent au tireur une bonne stabilité pour le tir en position debout.

confirma, son père suivit des cours sur la manière d'entraîner les tireurs à la carabine et devint l'un de ses entraîneurs.

À 15 ans, T. Forster s'entraînait 90 minutes par jour avec une carabine à air comprimé ou avec une 22 long rifle non chargée. Elle est un exemple qui montre qu'un entraînement intensif peut, dans certains sports, compenser un manque de dons naturels. En 1985, elle a gagné une médaille d'argent au championnat national junior et elle s'est inscrite à l'Université de Virginie-Occidentale afin de s'entraîner avec Ed Etzel, médaillé d'or aux Jeux olympiques de 1984.

En 1991, T. Forster s'est installée au centre d'entraînement de Colorado Springs. Son séjour lui a permis de consacrer tout son temps à l'entraînement pour les épreuves de carabine à 10 mètres et de carabine libre, qui consiste à tirer avec une carabine de calibre 22, sur des cibles à 50 mètres, en position couchée, à genoux et debout. Elle a particulièrement travaillé les techniques mentales de concentration, nécessaires pour exceller dans cette discipline.

T. Forster associe des exercices de relaxation musculaire, de visualisation mentale de tirs et la relation dans un journal de ses résultats et de ses émotions. Elle se fixe aussi une série d'objectifs réalistes à atteindre au cours de chaque entraînement. Les exercices de relaxation augmentent la concentration des tireurs et leur font prendre conscience de l'origine des tensions musculaires, dans les épaules et dans le dos, qui réduisent la précision de leur tir. Au cours de l'entraînement par imagerie mentale, T. Forster s'imagine en train de viser et de tirer, ou en spectatrice, en train de suivre le déroulement de l'épreuve sur la ligne de touche. Plus l'image est active, plus les performances sont augmentées par les exercices.

En compétition, T. Forster pratique l'imagerie mentale avant chaque tir. Mentalement, elle exécute lentement chaque étape, de son positionnement sur la ligne de tir jusqu'à la mise en joue. En raison de cet état de concentration et de calme qu'il faut atteindre avant chaque coup, la préparation et l'ensemble des tirs occupent les deux heures et demie autorisées pour l'épreuve de carabine libre. Le vainqueur, qui est jugé sur la précision et non sur la vitesse, atteint le centre de la cible dans plus de 90 pour cent des tirs.

T. Forster a aussi travaillé avec un psychologue du sport afin de modérer le perfectionnisme qui lui a parfois valu de perdre confiance dans sa précision. Pour évaluer sa technique, elle a utilisé une carabine équipée d'un laser à infrarouge. Une analyse de la position du faisceau sur la cible a révélé que sa visée est quasi parfaite, mais qu'elle l'ajuste sans cesse : au bout de cinq ou six secondes, elle a plus de difficultés à rester fixée sur la cible.

Elle a mis au point des routines de visualisation associées à des verbalisations qui évacuent ses craintes : par exemple, elle répète les mots «se détendre» et «prête». Son opiniâtreté a payé : durant son séjour à Colorado Springs, T. Forster a gagné deux coupes du monde et, l'année dernière, elle a finit seconde au championnat national.

Le tir n'est pas le seul sport où la tête doit venir épauler les muscles. Aujourd'hui tous les athlètes profitent des avancées de la physiologie, de la biomécanique et de la psychologie du sport. Ces sciences contribuent à faire tomber les records mondiaux. Nul ne sait jusqu'où elles permettront de repousser les limites des performances humaines.

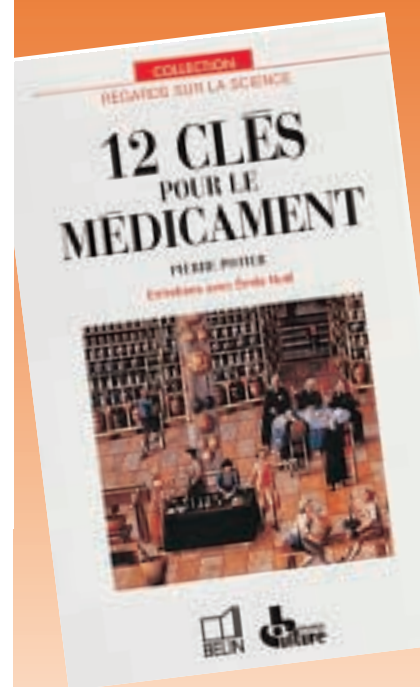
Jay KEARNEY est physiologiste du sport auprès du Comité olympique des États-Unis.

Iudor BOMPA, *Theory and Methodology of Trainings : The Key to Athletic Performance*, Kendall / Hunt Publishing, 1994.

Edgar THILL, Raymond THOMAS et José CAJA, *Manuel de l'éducation sportive*, éditions Vigot, 1994.

The Olympic Factbook : A Spectator's Guide to the Summer Games, sous la direction de Rebecca Nelson et Marie J. MacNee, Visible Ink, 1996.

Entretiens avec Émile Noël



12 CLÉS POUR LE MÉDICAMENT

La plupart des médicaments actuels sont d'origine naturelle. Découverts le plus souvent par hasard, certains sont hérités du passé, d'autres sont plus récents. La quête de nouveaux produits toujours plus efficaces et mieux tolérés reste l'un des objectifs de la recherche de pointe.

Code : 2020 215 pages – 75 F


BELIN

Bon de commande en p. 98

La bicyclette idéale

Les cyclistes recherchent le compromis entre puissance, confort et aérodynamisme.

En 1924, le coureur italien Bottechia remportait le Tour de France à une vitesse moyenne d'à peine 24 kilomètres à l'heure. Près de 60 ans plus tard, en 1992, l'Espagnol Miguel Indurain a parcouru la Grande boucle de 3 983 kilomètres à plus de 39,5 kilomètres à l'heure de moyenne. Les modifications de l'entraînement, du parcours et de l'organisation de la course ont sans doute contribué à cette accélération des courses cyclistes. Depuis quelques années, ce sont toutefois les recherches sur l'aérodynamisme qui permettent aux coureurs de rouler plus vite, sur piste comme sur route.

L'italien Francesco Moser a donné en 1984 le coup d'envoi officiel de l'utilisation en compétition des études de mise au point et d'amélioration technique du vélo. Pour battre le record du monde de l'heure sur piste, il a utilisé des roues lenticulaires, plus aérodynamiques que les roues traditionnelles, dont les rayons créent des turbulences. Il a ainsi contourné le règlement qui interdit les habillages non porteurs. La position de son torse était en outre très inclinée vers l'avant pour réduire la résistance de l'air. Une autre innovation spectaculaire, qui venait rompre une tradition longuement établie, était celle du cadre

monocoque, fabriqué d'une seule pièce en matériaux composites. La rigidité de ces cadres est plus grande que celle des cadres assemblés à partir de plusieurs composants : les frictions internes absorbent moins l'énergie de propulsion fournie par le coureur. L'absence de pièces et de structures d'assemblage, sur lesquelles l'air vient buter ou qui créent des turbulences, améliore aussi l'aérodynamisme.

La résistance de l'air à l'avancement d'un cycliste croît comme le carré de la vitesse. Elle compte pour 90 pour cent dans la force totale à vaincre pour avancer. Les trois quarts de cette résistance aérodynamique sont créés par le corps du coureur : la modification de la position de celui-ci est donc le but principal des nouvelles formes de bicyclettes. Jim Martin, de l'Université du Texas, a ainsi calculé que, sur un parcours plat de 40 kilomètres, une position parfaite avec le torse bien plat permet de gagner environ huit pour cent en temps par rapport à la position classique avec le dos rond. L'utilisation d'une roue aérodynamique avec trois rayons à l'avant et d'une roue lenticulaire à l'arrière n'améliore le temps, sur le même parcours, que d'un peu moins de trois pour cent, tandis qu'un cadre aérodynamique à tubes

plats ne fait gagner que 1,5 pour cent supplémentaire environ. En outre, sur les parcours accidentés, l'utilisation d'un vélo allégé n'est pas toujours un avantage : le temps gagné dans les côtes est perdu dans les descentes si la forme du cadre oblige le coureur à adopter une position moins aérodynamique.

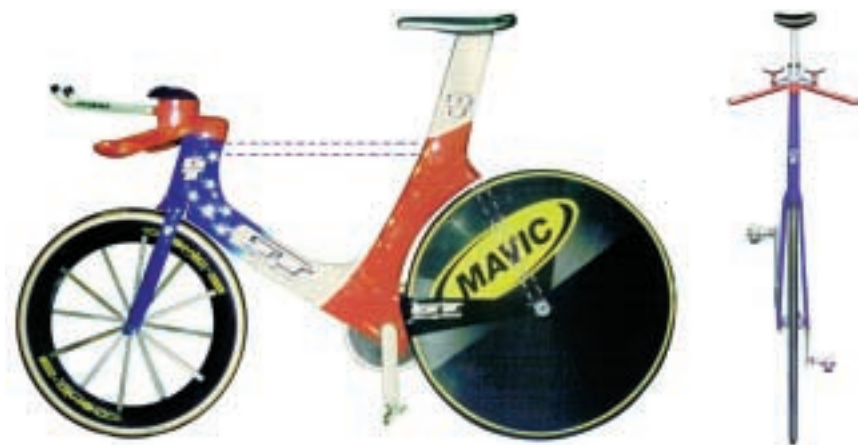
Les éléments clés d'une bonne position aérodynamique sont l'inclinaison et la courbure du torse, l'écartement des coudes et celui des genoux. Ainsi, l'écosais Graham Obree, qui n'avait jusque là réalisé aucune performance remarquable, a battu le record du monde de l'heure sur piste en 1994 grâce à une position originale. Ses épaules étaient abaissées sur ses mains et ses bras étaient collés sous sa poitrine qui reposait sur le guidon. Par rapport à une position plongeante de triathlon, cette position avancée économisait dix pour cent d'énergie.

DANS TOUTES LES POSITIONS

Pour optimiser la position des coureurs et mesurer les critères aérodynamiques et la transmission des forces, Harald Schaale, Michael Nitsch et leurs collègues qui préparent les cyclistes de l'équipe nationale allemande ont mis au point un prototype de mesure réglable qui leur permet de procéder à des expériences plus proches de la réalité que les tunnels de soufflerie et les essais conventionnels en laboratoire. La puissance moyenne déployée est mesurée en salle sur une distance de 1 000 mètres, à une vitesse de 50 kilomètres à l'heure. La répétition de cette épreuve avec différentes positions du corps fait apparaître de grands écarts dans la puissance consommée.

Le vélo de mesure est constitué d'un cadre plat, avec une fourche pour la roue arrière. Des tubes réglables permettent de modifier la distance entre les deux roues et l'écart entre la selle et le pédalier. La hauteur du guidon est en outre ajustable par la modification du diamètre de la roue avant.

Le vélo est équipé de capteurs qui mesurent la puissance fournie par le coureur, la vitesse, la fréquence de pédalage et le rythme cardiaque du coureur. Ces informations sont transmises, par induction, entre le pédalier et un microprocesseur à mémoire situé dans le cadre. La retransmission des résultats par radio permet aux entraîneurs de disposer des données en temps réel et de modifier immédiatement tel ou tel paramètre. Ce système permet notamment de mesurer les conséquences de légers déplacements de la position de la selle sur la puissance du cycliste.



Le Superbike II, conçu aux États-Unis, a un cadre léger en fibres de carbone. Ses éléments sont profilés pour obtenir le plus grand aérodynamisme possible : petite roue avant avec des rayons en lames, roue lenticulaire à l'arrière, poignées de guidon avancées, cadre plat. La barre centrale a été éliminée (en pointillés), ainsi que la liaison entre la tige de selle et le moyeu arrière.



En 1994, le cycliste écossais Graham Obree a battu le record du monde cycliste de l'heure sur piste grâce à une position de course originale. Il était penché vers l'avant à l'extrême, les bras complè-

tement repliés le long du torse, la poitrine reposant sur le guidon. Cette position a été interdite depuis par la Fédération internationale de cyclisme.

Aucun détail n'est négligé pour gagner les quelques pour cent qui assureront la victoire. Une équipe technique du Comité olympique américain a évalué la position de pédalage de Lance Armstrong, qui participera aux Jeux d'Atlanta, pendant des compétitions et au centre d'entraînement. Outre des améliorations de sa position, telles que l'abaissement de son tronc et le resserrement de ses bras par le déplacement de sa selle, de son guidon et de la position de ses mains, une modification de la forme de son casque, lui a été proposée : une «queue» plus longue à l'arrière permet à l'air de s'écouler sans turbulences au-dessus de sa tête et dans son dos. Toutes ces améliorations ont accru la vitesse d'Armstrong de 1,44 kilomètre par heure.

La position qui correspond à la plus faible consommation de puissance n'est toutefois pas toujours celle qui convient le mieux à la course. Les angles de guidon peuvent être défavorables pour le développement de la puissance ou pour le confort (et, à terme, pour la santé) du coureur. La position plongeante du torse pour réduire la résistance de l'air est inconfortable, les genoux du coureur pilonnent le torse et sa vision est limitée. Si un

coureur peut relever la tête pendant les quelques minutes que dure une course de 4 000 mètres, cette position deviendrait intolérable pour une course sur route de 50 kilomètres. Les règlements, très stricts, ne permettent pas non plus toutes les positions. Ainsi, la Fédération internationale de cyclisme a jugé trop instable et dangereuse la position adoptée par G. Obree en 1994 et l'a interdite.

Lorsqu'un compromis a été trouvé sur la meilleure position possible, les ingénieurs doivent fabriquer la bicyclette correspondante. Ils se préoccupent de l'aérodynamisme et de l'allègement, sans sacrifier sa rigidité : la puissance de l'athlète doit être convertie en propulsion et non en déformation de la structure. Le cadre n'est pas le seul élément étudié : le guidon, les fourches, les roues ou les moyeux sont aussi importants. Ainsi, aux Jeux olympiques d'Atlanta, l'équipe américaine disposera de bicyclettes dont le diamètre et l'épaisseur des roues avant ont été réduits : la résistance au vent est plus faible et, dans les courses en équipe, les cyclistes se tiendront plus près les uns des autres afin de s'abriter mutuellement du vent.

En utilisant des matériaux composites résistants, on réduit le poids de la

structure. Des calculs par la méthode des éléments finis et des essais expérimentaux sur la résistance des matériaux sont menés en parallèle afin de déterminer les tensions locales exercées sur les différentes parties de la bicyclette et les déformations qui en découlent. Si l'on constate l'apparition de tensions inacceptables, comme un effet d'encoche qui peut se produire à la jonction d'éléments de sections très différentes, on peut changer ces sections ou renforcer le matériau à cet endroit, mais en augmentant le poids.

Ces études de haut niveau ont parfois des résultats inattendus. Alors que la plupart des vélos, depuis le siècle dernier, ont un cadre en losange, l'un des prototypes conçus par les techniciens allemands pour les prochains Jeux olympiques a un cadre en croix, plus léger. Il suffit à relier les quatre points essentiels du vélo : le roulement arrière, le pédalier, la selle et le raccord de fourche. Cette forme originale n'est toutefois pas nouvelle : en 1885, une entreprise anglaise l'avait déjà brevetée. Les matériaux disponibles à l'époque ne permettaient vraisemblablement pas de fabriquer un tel cadre avec une rigidité suffisante.

Dopage à la testostérone

Une méthode de dépistage fondée sur les concentrations en radio-isotopes.

Aujourd'hui, le dopage par les stéroïdes anabolisants administrés aux sportifs pour que leurs muscles se développent est assez facile à dépister. Toutefois, des stéroïdes anabolisants, notamment la testostérone, l'hormone mâle, sont naturellement présents dans l'organisme : comment différencier l'hormone naturelle et l'anabolisant frauduleux ? Une nouvelle méthode semble plus fiable que celle utilisée par le Comité international olympique.

Pour dépister un fraudeur, on détermine le rapport entre la concentration en testostérone et la concentration en épitestostérone, isomère de la testostérone (deux isomères ont la même formule chimique, mais la géométrie des deux molécules diffère). La testostérone et l'épitestostérone sont éliminées dans les urines.

Le Comité olympique admet qu'un rapport supérieur à six prouve que le sujet s'est dopé avec de la testostérone, mais on a trouvé des rapports compris entre six et neuf chez des sujets non dopés (la valeur moyenne est voisine de un). De surcroît, des valeurs comprises entre quatre et six, considérées comme normales, peuvent aussi correspondre à l'élimination de testostérone exogène, administrée plusieurs jours auparavant. Ainsi cette méthode ne

prouve pas formellement l'administration de testostérone.

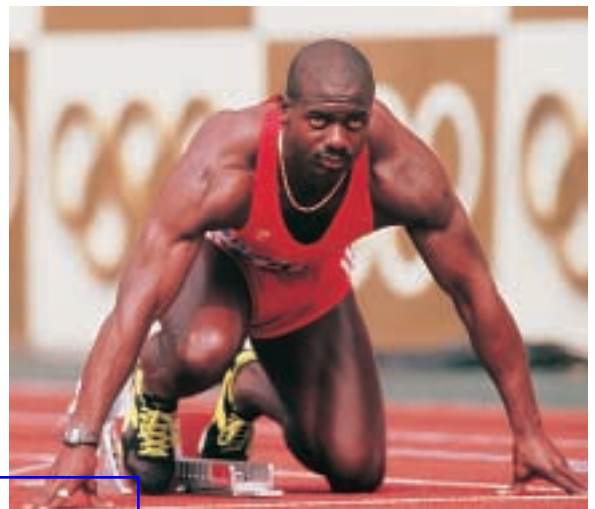
Afin de pallier ces inconvénients, nous avons mis au point une méthode fondée sur la spectrométrie de masse isotopique, où l'on détermine le rapport des concentrations en carbone 12 (^{12}C) et en un de ses isotopes, le carbone 13 (^{13}C). Cette méthode précise l'origine de la testostérone urinaire : naturelle ou endogène, d'une part, synthétique ou exogène, d'autre part. Pourquoi le carbone est-il un marqueur de l'origine de la testostérone ? La testostérone naturelle humaine est biosynthétisée à partir du cholestérol, lequel a deux origines : il est présent dans certains aliments, mais est aussi synthétisé par l'organisme. Au contraire, la testostérone exogène est obtenue par voie chimique à partir de stéroïdes végétaux.

DES RAPPORTS DIFFÉRENTS

Le carbone contenu dans les plantes a pour origine le dioxyde de carbone atmosphérique fixé lors de la photosynthèse. Deux mécanismes de fixation du dioxyde de carbone existent, de sorte que, selon le type de plante, l'enrichissement en ^{13}C change. Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans

les stéroïdes végétaux utilisés pour la synthèse de la testostérone est différent du rapport qui caractérise les molécules biosynthétisées par l'homme à partir de l'alimentation.

Par cette méthode, on analyse le dioxyde de carbone, CO_2 , formé par la combustion de la molécule étudiée ; on obtient diverses molécules issues de la combinaison des isotopes du carbone ^{12}C et ^{13}C , et des isotopes de l'oxygène ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O , et l'on détermine l'abon-



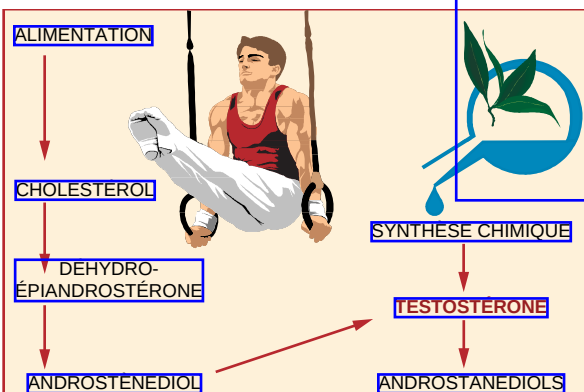
Ben Johnson a été privé de sa médaille d'or aux Jeux olympiques de Séoul, en 1988, pour dopage aux stéroïdes anabolisants.

dance relative de chacune de ces formes de dioxyde de carbone. Un logiciel traite les données et fournit directement les valeurs du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Cette méthode de détection donne des dosages indiscutables de la testostérone endogène et de la testostérone exogène ; elle n'est pas toujours en accord avec les résultats fournis par le rapport testostérone/épitestostérone, préconisé par le Comité olympique. Ainsi, nous avons décelé de la testostérone exogène dans des urines dont le rapport était inférieur à six, et de la testostérone naturelle pour des urines dont ce rapport était supérieur à six.

Il nous reste à préciser le rôle de l'alimentation dans les résultats obtenus. La nature de l'alimentation influe notablement sur la valeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des stéroïdes, mais cela ne devrait pas fausser les résultats : l'analyse isotopique est réalisée tant sur la testostérone elle-même que sur ses précurseurs (le cholestérol, la déhydroépiandrosterone) et sur ses métabolites, notamment les androstenediols. En comparant les rapports isotopiques obtenus pour ces différentes étapes, on détecte aisément toute variation notable du rapport, laquelle signe un apport exogène de testostérone. Les stéroïdes précurseurs servent, en quelque sorte, d'«étalons internes», propres à chaque personne.

Cette méthode exige un matériel plus onéreux que le simple dosage effectué jusqu'à présent, mais elle serait particulièrement adaptée à la confirmation des résultats ambigus obtenus par la mesure des rapports testostérone sur épitestostérone lors des compétitions sportives. Une trentaine de millilitres d'urine suffisent à l'analyse.

Michel BECCHI
CNRS - Service central d'analyse



La testostérone dosée dans les urines peut être l'hormone mâle endogène provenant du cholestérol, lui-même issu de l'alimentation. Elle peut aussi être d'origine exogène : la testostérone de synthèse ne se distingue de la testostérone endogène que par sa composition en carbone 12 et en carbone 13.

Oxygène dopant

Le dépistage de l'érythropoïétine, une hormone censée améliorer l'oxygénation des muscles, serait désormais possible.

L'érythropoïétine est une hormone sécrétée notamment par le rein. Cette hormone stimule la production et la maturation des globules rouges, ou érythrocytes, les transporteurs d'oxygène dans le sang. Une augmentation de la concentration sanguine en érythropoïétine accroît la concentration en oxygène du sang, ce qui facilite l'effort. Depuis quelques années, certains sportifs se dopent avec de l'érythropoïétine ; nous avons mis au point une méthode qui en autorise le dépistage.

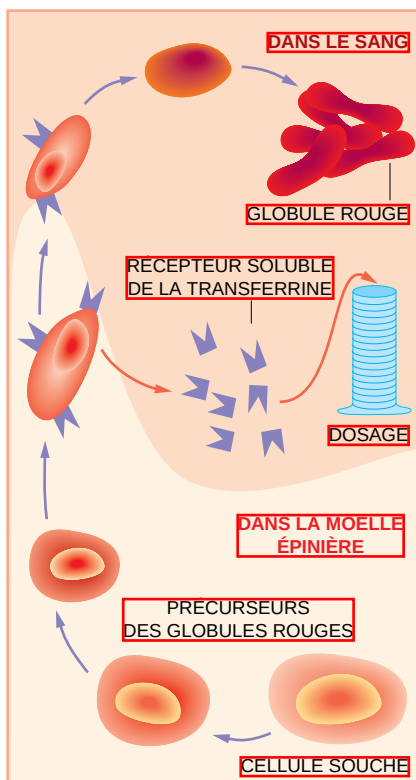
En 1983, les laboratoires AMGEN ont utilisé le gène codant l'érythropoïétine et produit l'hormone par génie génétique. Si l'érythropoïétine humaine de synthèse a permis de traiter les patients déficients en érythropoïétine, elle a aussi été abusivement utilisée par certains sportifs. Dès 1990, on enregistrait les premiers décès de sportifs dopés à l'érythropoïétine. En 1991, le Comité international olympique inscrivait cette substance sur la liste des produits interdits.

Au cours de tous les sports d'endurance, les cellules musculaires consomment de l'oxygène. Peut-on augmenter, chez le sportif, la quantité d'oxygène transportée par le sang jusqu'aux cellules musculaires ? Pour ce faire, on a essayé d'augmenter le nombre de transporteurs d'oxygène en administrant, par voie intraveineuse, du sang ou des globules rouges, quelques jours avant une compétition. Le dopage par l'érythropoïétine humaine de synthèse tente de parvenir artificiellement au même résultat ; l'hormone de synthèse augmente le nombre de transporteurs d'oxygène, c'est-à-dire la quantité d'oxygène délivrée aux muscles.

Toutefois, cette utilisation abusive se heurte à plusieurs difficultés. Sur le plan physiologique, la quantité d'oxygène transportée dans le sang n'est qu'un des maillons de la limitation de la consommation d'oxygène : dans les poumons, tout l'oxygène respiré ne diffuse pas dans le sang des capillaires pulmonaires ; tout l'oxygène contenu dans les capillaires pulmonaires n'est pas transféré dans les capillaires musculaires ; tout l'oxygène véhiculé par les capillaires musculaires n'atteint pas les mitochondries intramusculaires,

qui produisent l'énergie cellulaire. En outre, l'utilisation de l'érythropoïétine humaine de synthèse présente des risques. La viscosité sanguine augmente avec le nombre des globules rouges, de sorte que la circulation sanguine et le transport de l'oxygène ralentissent, et que la quantité d'oxygène mis à la disposition des muscles diminue, résultat inverse de celui recherché. De surcroît, le risque d'obstruction des capillaires et d'embolie pulmonaire ou cérébrale augmente. Ces conséquences pathologiques sont responsables des décès dus à l'utilisation abusive de l'érythropoïétine humaine de synthèse.

Enfin, si l'utilisation de l'érythropoïétine de synthèse chez les personnes anémiques améliore effectivement la quantité



Les globules rouges résultent de la maturation des cellules souches de la moelle. Plusieurs précurseurs se modifient progressivement, et deux d'entre eux libèrent dans le sang des molécules, les récepteurs de la transferrine. Le rapport des concentrations en récepteurs de la transferrine et en ferritine dans le sang est anormal chez les sujets dopés avec de l'érythropoïétine de synthèse.

d'oxygène utilisée par les muscles, cela n'a pas été montré chez le sujet sain. Avec l'équipe de Raynald Gareau, à l'Université du Québec, nous avons cherché un test biologique visant à détecter un dopage à l'érythropoïétine. À cette fin, nous avons étudié les récepteurs solubles de la transferrine présents à la surface de la membrane des précurseurs des globules rouges ; ces récepteurs captent la ferritine, le transporteur du fer. Au cours de la transformation de ces précurseurs en globules rouges, les récepteurs de la transferrine sont libérés et solubilisés dans le sang. Ils reflètent l'augmentation de la concentration sanguine en précurseurs des érythrocytes.

DOSER L'ÉRYTHROPOÏÉTINE

L'érythropoïétine humaine de synthèse modifie aussi la captation du fer par les érythrocytes. Nous avons cherché si le rapport de la concentration en récepteurs de la transferrine sur la concentration en ferritine pouvait détecter un dopage par l'érythropoïétine. Effectivement, nous avons constaté que l'administration d'érythropoïétine humaine de synthèse pendant dix jours à des sujets jeunes, sportifs et sains, augmente ce rapport.

Au contraire, les exercices physiques et l'entraînement en altitude ne semblent pas modifier ce rapport chez les sujets non dopés. Une hypothèse explicative serait que, au cours d'un entraînement, l'organisme s'adapte progressivement à l'augmentation du nombre des globules rouges et à la modification des concentrations en récepteurs de la transferrine et en ferritine : le rapport resterait constant.

Ainsi, nous pensons que le rapport des récepteurs de la transferrine sur la ferritine est un moyen de détecter le dopage à l'érythropoïétine de synthèse. Toutefois, avec ce test de dépistage, on ne dose pas directement l'érythropoïétine exogène, tandis que les tests acceptés aujourd'hui pour dépister un abus sont fondés sur des preuves directes ; en outre, ce dosage exige une prise de sang, tandis que les autres dosages sont effectués sur les urines. Quelques dosages ont pourtant été effectués lors des Jeux olympiques d'hiver de Lillehammer.

Pour lutter contre le dopage, on devra se donner les moyens légaux de pratiquer des dosages sanguins, où l'on pourra rechercher aussi bien l'érythropoïétine que d'autres substances, telle l'hormone de croissance. La solution ne sera pas seulement scientifique ; elle sera le reflet de la volonté de la société et des acteurs du sport.

A. DUVALLET, J.-L. CAYLA, Université Paris V
M. AUDRAN, Université Montpellier I,
R. GAREAU, Université du Québec.

Un monde à part

En France, le sport de haut niveau est incompatible avec la réussite intellectuelle.

La France a un système universitaire élitiste. Dans le domaine sportif, c'est aussi le haut niveau qui est mis en avant. Toutefois l'élite sportive, sauf dans quelques sports, n'est pas reconnue comme détentrice de qualités et de savoirs valorisables dans d'autres secteurs d'activité. Réussite intellectuelle et réussite sportive semblent incompatibles : une célèbre émission de télévision confiait à des candidats différents les rôles de la «tête» et des «jambes».

Nous avons comparé la répartition en catégories socio-professionnelles de la population active française, de l'ensemble des détenteurs d'une licence sportive et d'un échantillon de 810 athlètes de haut niveau, pour dix sports (athlétisme, aviron, escrime, gymnastique, handball, judo, natation, rugby, triathlon et volley-ball) : les inégalités sociales apparaissent. Les cadres supérieurs et, secondairement, les artisans et commerçants, sont fortement surreprésentés parmi les athlètes de haut niveau : 31 pour cent des sportifs de haut niveau français sont des enfants de cadres supérieurs, catégorie qui ne

forme que 12,5 pour cent de la population active. Les employés sont les moins sportifs : 27 pour cent d'employés dans la population active ne font que 22 pour cent des licenciés en clubs et 16,5 pour cent des sportifs de haut niveau. Les ouvriers et les professions intermédiaires (cadres moyens, enseignants...) offrent un profil proche : ils ont en commun d'être les plus représentés parmi les pratiquants en clubs, tout en étant les plus éloignés de la compétition sportive internationale. Ils sont proportionnellement peu nombreux parmi les athlètes de haut niveau, surtout les enfants d'ouvriers.

Pourquoi les classes supérieures de la société française sont-elles autant représentées dans l'élite sportive ? D'abord, la réalisation d'un projet de carrière sportive est favorisée dans les familles déjà insérées dans le milieu sportif et qui disposent d'un capital économique : elles sont moins portées à construire l'avenir des enfants sur l'école. Ensuite, les chances inégales d'accès au sport d'élite résultent moins de pratiques d'exclusion directe que de mécanismes d'auto-élimination, plus subtils

et plus efficaces, fondés sur les valeurs sociales et culturelles que les différentes catégories socio-professionnelles associent au sport.

EDUCATION CONTRE COMPÉTITION

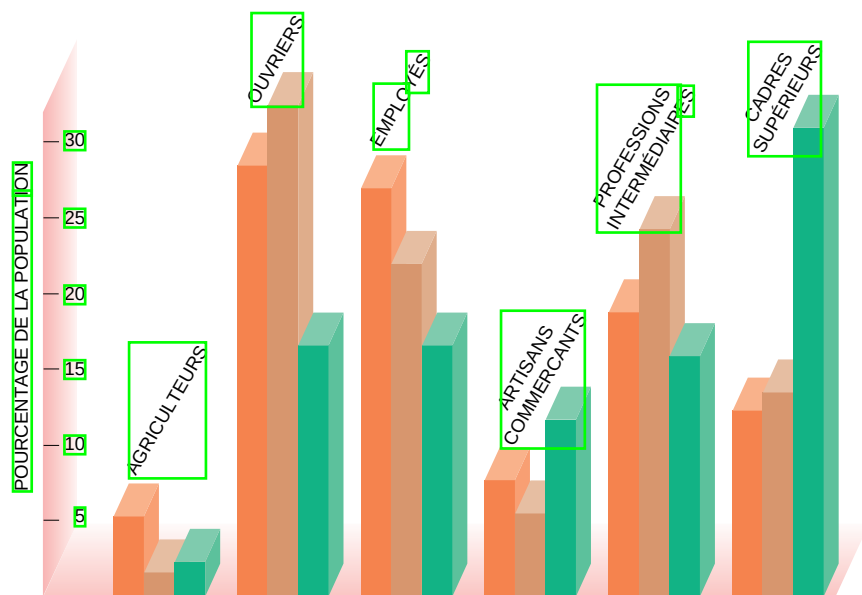
Dès la naissance en France, à la fin du XIX^e siècle, des organisations du sport moderne, deux représentations du sport coexistent. L'une, plus attachée à mettre le sport au service de valeurs éducatives, a trouvé un écho particulier auprès des classes moyennes. L'autre, plus sensible aux valeurs anglo-saxonnes de la réalisation de soi par la compétition, a été davantage intériorisée par les classes supérieures. La singularité de la France en Europe tient au fait que cette dernière conception du sport ne s'est jamais véritablement imposée. En outre, les classes moyennes françaises soupçonnent la haute compétition d'avoir partie liée avec les puissances d'argent et d'être préjudiciable à la santé des athlètes.

La comparaison avec la situation des sportifs de haut niveau allemands fait aussi apparaître une plus grande distance entre la culture de la compétition sportive et la culture scolaire en France. Parmi les athlètes français de haut niveau de trois sports (athlétisme, aviron et escrime), on compte 34 pour cent d'étudiants et, parmi eux, 43,5 pour cent sont dans un département d'éducation physique, tandis que pour les trois mêmes sports on compte 35 pour cent d'athlètes allemands inscrits à l'Université, dont seulement 8 pour cent font des études de sport.

En France, les projets de carrière sportive et de formation professionnelle en dehors du sport sont le plus souvent incompatibles. Le sport de haut niveau est un monde séparé qui demande un investissement total de la part des athlètes. Logiquement, ces derniers cherchent à prolonger cet engagement par une carrière dans l'enseignement ou l'administration du sport.

En Allemagne, l'accès au sport de haut niveau, quasi réservé aux classes sociales supérieures, prend un autre sens. Il est un temps fort de la réalisation de l'individu, qui ne procure de légitimité qu'à la condition que l'athlète sorte du milieu sportif pour mettre en œuvre les valeurs et les qualités développées par la pratique du sport dans le cadre d'une activité professionnelle, le plus souvent préparée par une formation universitaire longue.

Jean-Michel FAURE et Charles SUAUD
Centre de sociologie de l'éducation
et de la culture
GDR Sport du CNRS



Les catégories socio-professionnelles ne sont pas représentées à proportion de leur importance dans la population totale (en orange), parmi les licenciés sportifs (en maroon) et les athlètes de haut niveau (en vert). Les ouvriers et les professions intermédiaires sont les plus présents dans les clubs, mais les cadres supérieurs sont surreprésentés dans le sport de haut niveau.

Le public du football

Les spectateurs des stades de football se regroupent comme dans la vie.

Un pour tous, tous pour un : la devise semble s'appliquer à la foule réunie dans les gradins d'un stade pour soutenir son équipe de football favorite. La réalité est plus nuancée : les différences de statut entre les spectateurs ne s'effacent pas devant la joie d'être ensemble et la mobilisation contre l'adversaire. Chaque secteur des gradins, des virages situés derrière les buts aux tribunes et loges centrales, forme un territoire où s'ancre une identité particulière qui s'exprime, plutôt qu'elle ne se dissout, dans l'effervescence collective. Ces territorialisations ne dépendent pas que du prix des places : elles s'organisent selon une combinaison complexe de critères. Les deux principaux sont les différences de statut dans la vie ordinaire et une hiérarchie propre au militantisme sportif.

Depuis le milieu des années 1980, l'occupation des virages s'est profondément modifiée dans les stades français. Ces espaces réunissaient naguère un public de tous âges, d'origine populaire. Ils sont devenus le fief de groupes de jeunes supporters, démonstratifs et bellicieux. Une évolution analogue s'était déjà produite en Angleterre dans les années 1960 et en Italie dans les années 1970. Cette nouvelle appropriation et les rites qui l'accompagnent correspondent à l'autonomisation de la population jeune, à l'allongement de la durée de la jeunesse dans notre société et au regain virulent du chauvinisme qui se substitue, en cette fin de siècle, à l'allégeance aux grandes idéologies universalistes.

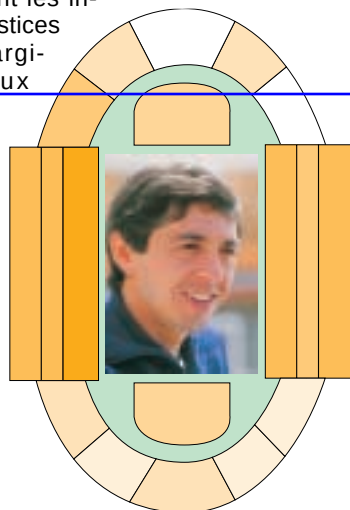
Ces virages, désormais juvéniles, ne forment toutefois pas un univers homogène. Les groupes de supporters d'un même club, reflétant des différences d'origines sociale et résidentielle, se livrent une farouche concurrence pour imposer leur hégémonie dans le stade et être considérés comme les porte-parole légitimes de la «cause».

À Naples, le virage A regroupe des jeunes issus des banlieues désindustrialisées et des quartiers populaires de la ville, le virage B un public tout aussi juvénile, mais plus diversifié socialement, avec des étudiants et des lycéens. À Mar-

seille, la géographie sociale de la cité se projette *grosso modo* sur celle du stade. Le virage Nord est occupé par une cohorte bruyante, désordonnée et facétieuse, venant majoritairement des quartiers et banlieues populaires du Nord de la ville. Ce public, comprenant nombre de fils d'immigrés maghrébins, est fortement conscient de ce qu'il représente dans le stade et dans la cité. L'origine sociale et résidentielle du public du virage Sud est plus diverse, une forte proportion de jeunes supporters provenant des quartiers méridionaux et péri-centraux de la ville, et des couches moyennes de la population.

LUTTES TERRITORIALES

La répartition du public des virages reflète aussi la hiérarchie entre groupes de supporters, qui se répartissent du centre, l'espace le plus visible, vers les marges ou le bas du virage en fonction de leur importance relative. Souvent, dans les stades italiens, une «vieille garde», composée des plus de 25 ans, flanque le commando des jeunes militants. Les groupes nouveaux, encore peu développés, occupent les interstices marginaux



du virage, puis, au fil de leur croissance, se livrent à une farouche compétition territoriale avec leurs voisins pour conquérir l'espace central, le plus prestigieux.

Au-delà du phénomène «jeunes», les modes de fréquentation du stade scandent les principales étapes du destin masculin. Les premiers apprentissages se déroulent dans les tribunes ou sur des gradins calmes, sous la houlette d'un père ou d'un oncle, initiateurs vigilants, prolongeant discussions et commentaires lors des repas familiaux. À l'adolescence, les garçons gagnent «leur» virage par grappes turbulentes de bandes de copains. Fiançailles et mariage introduisent une rupture temporaire dans le cycle de cette sociabilité masculine : accompagnatrices plus ou moins résignées, les jeunes femmes paient, pendant quelques mois, leur tribut sentimental à la passion de leur conjoint qui tente, dans un coin de stade, à l'écart du tumulte, une improbable conversion au fait sportif. À cet intermède galant succèdent, à l'âge mûr, de nouvelles formes de sociabilité masculine dans les gradins des tribunes, celles des «collègues» de travail, des relations de bar, des beaux-frères, des anciens camarades de classe.

Chaque nouvelle forme d'occupation de l'espace du stade matérialise un rite de passage sur le chemin d'une histoire d'homme. Au terme de son existence et de promotions successives, peut-être le supporter aura-t-il fait le tour du stade, comme si l'anneau des gradins symbolisait la boucle de la vie...

Christian BROMBERGER, CNRS, Laboratoire d'ethnologie méditerranéenne et comparative, GDR Sport



Les cartes de popularité d'Alain Giresse (à gauche), petit patron sur le terrain, et de Joseph-Antoine Bell (à droite), gardien camerounais spectaculaire, dans le public de l'Olympique de Marseille en 1987, sont presque le négatif l'une de l'autre (la popularité est d'autant plus grande que la couleur est intense). Le premier est apprécié dans les tribunes, qui regroupent les spectateurs adultes, tandis que le second jouit d'une aura maximale dans le virage Nord (en haut), qui regroupe un public jeune, cosmopolite et turbulent.

L'urbanisation de la montagne

Les Jeux olympiques d'hiver ont bouleversé l'aménagement des vallées alpines.

Les Jeux olympiques modernes sont des événements qui exacerbent la compétition et le spectacle du sport. Ils bouleversent aussi l'urbanisme, bousculent l'organisation régionale, et déstabilisent la société locale ensevelie sous les touristes. En 1968, les Jeux d'hiver de Grenoble représentent un tournant dans l'aménagement des vallées alpines : ces jeux consacrent les sports d'hiver comme sports de masse et la montagne devient un terrain de jeu pour les habitants des villes.

En 1924, lorsque se tiennent les premiers Jeux d'hiver de l'histoire de l'olympisme, les sports d'hiver sont à leurs débuts, peu outillés et réservés à une clientèle riche. Les épreuves sont encore pécunies de l'amateurisme fondateur. La station de Chamonix a acquis une réputation internationale de « capitale » à la fois des montagnards (les guides) et des mondains (les hivernants). Les Jeux confirment un mode de colonisation de la montagne limité à des interventions physiques superficielles. La montagne est encore pour les urbains un espace mystérieux et dangereux. Les sports d'hiver sont à pratiquer avec prudence comme l'étaient les sports nautiques dans les stations balnéaires quelques décennies plus tôt.

On attribue la domination scandinave à la pratique quotidienne, « naturelle », du ski. Dès lors, la conclusion qui s'impose de confier le ski aux montagnards va colorer jusqu'à nos jours l'idéologie des sports de montagne.

GRENOBLE, CENTRE URBAIN

Près d'un demi-siècle plus tard, en 1968, Grenoble, une ville de plaine, industrielle de surcroît et qui, jusque là, s'était peu intéressée à la montagne, va décider du destin du domaine alpin. Jusqu'aux années 1950, le tourisme était perçu comme une ressource, non négligeable mais accessoire, de l'économie paysanne. Dans le contexte des « trente glorieuses » le tourisme des sports d'hiver se développe rapidement et l'« or blanc » attise les convoitises des promoteurs immobiliers. L'intense diffusion médiatique des jeux de Grenoble installe durablement les sports d'hiver parmi les sports de grande consommation.

L'aménagement du territoire du Dauphiné est conduit dans le droit fil de la logique gaullienne : un centre, la ville de Grenoble, et des satellites, les stations de montagne, un puissant réseau de com-

munications, les moyens financiers et réglementaires de l'État, une gestion technocratique. Dans cette doctrine, la montagne devient une annexe de la ville.

L'installation des épreuves de plein air (ski, saut, luge, ski de fond et bobsleigh) sur les sites alpins des stations de sports d'hiver, englobe la montagne dans un territoire sous influence urbaine et crée une « aire métropolitaine » capable de résister à l'influence de la grande concurrence régionale comme celle de la ville de Lyon.

En 1992, à Albertville, le contexte a changé. Les organisateurs des jeux, Michel Barnier et Jean-Claude Killy, jouent la carte régionale, et ce d'autant plus facilement qu'en Savoie aucune ville n'a une importance comparable à Grenoble dans le Dauphiné. L'organisation n'est plus celle du centre et des satellites mais du réseau et de l'ouverture. L'essentiel des investissements est consacré aux infrastructures ferroviaires et à l'amélioration des voies routières : l'objectif premier est le désenclavement des territoires montagnards pour ouvrir le massif alpin français sur l'Europe. Par rapport au Jeux de 1968, la montée de la pression écologiste adoucit les conditions d'implantation des installations sportives et de l'hébergement.

Les trois Jeux olympiques d'hiver organisés en France montrent des préoccupations constantes : l'équipement de la montagne, le développement de la consommation de la nature par les populations urbaines et, en corrélation, la modification des espaces naturels. C'est dans la mise en œuvre que l'on constate des différences : la « tête de pont » colonisatrice de Chamonix, le « tout urbain » centralisé de l'aménagement à Grenoble et le réseau de sites à Albertville.

Claude PRELORENZO,
École d'Architecture de Versailles



Les stations de sports d'hiver (en vert) qui entourent Grenoble ont été construites ou agrandies grâce aux Jeux olympiques de 1968.

Cet événement marque la transition entre l'usage rural de la montagne et son aménagement pour les citadins.

Les bélugas du Saint-Laurent

PIERRE BÉLAND

Une loi protège ces baleines blanches contre les chasseurs, mais la pollution industrielle les menace d'extinction.



Au cours de sa deuxième expédition en Amérique, en 1535, l'explorateur malouin Jacques Cartier remonta le Saint-Laurent, conduit par deux Indiens. Après avoir dépassé l'embouchure du Saguenay, des vents contraires et de forts courants le bloquèrent pendant toute une journée ; il dut jeter l'ancre pour la nuit près d'une île située au milieu du fleuve. Quel ne fut pas son étonnement, au matin, de voir le navire entouré de gros dauphins blancs ! Les Indiens affir-

mèrent que ces «Adothuys» étaient comestibles. Il s'agissait de bélugas, une espèce de baleine qui vit dans le Saint-Laurent depuis des millénaires.

Ces petites baleines pourvues de dents commencèrent à pénétrer dans le fleuve peu après la fin de l'ère glaciaire, lorsque le climat se réchauffa et que le niveau de l'Atlantique monta. L'eau recouvrit partiellement la côte Est de l'Amérique du Nord, s'étendant bien au-delà de l'estuaire du Saint-Laurent, presque jusqu'aux Grands Lacs, et inondant une partie des États de New York et du Vermont. De nombreuses espèces de phoques et de cétacés s'installèrent dans cette mer intérieure, nommée Champlain. Puis la mer se retira, la terre émergea, le bassin s'assécha, et le Saint-Laurent prit forme.

Les bélugas et d'autres espèces de baleines continuèrent à remonter l'estuaire et le fleuve aussi loin que possible, mais ils furent bientôt inquiétés : il y a quelque 8 500 ans, des tribus nomades venant du Sud-Ouest se regroupèrent sur les berges du fleuve, là où les bélugas passaient, en été. Les nomades bâtirent des campements saisonniers, dont des vestiges sont aujourd'hui enfouis sous la terre et sous l'herbe, avec les os des phoques et des bélugas que ces nomades chassèrent.

Vers 1600, des navigateurs basques accostèrent près du Saguenay, là où se trouvaient des baleines et probablement des bélugas. Un siècle plus tard, ils furent suivis par des marchands de fourrure et par des immigrants pour qui la pêche représentait une source de revenus intéressante. Le représentant du roi de France accorda le droit de capturer le béluga à quelques chasseurs, qui mirent en place des fascines, c'est-à-dire des pièges constitués de piquets plantés dans la vase à proximité les uns des autres et dessinant une

sorte d'enclos pourvu d'un goulet d'étranglement ; une fois que les bélugas s'y étaient engouffrés, ils ne pouvaient plus s'en dégager lorsque la marée descendait. En 1721, une quinzaine de pêcheries s'étaient établies sur les deux rives du Saint-Laurent.

La chasse au béluga

Pour quelques communautés locales, la vie s'organisa autour de la chasse au béluga, et cet animal devint objet de légendes. On raconte qu'après avoir capturé plus de 100 bélugas en une seule journée les habitants d'un village firent une fête dans une grange, près de la rivière. Le rhum, le whisky et le vin entretenaient l'allégresse ; les rires et la musique envahissaient toute la plage, où la marée montante commençait à recouvrir les cadavres des baleines. Vers minuit, un des participants aperçut des mains cadavériques qui tentaient d'agripper les danseurs : on quitta la grange à toute vitesse, mais ce fut pour constater avec épouvante que la marée avait emporté toute les prises. Éclairés par la lune, des fantômes humains chevauchaient les bélugas, dont les yeux brillaient comme des charbons ardents et dont les événements crachaient des flammes, laissant dans leur fuite nocturne des traînées incandescentes sur l'eau sombre.

On ignore combien de bélugas ont été tués avant le XIX^e siècle. Entre 1866 et 1960, on estime que 16 200 baleines environ ont été capturées, soit une moyenne annuelle de 172. Au début du XX^e siècle, le nombre de bélugas pêchés était sans doute compris entre 5 000 et 10 000. Lorsque les prises se rarifièrent et que la demande de produits dérivés diminua, le béluga du Saint-Laurent fut quasi oublié. Dans les années 1970, il ne restait pas plus de 500 bélugas.

En 1979, le gouvernement canadien prit des mesures pour interdire totalement la chasse à la baleine, mais la population ne s'est pas reconstituée : aujourd'hui, il n'y a guère plus de 500 baleines dans le Saint-Laurent. Pourquoi leur nombre n'augmente-t-il pas ? Certains biologistes incriminent la faible reproduction d'une population trop petite, d'autres les barrages hydro-



1. LES BÉLUGAS qui meurent dans le Saint-Laurent, comme celui que l'auteur a encordé ici, sont victimes des substances toxiques rejetées par les industries de la région. Quatorze des baleines que l'équipe de l'auteur a autopsiées avaient des tumeurs cancéreuses, ce qui représente plus de la moitié des cancers jamais diagnostiqués dans des populations de baleines, de dauphins et de marsouins.

électriques, qui détruisent l'habitat. Nous avons identifié une autre cause : la pollution.

Victimes de la pollution

J'ai commencé à m'intéresser à cette question vers la fin de l'année 1982,

un jour que j'accompagnais un vétérinaire, Daniel Martineau, pour examiner un béluga échoué sur une rive du Saint-Laurent. L'animal était assez petit, mais il se détachait bien sur un lit de galets sombres ; il était lisse comme un morceau de plastique et plus blanc que l'écume du ressac. L'au-

topsie indiqua que le décès était dû à une insuffisance rénale : les tissus examinés étaient contaminés par du mercure et par du plomb, ainsi que par des polychlorodiphényles, du DDT et d'autres pesticides. Deux bélugas trouvés morts ultérieurement, au cours de la même saison, étaient intoxiqués par les mêmes composés.

En un sens, cette découverte n'apportait rien de nouveau, car on avait déjà détecté des concentrations élevées en polychlorodiphényles et en DDT dans des phoques et des dauphins vivant dans les régions côtières. Les composés organochlorés sont très solubles dans les graisses. Comme ils ne sont pas dégradés dans l'organisme, ils s'accumulent dans les tissus adipeux, se concentrant progressivement au fil de la chaîne alimentaire. De nombreux biologistes ont étudié les lésions dues aux organochlorés, notamment des lésions au foie, des ulcères gastriques, des lésions de la peau ou des glandes, des déséquilibres hormonaux. Pourtant, au tout début des années 1980, les vétérinaires ne s'inquiétaient pas de l'action des organochlorés sur les mammifères marins.

Toujours intrigués de constater que l'effectif des bélugas du Saint-Laurent restait faible malgré les mesures de protection, nous avons poursuivi nos études. Pendant une quinzaine d'années, nous avons constaté 179 décès et examiné 73 carcasses à la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal. Les analyses ont confirmé que la population tout entière était contaminée par divers produits chimiques. Quarante pour cent des animaux avaient des tumeurs, dont la moitié étaient cancéreuses ; ces 14 tumeurs représentaient plus de la moitié de toutes les tumeurs malignes jamais observées chez des cétacés. De nombreux animaux souffraient d'ulcères de l'estomac, dont trois avec perforation, ce qui n'avait encore jamais été diagnostiqué chez des baleines. D'autre part, 45 pour cent des femelles ne produisaient plus que de faibles quantités de lait, en raison d'infections, de nécroses ou de tumeurs des glandes mammaires. Les lésions de la thyroïde et des glandes surrénales étaient fréquentes, et beaucoup d'animaux semblaient souffrir d'une déficience immunitaire : une proportion anormalement élevée avait une infection opportuniste due à



2. LES RIVES DU SAINT-LAURENT ET DES GRANDS LACS sont couvertes de nombreuses usines chimiques (en bas). On a détecté environ 25 composés toxiques – les PCB et le DDT notamment – dans les bélugas du fleuve. De nombreuses baleines ont aussi absorbé du Mirex, un pesticide fabriqué dans les années 1970 sur les bords du lac Ontario. Le Mirex a contaminé les anguilles. Les bélugas attrapent ces dernières lorsqu'elles descendent le Saint-Laurent pour aller se reproduire dans l'océan. En été, les bélugas se concentrent à proximité de l'embouchure du Saguenay (en rouge sur la carte) ; en hiver, ils s'aventurent vers l'embouchure du Saint-Laurent (en bleu).



3. UNE CHASSE INTENSIVE des bélugas a été pratiquée sur les rives du Saint-Laurent, comme le montre cette photographie de 1918. Entre 1866 et 1960, 16 000 bélugas ont été capturés.

des bactéries ou à des protozoaires, beaucoup avaient perdu des dents, et l'une des baleines examinées était hermaphrodite.

Nous n'avons retrouvé aucune de ces anomalies sur les bélugas de l'Arctique, ni sur aucune autre espèce de baleines ou de phoques vivant dans le Saint-Laurent. Le sang de ces animaux contenait les mêmes substances toxiques que celui des bélugas, mais en quantités moindres ; les concentrations en PCB dans les bélugas arctiques ne dépassaient pas cinq parties par million (ppm), contre 500 parties par million chez les bélugas du Saint-Laurent. Ces substances toxiques n'étaient pas seulement localisées dans les tissus adipeux de l'animal, comme on le pensait, mais aussi, en petites quantités, dans les lipides présents dans d'autres tissus, pouvant léser les organes vitaux.

Les effets des organochlorés

En dépit de nos découvertes, de nombreux biologistes refusaient d'accuser la pollution de la mort des bélugas ; bien que les lésions observées chez les bélugas coïncident avec les effets connus des composés toxiques, ils prétendaient que nous n'avions établi aucun lien de cause à effet. Pour ce faire, nous devons isoler un composé spécifique et comprendre comment il déclenchait les maladies. Nous avons alors cherché l'origine des cancers. Cette maladie était deux fois plus fréquente chez le béluga que chez

l'homme, plus fréquente que chez le cheval et le chat, et seulement un peu plus rare que chez le chien. La prévalence du cancer était encore plus forte quand nous étudions uniquement les organes les plus touchés chez les baleines, c'est-à-dire ceux de l'appareil digestif ; seuls les moutons d'Australie et de Nouvelle-Zélande étaient davantage atteints, car les herbages y sont traités par des herbicides cancérigènes.

Nous avons alors établi un parallèle entre les moutons d'Australie et les bélugas du Saint-Laurent, car les sédiments du Saguenay contiennent des tonnes d'un produit très cancérigène, le benzo(a)pyrène, qui se concentre dans les invertébrés. Pendant des dizaines d'années, l'un des plus grands producteurs mondiaux d'aluminium a déversé du benzo(a)pyrène dans le Saguenay. Nous avons montré que ce produit est présent chez les bélugas, mais il nous restait à en trouver l'origine. Les bélugas ont une habitude alimentaire unique chez les baleines à dents : ils se nourrissent de poissons, mais aussi d'invertébrés qu'ils ramassent dans les sédiments. Ainsi, les bélugas ont vraisemblablement absorbé de cette façon le benzo(a)pyrène, qui serait responsable des proportions élevées de cancers observées.

Naturellement, les industriels contestèrent nos hypothèses et, à vrai dire, certaines de nos données étaient critiquables : plusieurs organes étaient simultanément atteints (l'estomac, l'intestin, la vessie, les glandes salivaires, le foie, les ovaires, les glandes mam-

maires), tandis que, normalement, les composés cancérigènes n'endommagent qu'un tissu spécifique. D'autres produits toxiques étaient vraisemblablement en cause. Nous avons pensé aux organochlorés, les composés chimiques les plus abondants dans les baleines. Bien qu'ils ne soient pas directement cancérigènes, ces composés peuvent bloquer l'expression de certains gènes et, chez beaucoup d'animaux, ils inhibent l'activité des lymphocytes T tueurs, ces cellules du système immunitaire qui, normalement détruisent les cellules malignes.

De surcroît, quand ils sont administrés à des animaux de laboratoire au cours des stades embryonnaire, fœtal ou postnatal, ces produits chimiques provoquent des anomalies des systèmes nerveux, endocrinien et reproducteur, et perturbent la production normale des molécules et des cellules du système immunitaire. Les organochlorés ont sans doute les mêmes effets sur les baleines, ce qui expliquerait pourquoi les bélugas du Saint-Laurent ont tant de cancers et diverses maladies. Certaines lésions semblaient vraiment résulter d'une immunodéficience.

Sylvain De Guise, qui avait déjà autopsié beaucoup des baleines que nous avions trouvées, et l'équipe dirigée par Michel Fournier, de l'Université de Montréal, analysaient des échantillons sanguins d'animaux vivants et dénombrèrent les cellules immunitaires, actives ou non. Nous avons décidé d'employer les mêmes méthodes pour analyser le sang des

baleines contaminées et pour y rechercher une éventuelle relation entre la concentration en produits organochlorés et le nombre et l'activité des cellules immunitaires.

D'abord, il nous fallut décrire les cellules immunitaires des bélugas et adapter les tests. Pour ce faire, nous avons utilisé des échantillons sanguins prélevés d'une part sur des baleines arctiques captives à l'aquarium de Chicago et, d'autre part, sur des baleines sauvages que nous reteni-
ons momentanément dans un enclos, dans leur habitat naturel. Nous avons alors adapté nos méthodes analytiques pour pouvoir détecter d'infimes quantités de substances toxiques dans le sang. Nous avons constaté que les cellules immunitaires des bélugas se modifiaient lorsqu'elles étaient exposées, en laboratoire, à des composés organochlorés. D'après une étude récente faite aux Pays-Bas, les défenses immunitaires de phoques en captivité s'effondrent lorsqu'ils sont nourris avec des poissons contaminés par des produits chimiques dont la concentration est comparable à celle

observée pour les poissons du Saint-Laurent.

Nous cherchons aussi à trouver les concentrations minimales au-delà desquelles les organochlorés commencent à être toxiques. Toutes les baleines et tous les phoques du Saint-Laurent contiennent des organochlorés en concentrations variables, mais c'est le béluga le plus atteint ; de plus, les animaux les plus petits ont les concentrations en produits toxiques les plus fortes. Par exemple, la plus petite des baleines, le marsouin commun, est la plus contaminée ; la plus grande, la baleine bleue, l'est le moins. En effet, la quantité de nourriture nécessaire, rapportée à la masse corporelle, est supérieure pour une petite baleine ; en outre, le marsouin se nourrit de poisson, qui se situe vers le haut de la chaîne alimentaire, là où les organochlorés se concentrent, tandis que la baleine bleue se nourrit de plancton, au bas de la chaîne alimentaire.

Or, nous avons montré que les bélugas sont bien plus contaminés que leur taille ne le laisserait supposer. Connais-
sant le contenu en produits chimiques

d'un kilogramme de tissu adipeux, nous avons estimé la quantité de ces différents produits dans la population totale des 500 animaux. En évaluant la nourriture qu'ils avaient absorbée en une quinzaine d'années, nous avons montré que les concentrations en substances toxiques accumulées dans les poissons locaux étaient beaucoup trop faibles pour expliquer ce que nous retrouvions chez les bélugas. D'où provenait le reste ?

Nous avons fini par le découvrir, quand nous nous sommes intéressés au Mirex, un pesticide utilisé dans le Sud des États-Unis. Dans les années 1980, nous avons été surpris d'en trouver dans des baleines, à l'Est du Canada. Une étude complémentaire montra que tout le Mirex détecté dans les bélugas avait été fabriqué dans une usine située à proximité du lac Ontario, dans l'État de New York. Le produit avait contaminé le lac et s'était accumulé dans les tissus des anguilles. En octobre, les anguilles adultes migrent vers l'océan Atlantique pour se reproduire et, en descendant le Saint-Laurent, traversent l'habitat des bélugas.

La vie des bélugas

es petits bélugas se déplacent généralement avec leur mère (à droite). Brun-gris quand ils naissent, ils deviennent progressivement gris, puis blancs à l'âge adulte. Les femelles adultes mesurent en moyenne quatre mètres de long, les plus grands mâles cinq mètres (à gauche). Les animaux communiquent et se repèrent grâce à toute une gamme de sons. Ils émettent et reçoivent ces sons en ajustant la forme de leur «melon», l'organe protubérant sur leur front. Les petits se nourrissent exclusivement du lait maternel, beaucoup plus riche que le lait de vache. Les graisses contenues dans le lait des bélugas du Saint-Laurent renferme de fortes doses de substances toxiques, de sorte que les générations successives de bélugas sont de plus en plus contaminées.



Reprenant alors notre modèle, nous avons montré que, si les bélugas avaient mangé des anguilles pendant environ dix jours par an, depuis une quinzaine d'années, cela justifierait les quantités de Mirex détectées dans leurs tissus. De surcroît, notre modèle montrait que la moitié des quantités de produits organochlorés présents dans les baleines devait aussi provenir des anguilles.

À la fin des années 1980, la quantité de produits organochlorés détectée dans la faune des Grands Lacs a notablement diminué. Comme nous n'avons observé aucune diminution chez les bélugas, nous avons d'abord pensé qu'il faudrait un certain temps pour que la situation s'améliore. Puis nous avons envisagé une autre explication.

Dans un béluga, les tissus adipeux représentent environ 35 pour cent de la masse corporelle, et les organochlorés s'y concentrent. Nous avons constaté que cette concentration était souvent supérieure chez les très jeunes animaux, ce qui contredisait l'hypothèse selon laquelle les toxiques s'ac-

cumulent à mesure que l'animal vieillit; de plus, les femelles étaient beaucoup moins contaminées que les mâles. Nous en avons déduit qu'elles transmettaient d'importantes quantités de produits chimiques à leurs petits, hypothèse que nous avons confirmée après avoir trouvé quelques femelles, mortes peu après avoir mis bas, et qui avaient encore du lait.

Le Saint-Laurent empoisonné

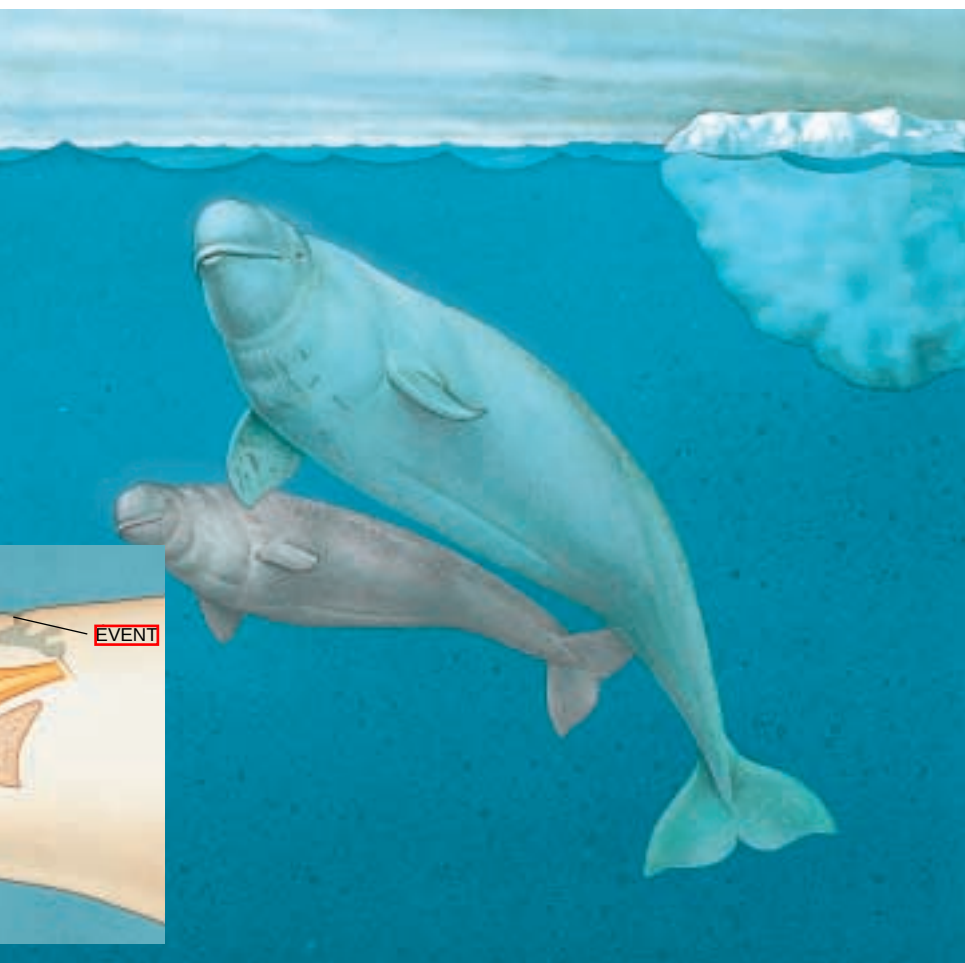
Un baleineau qui pèse environ 50 kilogrammes à la naissance atteint 150 kilogrammes après un an, en absorbant environ quatre kilogrammes de lait par jour. Si le tissu adipeux de la mère contient 30 parties par million de PCB (jusqu'à 90 chez bien des femelles adultes), si les matières grasses du lait en contiennent 10 parties par million et si 70 pour cent environ de la quantité de PCB est véhiculée par le lait, alors, en un an, la mère transmet à son petit environ 3,8 grammes de PCB, ce qui porte à 60 parties par million la concentration en PCB dans les tissus

adipeux du baleineau, le double de la concentration maternelle. Pendant tout ce temps, la mère consomme dix kilogrammes de poisson par jour, ce qui reconstitue son propre stock de PCB. Selon les normes adoptées pour l'homme, n'importe quel aliment contenant plus de deux parties par million de PCB est impropre à la consommation. Le lait était l'explication que nous recherchions : lors de l'allaitement, les jeunes ingèrent une nourriture contaminée. D'un point de vue écologique, les baleineaux se nourrissent à un échelon de la pyramide alimentaire, supérieur à celui de leur mère.

La contamination du Saint-Laurent par des substances toxiques a commencé dans les années 1930-1940. Nous avons un échantillon d'huile de béluga qui date du début des années 1950 : sa concentration en PCB est égale à cinq parties par million. Nous savons aujourd'hui que chaque nouvelle génération de baleineaux a une concentration en substances toxiques dans la graisse supérieure à celle de la mère. Comme ces jeunes se nourrissent ensuite de poissons qui contiennent, chaque année, un peu plus de substances toxiques, chaque génération est plus contaminée que la précédente.

Ces mécanismes sont vraisemblablement généralisables à tous les mammifères aquatiques, avec quelques différences selon les modes de stockage des graisses et les particularités de la lactation. Les lipides sont des substances précieuses, surtout dans les mers froides, qui doivent être économisées et qui sont transmises d'une génération à la suivante. Lorsque ces réserves contiennent des substances toxiques non biodégradables, cet héritage est un cadeau aussi empoisonné que des gènes défectueux.

En outre, nous sommes persuadés que le nombre de baleineaux est faible. Les femelles, et peut-être les mâles, sont sans doute peu fertiles : les substances toxiques auxquelles ils sont exposés lors du stade embryonnaire perturbent probablement le développement de leur appareil reproducteur, et celles qu'ils absorbent à l'âge adulte perturbent les cycles hormonaux essentiels à la reproduction. Il y a quelques années, on a montré que des phoques captifs qui étaient nourris avec des poissons contaminés ne se reproduisaient pas. Les concentrations en vitamine A et en ses précurseurs,



Les canaris des mers arctiques

Comme les bélugas émettent des sons extraordinaires – du sifflement au grincement, du cliquetis au chant – les explorateurs qui les ont découverts les surnommèrent les canaris des mers.

Bien que le nombre de bélugas du Saint-Laurent n'ait pas dépassé 500 depuis 1970, on estime que 100 000 bélugas sillonnent les mers arctiques, près de l'Alaska, du Canada, du Groenland, de la Scandinavie et de la Russie. On observe un banc de bélugas sur la photographie en bas, à droite.

En équipant des bélugas de systèmes de repérage, on a appris qu'ils se déplacent sur de grandes distances, souvent sur plusieurs kilomètres sous la glace arctique (*ci-dessous*). Les bélugas n'ont pas d'aileron dorsal, mais une sorte de crête en tissu fibreux qu'ils utilisent pour briser une épaisseur de glace de plusieurs centimètres et se ménager ainsi une ouverture pour respirer.





indispensables à la croissance, à la reproduction et à la résistance aux infections étaient faibles.

Or, une population ne survit que si des jeunes naissent et que si ces derniers atteignent l'âge adulte. Robert Michaud et Daniel Lefebvre, de l'Institut d'écotoxicologie du Saint-Laurent, observent les bélugas plusieurs mois par an sur le fleuve. Ils survolent le Saint-Laurent, évaluent la taille des groupes de bélugas et identifient leurs habitats préférés. Ils sillonnent aussi le fleuve sur un petit bateau, estimant la proportion des jeunes. En les photographiant, ils ont identifié plus de 200 animaux, souvent des femelles avec des petits d'âges divers. Ils espèrent les revoir dans les années à venir, pour estimer la fréquence des naissances et le nombre des baleineaux qui survivent. En suivant ces baleines identifiées, nous pourrions étudier la structure sociale des populations et, par des biopsies de peau, le degré de parenté génétique dans un même groupe.

Notre démonstration n'est pas encore parfaite, mais la population de bélugas du Saint-Laurent semble menacée par l'exposition à diverses substances toxiques. Contrairement à Jacques Cartier, nous n'avons plus de terres inconnues à découvrir, mais des régions connues à comprendre et à préserver, pour que vivent ces bélugas, dont chacun compte pour le futur.

Pierre BELAND est chercheur à l'Institut national d'écotoxicologie du Saint-Laurent, au Canada.

Jon R. LUOMA, *Doomed Canaries of Tadoussac*, in *Audubon*, vol. 91, n° 2, pp. 92-97, mars 1989.

Wendy PENFIELD, *Message from the Belugas*, in *International Wildlife*, vol. 20, n° 3, pp. 40-45, mai-juin 1990.

P. BÉLAND, S. DE GUISE, C. GIRARD, A. LAGACÉ, D. MARTINEAU, R. MICHAUD, D.C.G. MUIR, R.J. NORSTROM, E. PELLETIER, S. RAY et L. SHUGART, *Toxic Compounds and Health and Reproductive Effects in St. Lawrence Beluga Whales*, in *Journal of Great Lakes Research*, vol. 19, n° 4, pp. 766-755, 1993.

Kenneth S. NORRIS, *Beluga : White Whale of the North*, in *National Geographic*, vol. 185, n° 6, pp. 2-31, juin 1994.

Pierre BÉLAND, *Les bélugas ou L'adieu aux baleines*, illustrations de Frédéric Back, Libre Expression, 266 pages, Montréal, 1996.

La ceinture de Kuiper

JANE LUU • DAVID JEWITT

Au-delà des orbites de Pluton et de Neptune, un anneau de petits objets ceinture le Système solaire.

Après la découverte de Pluton, en 1930, les astronomes ont cherché une éventuelle dixième planète autour du Soleil. Ils pensaient que cette mystérieuse «Planète X» était trop lointaine pour être observée à l'aide de télescopes, mais les perfectionnements de l'optique astronomique, dans les décennies qui suivirent, n'ont pas permis de trouver ce corps. À la fin des années 1980, la plupart des astronomes acceptaient l'idée d'un Système solaire composé seulement des neuf planètes familières.

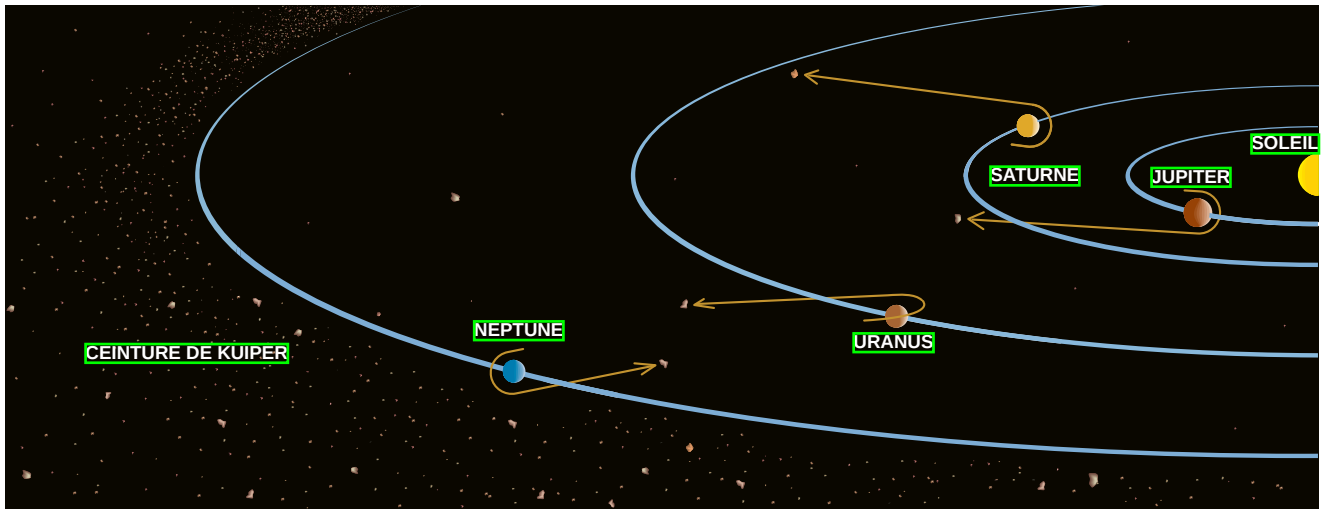
Cette conception changea en 1992, lorsque nous identiâmes un corps céleste de quelques centaines de kilomètres de diamètre, plus éloigné du Soleil que toutes les planètes connues. Depuis, on a recensé une trentaine de corps analogues, en orbite au-delà de Pluton et de Neptune (comme leurs orbites se croisent, elles se disputent la palme de planète la plus éloignée du Soleil) dans le Système solaire externe. Ces objets, dont nous n'avons vraisemblablement découvert qu'une petite partie, constituent la ceinture de Kuiper, ainsi nommée en hommage à l'astronome Gerard Kuiper qui, dès 1951, en avait supposé l'existence.

Kuiper forgea sa conviction en observant le comportement de comètes. Ces noyaux de glace et de poussière, de quelques kilomètres de diamètre, quittent régulièrement le Système solaire externe et s'approchent du Soleil. Des poussières et du gaz, arrachés à leur surface par le rayonnement solaire, forment alors des halos lumineux et des traînées lumineuses allongées.



1. LES CONFINS DU SYSTEME SOLAIRE contiennent de la matière dans un état voisin de celui qui prévalait lorsque les planètes se sont formées. En ces temps reculés, Pluton (*avant-plan*) aurait capturé son satellite, Charon (*à droite*) et expulsé un troisième corps (*en haut, à gauche*) dans l'espace. La région aurait alors été remplie de poussières et encombrée d'objets accrétés dans de la ceinture de Kuiper en formation.



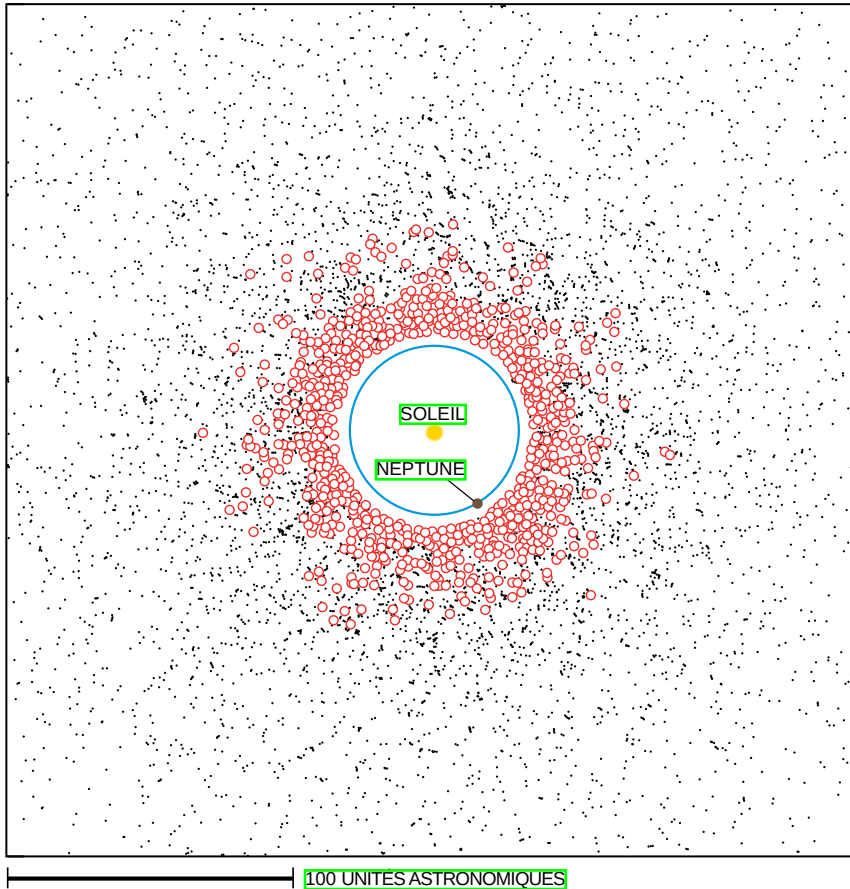


2. LA GRAVITE DES PLANETES a balayé les petits objets à l'intérieur de l'orbite de Neptune lors des premières phases du Système solaire. Certains de ces objets ont plongé vers le Soleil ; d'autres ont filé vers le lointain nuage de Oort (*non représenté*).

Depuis longtemps, les astronomes ont compris que ces comètes actives sont de jeunes membres du Système solaire interne. La comète de Halley, qui revient tous les 76 ans, perd un dix-millième de sa masse à chaque pas-

sage près du Soleil. Elle survivra pendant 10 000 orbites environ, soit un peu plus d'un demi-million d'années. Aujourd'hui, les comètes, formées en même temps que le Système solaire, voici 4,5 milliards d'années, devraient

donc avoir perdu tous leurs éléments volatils, ne laissant que des noyaux rocheux inactifs ou des nuages diffus de poussières. Pourquoi tant de comètes nous offrent-elles alors ces spectacles enchanteurs?



3. D'INNOMBRABLES OBJETS appartenant à la ceinture de Kuiper sont en orbite autour du Soleil, à grande distance de lui, mais ces objets ne sont pas tous visibles de la Terre. Les objets qui peuvent être détectés (*cercles rouges*) à l'aide du télescope de 2,2 mètres de diamètre sur le Mauna Kea, à Hawaï, se concentrent près du bord interne de l'anneau, comme le montre cette simulation numérique de la répartition de la matière lointaine.

Fil d'Ariane

Les comètes qui sont aujourd'hui actives naquirent quand le Système solaire était encore dans l'enfance. Depuis, elles sont restées «au frais» dans un «réfrigérateur céleste» nommé nuage de Oort, dans le Système solaire externe. L'astronome hollandais Jan Oort proposa en 1950 l'existence de cette sphère de matière cométaire contenant des centaines de milliards de comètes ; il pensait que son diamètre atteignait 100 000 unités astronomiques (l'unité astronomique, ou UA, est définie comme la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit 150 millions de kilomètres environ). Selon Oort, les perturbations gravitationnelles des étoiles qui passent à proximité du Système solaire dévient parfois certaines comètes du nuage de leurs orbites stables vers des orbites qui s'approchent du Soleil : ces comètes inactives depuis des milliards d'années s'évaporeront en quelques millions d'années dans le Système solaire interne.

Cette théorie explique la taille et l'orientation des orbites des comètes à longue période (celles qui tournent autour du Soleil en plus de 200 ans). Conformément à ce que l'on attend de comètes émanant d'un réservoir sphérique comme le nuage de Oort, les

astronomes observent que ces comètes pénètrent dans le Système solaire interne en provenance de toutes les directions. En revanche, la théorie de Oort n'explique pas l'origine des comètes à courte période qui parcourent des orbites plus petites, faiblement inclinées par rapport au plan de l'orbite terrestre (le plan de l'écliptique).

La plupart des astronomes pensaient que les comètes à courte période étaient initialement des comètes à longue période dont les orbites auraient été raccourcies et aplaties par les perturbations gravitationnelles des planètes – principalement Jupiter. Cependant, tous les scientifiques ne souscrivaient pas à cette idée. Dès 1949, l'autodidacte irlandais Kenneth Essex Edgeworth écrit un article où il proposait l'existence d'une ceinture aplatie de comètes dans le Système solaire externe. Kuiper, dans son article de 1951, envisagea aussi cette ceinture de comètes, sans mentionner le travail antérieur d'Edgeworth.

Pour Kuiper, le disque du Système solaire ne s'arrêtait pas brusquement à l'orbite de Neptune ou de Pluton. Il imaginait au contraire une ceinture au-delà de ces planètes, constituée de matière résiduelle de la formation des planètes. La densité de matière devait y être si faible que de grosses planètes n'auraient pu s'y agglomérer, mais des objets plus petits, de la taille d'astéroïdes, pouvaient exister. Éloignés du Soleil, ces vestiges de matière primordiale conserveraient des températures superficielles basses ; ils pourraient donc se composer de glace et de gaz gelés, comme les noyaux des comètes.

La théorie de Kuiper resta méconnue jusqu'à ce que Paul Joss, de l'Institut de technologie du Massachusetts, calcule, dans les années 1970, que la faible probabilité de capture gravitationnelle par Jupiter n'était pas compatible avec le grand nombre de comètes à courte période observées. Comme personne ne put confirmer ses calculs, le nuage de Oort demeura la source admise de toutes les comètes, qu'elles soient à période longue ou courte, mais le doute était semé. En 1988, les Canadiens Martin Duncan, Thomas Quinn et Scott Tremaine utilisèrent des simulations numériques pour étudier comment les planètes gazeuses géantes captaient des comètes. Tout comme P. Joss, ils conclurent que le mécanisme de capture était

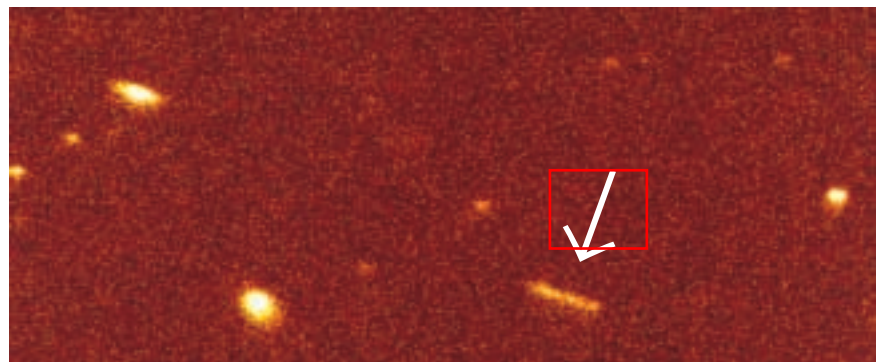
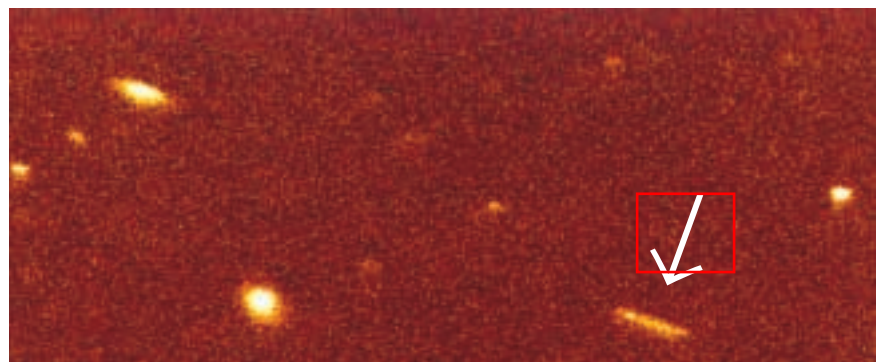
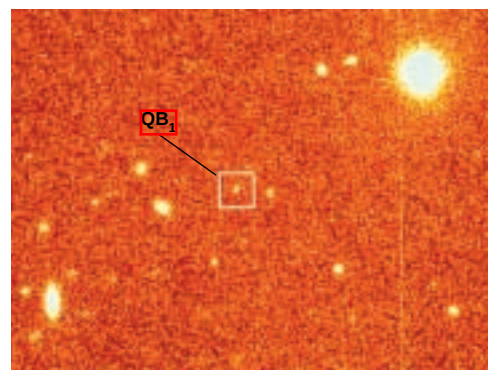
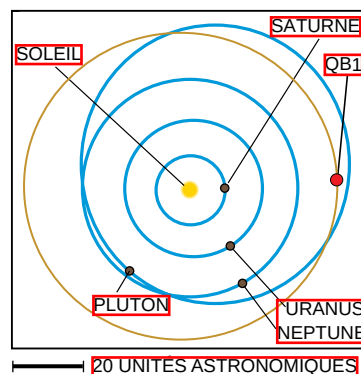
peu efficace. Leurs travaux montrèrent également que les rares comètes qui pouvaient être extraites du nuage de Oort par l'attraction gravitationnelle des planètes avaient des orbites très inclinées par rapport au plan de l'écliptique.

Pour ces astrophysiciens, les comètes à courte période ne provenaient pas du nuage de Oort, mais de la capture, par les planètes, d'objets présents dans un anneau situé dans le Système solaire externe ; les orbites de ces comètes à courte période étaient originellement peu inclinées par rapport à l'écliptique. Toutefois, pour que les calculs soient plus rapides, ils avaient multiplié les masses des planètes par 40. Cet artifice de calcul, qui

accroissait l'attraction gravitationnelle des planètes, fut critiqué par les astrophysiciens, qui doutèrent des résultats.

La récompense de l'observation

Dès 1987, nous avons commencé une campagne d'observations pour savoir si le Système solaire était réellement vide au-delà de l'orbite de Pluton ou s'il était peuplé de petits corps froids. Pour recueillir la faible lumière réfléchie par des astres aussi lointains, nous avons abandonné les classiques plaques photographiques et avons utilisé des détecteurs électroniques à transfert de charge (CCD), plus sensibles, installés sur un grand télescope.



4. DES IMAGES successives, prises en 1992 (au milieu et en bas), dévoilent, sur le fond des étoiles fixes, l'objet QB₁ qui appartient à la ceinture de Kuiper. Cette paire d'images ne couvre qu'une petite portion du champ complet (en haut, à droite) que les auteurs ont dû analyser avant d'identifier QB₁ (flèches) et de déterminer son orbite (en haut, à gauche).

Nous avons effectué la majeure partie de notre étude au télescope de 2,2 mètres de diamètre d'Hawaï, au sommet du Mauna Kea. À l'aide d'un détecteur CCD couplé à ce télescope, nous avons pris des séries de quatre images d'une région du ciel. Chaque image était exposée pendant 15 minutes, et un ordinateur affichait la séquence des quatre images en une succession rapide. Les objets qui se déplacent légèrement d'une image sur l'autre par rapport aux étoiles en

arrière-plan sont des membres du Système solaire.

Durant cinq ans, nous n'avons rien trouvé, mais nous avons eu tant d'occasions de perfectionner nos équipements et notre technique de clignotement que nous avons conservé notre enthousiasme initial (à défaut du financement). Mais, le 30 août 1992, alors que nous prenions la troisième image d'une séquence de quatre et que nous faisions défiler les deux premières images sur l'ordinateur, nous remarquâmes un

léger déplacement de la position d'une «étoile» faible entre les deux premières images! Le mouvement, quoique léger, semblait réel, et la comparaison des deux premières images avec la troisième nous confirma que nous avions trouvé quelque chose de peu ordinaire. Le mouvement lent à travers le ciel indiquait que l'objet découvert pouvait être au-delà de l'orbite de Pluton. Des mesures ultérieures confirmèrent que l'objet n'était pas un astéroïde qui se déplaçait parallèlement à la ligne de visée ; il s'agissait d'un corps situé au-delà de l'orbite de Pluton.

Les deux nuits suivantes, nous avons à nouveau observé cet objet étrange et obtenu des mesures précises de ses positions, de sa luminosité et de sa couleur. Ces données furent transmises à l'Union astronomique internationale, qui calcula que l'objet que nous avions découvert, nommé 1992 QB₁, tournait autour du Soleil à la distance considérable de 40 unités astronomiques. C'était à peine moins loin que ce que nous avions supposé.

QB₁ réfléchit une lumière plus rouge que la lumière qu'il reçoit du Soleil. Un seul autre objet du Système solaire possède une couleur semblable : c'est l'astéroïde 5145 Pholus, dont la couleur rouge provient probablement de matière sombre, riche en carbone. Nous avons été très intéressés, au cours des jours qui suivirent notre découverte, d'observer la similitude de 5145 Pholus et de QB₁. Ce dernier était-il seulement enveloppé d'une matière rouge, riche en composés organiques? Quelle était sa taille? Nos premières mesures indiquaient un diamètre de 200 à 250 kilomètres, soit environ 15 fois la dimension du noyau de la comète de Halley.

Même après la découverte de QB₁, quelques astronomes continuèrent à douter de l'existence d'objets dans le Système solaire externe, mais, en mars 1993, nous découvriâmes un deuxième objet, aussi éloigné du Soleil que QB₁. Ce nouveau corps se trouve à l'extrémité opposée du Système solaire. Au cours des trois dernières années, d'autres groupes d'astronomes ont participé à la quête et, à ce jour, la famille des objets transneptuniens de la ceinture de Kuiper compte 32 membres.

Les membres connus de la ceinture de Kuiper ont plusieurs caractéristiques communes. Par exemple, tous se situent au-delà de l'orbite de Neptune : le bord interne de la ceinture serait défini par cette planète. Tous ces nouveaux corps

La dynamique des petits corps

Aujourd'hui, en France, deux groupes de recherche sont particulièrement actifs dans l'étude de la ceinture de Kuiper : l'un au Bureau des longitudes à Paris et l'autre à l'Observatoire de la Côte-d'Azur.

Au Bureau des longitudes, François Colas, Pierre Drossart, Laurent Jorda et Jean Lecacheux envisagent plusieurs méthodes de détection de nouveaux objets. La première consiste à utiliser le télescope de 55 centimètres du pic du Midi, équipé de capteurs CCD. Ce télescope aura ainsi un champ de un degré carré et une magnitude limite de 23 (à titre de comparaison, les étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu ont une magnitude de 5 ou 6). Bien que la magnitude limite soit modeste (le télescope spatial à une magnitude limite de 29 : il peut détecter des objets un million de fois plus faible), le champ de recherche couvert sera très grand et le temps d'observation alloué important. On peut donc espérer découvrir des classes d'objets intermédiaires entre Pluton et les corps de la ceinture de Kuiper actuellement connus. Cette équipe explore l'ensemble de la voûte céleste, sans se restreindre à l'écliptique, comme le font les autres observateurs. Le deuxième projet de recherche envisage d'utiliser l'équipement de la mission EROS 2 (à l'Observatoire européen austral du Chili) conçue pour la recherche des lentilles gravitationnelles en direction du centre galactique, pendant les deux à quatre semaines par an où le centre galactique n'est pas observable. Un troisième projet utilisera le télescope de 3,60 mètres de diamètre d'Hawaï, ce qui permettrait d'atteindre, pour un champ de un degré carré, une magnitude limite de 25 à 26. On détectera alors des objets 100 à 1 000 fois moins lumineux que ceux qui sont visibles dans le télescope du pic du Midi. Ce projet ambitieux devrait trouver de nombreux objets de la ceinture de Kuiper.

À l'Observatoire de la Côte-d'Azur, Fabrice Thomas, Michelle Moons et moi étudions mathématiquement l'évolution orbitale des objets de la ceinture de Kuiper. Nos premiers résultats donnent la structure dynamique de la ceinture ; dans la partie interne (moins de 42 unités astronomiques), les résonances avec Neptune sont les seules régions stables, alors que dans la partie externe, presque toutes les orbites sont stables, du moins à excentricité et inclinaison faibles. Ce résultat est en accord avec le fait que tous les objets découverts au-delà de Neptune et de demi-grand axe inférieur à 42 unités astronomiques se répartissent sans exception dans les résonances 4/3, 3/2 ou 5/4. Par ailleurs, tous les objets découverts au-delà de 42 unités astronomiques semblent ne pas être associés à une résonance spécifique. Aujourd'hui, nous étudions les régions de la ceinture de Kuiper d'où les objets peuvent s'échapper seulement au bout de quatre à cinq milliards d'années, réservoir probable des comètes à courte période : celles-ci ont dû s'échapper récemment de la ceinture de Kuiper (dans les derniers millions d'années écoulés) après s'y être formés quelques milliards d'années auparavant.

Alessandro MORBIDELLI,
Observatoire de la Côte-d'Azur

célestes parcourent des orbites peu inclinées par rapport à l'écliptique, observation qui corrobore l'hypothèse de l'existence d'un anneau aplati de comètes. Avec des diamètres compris entre 100 et 400 kilomètres, ces 32 objets sont beaucoup plus petits que Pluton (2 300 kilomètres de diamètre) et que son satellite Charon (1 100 kilomètres de diamètre).

L'échantillon actuel est encore assez petit, mais le nombre de nouveaux corps découverts suffit à établir l'existence de la ceinture de Kuiper. Nous estimons qu'elle contient au moins 35 000 objets

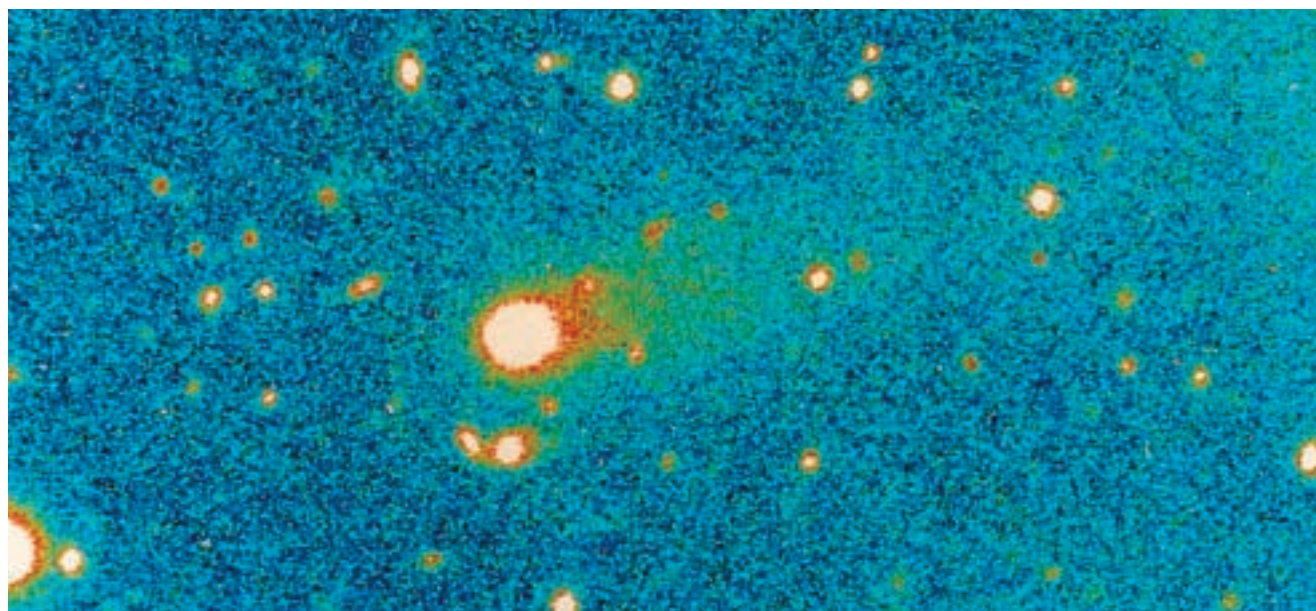
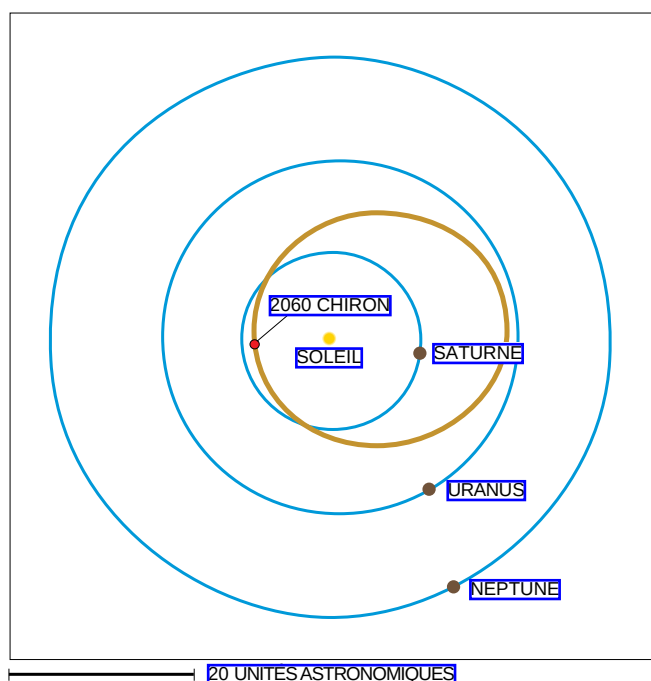
d'un diamètre supérieur à 100 kilomètres. Sa masse totale atteint donc probablement plusieurs centaines de fois celle de la ceinture d'astéroïdes située entre les orbites de Mars et de Jupiter.

Un réfrigérateur de comètes

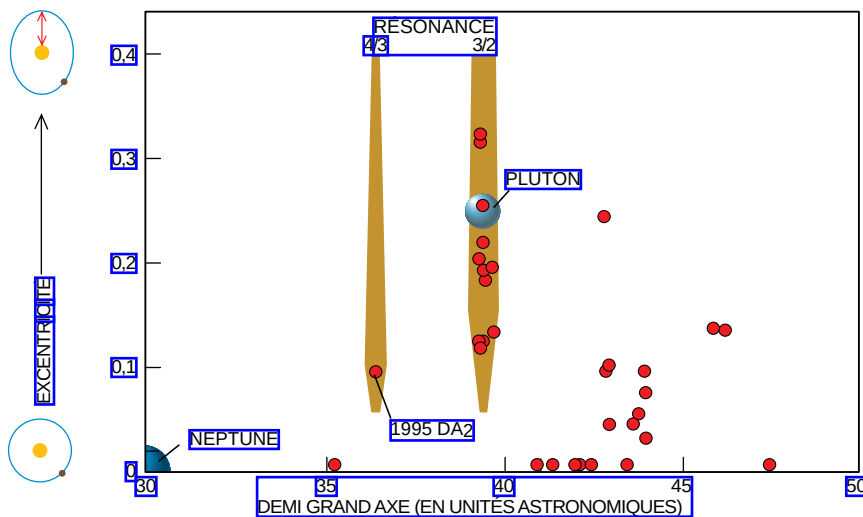
La ceinture de Kuiper est-elle vraiment à l'origine des comètes à courte période? À l'aide de simulations numériques, Matthew Holman et Jack Wisdom, de l'Institut de technologie du Massachusetts, montrèrent qu'en 100 000 ans les

perturbations gravitationnelles des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) éjectent des comètes présentes dans leur voisinage, aux confins du Système solaire. Cependant, même après 4,5 milliards d'années, une grande partie des comètes transneptuniennes demeurent dans la ceinture. Ainsi, les objets de la ceinture de Kuiper situés à plus de 40 unités astronomiques du Soleil sont probablement sur des orbites stables depuis la formation du Système solaire.

Comme la ceinture de Kuiper est suffisamment massive, elle constitue



5. LE CORPS CELESTE 2060 CHIRON semble avoir glissé de la ceinture de Kuiper à son orbite actuelle (à gauche). La faible lueur qui nimbe cet astre (à droite) apparente cet objet à d'autres corps «actifs», comme la comète Peltier (ci-dessus).



6. DE NOMBREUX OBJETS DE LA CEINTURE DE KUIPER ont des orbites «résonantes». Les orbites sont décrites par l'excentricité (l'écart par rapport à la circularité) et le demi-grand axe (flèche rouge, en haut, à gauche). Comme Pluton, près de la moitié des corps connus de la ceinture de Kuiper (points rouges) tournent deux fois autour du Soleil pendant que Neptune effectue trois révolutions : c'est une résonance 3/2. L'objet 1995 DA₂ occupe une orbite caractérisée par une autre résonance. Ce phénomène refléterait l'évolution primordiale du Système solaire, quand de nombreux petits corps furent éjectés et que les planètes principales s'éloignèrent du Soleil. Lors de ces mouvements d'éloignement, Neptune pourrait avoir verrouillé Pluton et une variété d'objets plus petits sur les orbites résonantes que l'on observe aujourd'hui.

un bon réservoir de comètes. Le mécanisme de transfert hors de ce réservoir est maintenant bien compris : les forces gravitationnelles exercées par Neptune érodent lentement le bord interne de la ceinture de Kuiper, expédiant des objets de cette zone vers le Système solaire interne. Beaucoup de ces corps se consomment en comètes. Certains, telle la comète Shoemaker-Levy 9, qui percuta Jupiter en juillet 1994, terminent leur existence par une collision avec une planète ou avec le Soleil. D'autres sont pris dans une fronde gravitationnelle qui les projette dans l'espace interstellaire.

Si la ceinture de Kuiper est la source des comètes à courte période, peut-on trouver des comètes qui proviendraient spécifiquement de cette ceinture ? Les Centaures, un groupe d'objets comprenant 5145 Pholus, seraient de telles comètes. Les Centaures parcourent de vastes orbites instables, qui croisent celles des planètes. Ils subsistent parmi les planètes géantes quelques millions d'années seulement avant que les interactions gravitationnelles ne les éjectent du Système solaire ou ne les transfèrent sur des orbites plus petites.

Les Centaures ne peuvent s'être formés là où ils se trouvent aujourd'hui, car leurs temps de vie avant éjection du Système solaire sont bien inférieurs à l'âge de celui-ci. Toutefois, la nature de leurs orbites ne permet pas de connaître

leur origine avec certitude. Le réservoir le plus proche (et le plus probable) est la ceinture de Kuiper. Les Centaures constitueraient donc des «comètes de transition», des objets qui appartenaient à la ceinture de Kuiper, en route pour une vie courte, mais spectaculaire dans le Système solaire interne. Un Centaure particulier, 2060 Chiron, fournit l'indice le plus convaincant en faveur de cette hypothèse : ses découvreurs l'avaient considéré comme un astéroïde inhabituel, mais on sait aujourd'hui que 2060 Chiron est une comète active, nimbée d'un halo faible, mais persistant.

La ceinture de Kuiper pourrait-elle fournir autre chose que des comètes ? Est-ce une coïncidence si Pluton, son satellite Charon et le satellite neptunien Triton, objets analogues, se trouvent à proximité de la ceinture de Kuiper ?

Un étrange trio

Les densités de Pluton et de Triton, par exemple, sont bien supérieures à celles des planètes gazeuses géantes du Système solaire externe. Les orbites de ces corps sont également assez étranges. Triton tourne autour de Neptune dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse de celui du mouvement orbital de toutes les planètes et de la majorité des satellites. L'orbite de Pluton, très inclinée par rapport à l'écliptique, est si allongée qu'elle coupe celle de Neptune. Pluton échappe cependant à toute

collision avec Neptune, en raison d'une relation orbitale particulière nommée résonance 3/2 : lorsque Neptune effectue trois révolutions autour du Soleil, Pluton en accomplit deux.

On comprend le mystère céleste si l'on admet que Pluton, Charon et Triton sont les survivants d'un ensemble, jadis plus vaste, d'objets de tailles similaires. Neptune aurait extrait ces trois corps de la ceinture de Kuiper, capturant Triton et verrouillant Pluton – peut-être avec Charon dans son sillage – dans sa résonance orbitale actuelle.

Les objets découverts dans la ceinture de Kuiper ont des résonances orbitales particulières : la moitié d'entre eux ont la même résonance 3/2 que Pluton et, comme la planète, ils parcourent leur orbite pendant des milliards d'années sans avoir de rencontres proches avec Neptune. Nous avons surnommé Plutinos («petits Plutons») les objets de ce type, dans la ceinture de Kuiper. Compte tenu de la faible portion de ciel examinée, nous estimons que plusieurs milliers de Plutinos ont un diamètre de taille supérieure à 100 kilomètres.

Les découvertes récentes d'objets dans l'anneau de Kuiper donnent une nouvelle compréhension du Système solaire externe. Pluton ne semble aujourd'hui particulier que parce qu'il est plus grand que tous les autres membres de la ceinture de Kuiper. On peut même se demander si Pluton mérite le statut de planète à part entière ? Paradoxalement, une étude qui commença par la recherche d'une dixième planète pourrait ramener à huit le nombre des planètes de notre Système solaire.

Jane LUU est astronome à l'Université Harvard et David JEWITT est astronome à l'Université d'Hawaïi.

M. DUNCAN, T. QUINN et S. TREMAINE, *The Origin of Short Period Comets*, in *Astrophysical Journal*, vol. 328, pp. L69-L73, 15 mai 1988.

J. LUU, *The Kuiper Belt Objects*, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, sous la direction de A. Milani, M. Di Martino et A. Cellino, Kluwer Academic Publishers, 1993.

D. JEWITT et J. LUU, *The Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 109, n° 4, pp. 1867-1876, avril 1995.

R. MALHOTRA, *The Origin of Pluto's Orbit: Implications for the Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 110, pp. 420-429, juillet 1995.

La prédisposition au cancer

FREDERICA PERERA

Afin de prévenir l'apparition de la maladie, les spécialistes d'épidémiologie moléculaire tentent de dépister les personnes les plus susceptibles d'avoir un cancer ; pour ce faire, ils recherchent les signes biologiques d'une telle prédisposition.

Imaginons que nous parvenions à savoir si des tissus ont été modifiés par des agents cancérogènes et s'ils sont dans un état précancéreux. Imaginons que nous parvenions à savoir si un individu présente une sensibilité particulière à certains agents cancérogènes, tels que la fumée de cigarette, les rayonnements, divers microbes, des substances chimiques naturelles ou synthétiques présentes dans l'alimentation, dans l'eau ou dans l'air. Alors la lutte contre le cancer serait facilitée, car les personnes à risques connaîtraient les agents cancérogènes qui les menacent, et nombre de cancers seraient évités. En outre, si l'on parvenait à montrer que certaines catégories de personnes, tels les enfants, sont plus sensibles à certains facteurs, les responsables de la santé publique pourraient prendre des mesures afin de réduire les expositions.

Ces perspectives poussent les spécialistes d'une nouvelle discipline, l'épidémiologie moléculaire, à chercher des «biomarqueurs» qui révéleraient une prédisposition au cancer. Aujourd'hui, la panoplie de ces marqueurs est encore limitée, et l'on ne sait pas évaluer précisément le risque qu'un individu particulier ait un jour un cancer, mais les premiers tests prédictifs devraient apparaître prochainement. Entre-temps, il serait avisé de profiter du temps disponible pour préparer le cadre légal

d'utilisation de ces tests : nous devons apprendre à protéger les personnes qui se soumettront à ces tests, et à éviter toute discrimination par les compagnies d'assurances ou par les employeurs.

L'épidémiologie moléculaire montre notamment que les méthodes avec lesquelles on détermine les expositions «acceptables» aux agents cancérogènes de l'environnement sous-estiment les risques encourus par certaines catégories de la population. Aujourd'hui, pour savoir si une exposition à certains produits augmente la proportion de cancers humains, ou pour savoir si des actions concertées réduisent cette proportion, on doit attendre des années, voire des dizaines d'années ; en étudiant les signes précurseurs des cancers, les épidémiologistes moléculaires espèrent répondre plus rapidement à ces questions, et prendre plus vite des mesures de prévention efficaces. Enfin, les biomarqueurs aideront les cancérologues à mettre au point de nouvelles méthodes de prévention du cancer.

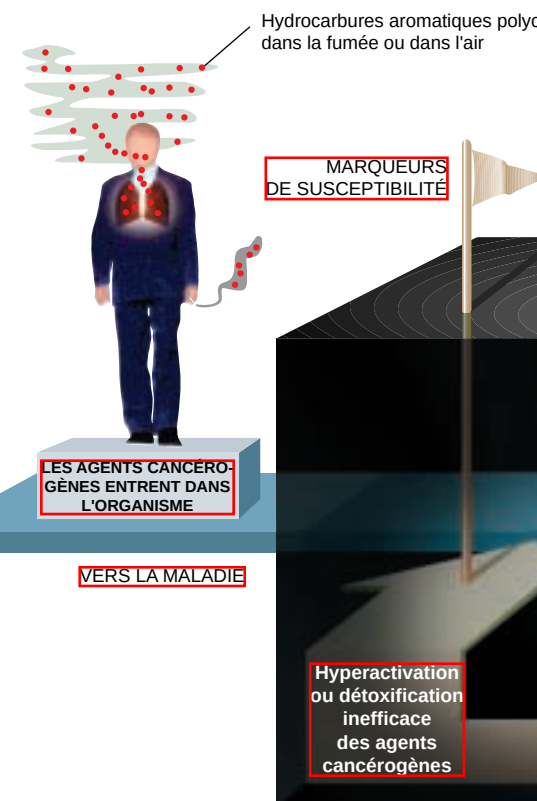
Malgré quelques analogies, l'épidémiologie moléculaire diffère de l'épidémiologie classique : elle utilise les mêmes outils, c'est-à-dire l'étude historique des cas recensés, des questionnaires et le contrôle de l'exposition aux agents cancérogènes, mais elle y ajoute les méthodes de la biologie moléculaire. Certes, l'épidémiologie classique a notablement contribué

EPIDÉMIOLOGIE CLASSIQUE



POPULATION EXPOSÉE À LA FUMÉE DE CIGARETTE OU À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

EPIDÉMIOLOGIE MOLECULAIRE



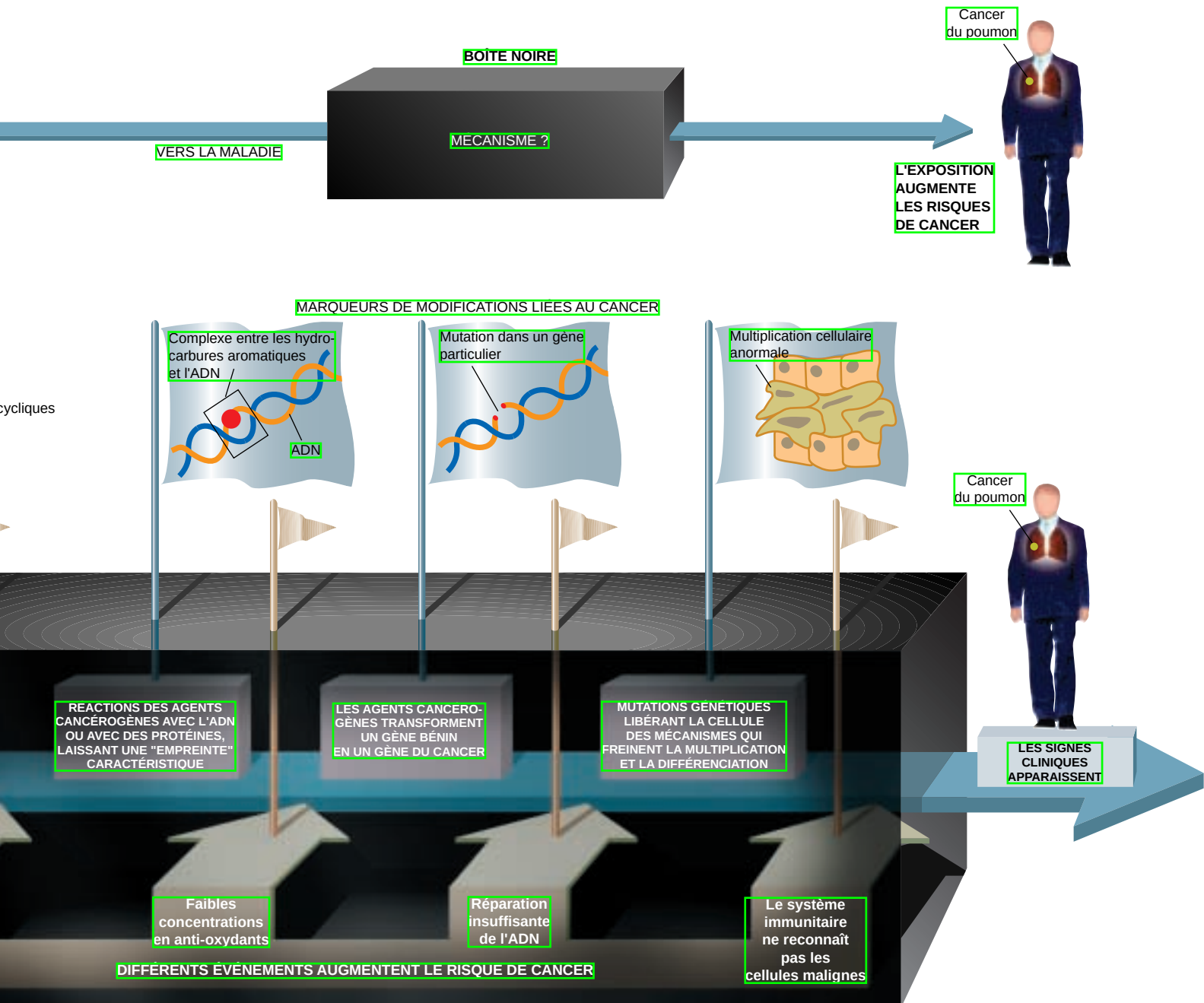
1. L'EPIDEMIOLOGIE MOLECULAIRE apporte des informations que l'épidémiologie classique ne fournit pas, comme l'illustre cet exemple d'un cancer du poumon. L'épidémiologie classique (*en haut*) identifie les facteurs qui augmentent les risques de cancer, telle l'inhalation d'un air pollué ou de la fumée de cigarette, mais ne précise pas comment la maladie apparaît. Au contraire, l'épidémiologie moléculaire (*en bas*) s'intéresse aux événements qui se produisent dans la boîte noire et met en évidence les étapes qui mènent de l'exposition aux agents cancérogènes à la maladie. Elle identifie aussi les signes biologiques, ou biomarqueurs, qui révèlent une prédisposition à la maladie. Certains marqueurs (*les drapeaux rectangulaires*) indiquent l'évolution vers la maladie ; d'autres (*les petits fanions*) signalent une vulnérabilité, innée ou acquise, aux agents cancérogènes. En utilisant de tels marqueurs, les épidémiologistes pourront repérer les personnes à risques pour qui la prévention est une question de survie.

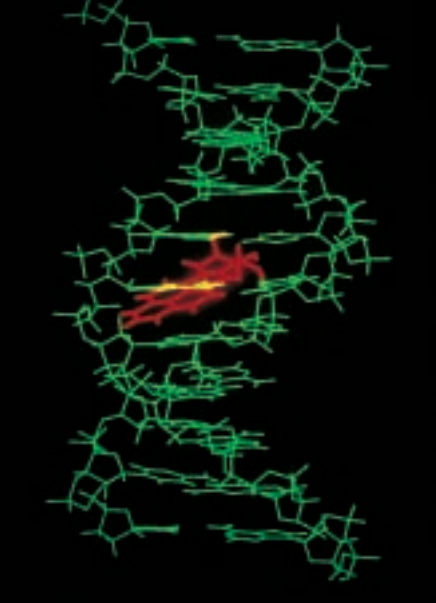
à l'évaluation des risques de cancers : elle a montré qu'une alimentation très riche en graisses favorise le cancer du côlon, que le benzène provoque des leucémies et que les cigarettes augmentent notablement le risque de cancer du poumon (un gros fumeur sur dix risque d'avoir un cancer du poumon). Toutefois, elle n'a donné aucune information sur la suite d'événements qui conduisent de la première exposition à la maladie. Au contraire, les épidémiologistes moléculaires tentent de déceler les signes avant-coureurs d'un cancer et d'identifier des repères biologiques quantifiables qui jalonnent l'évolution de la maladie.

Ce travail se fonde sur les nombreuses explorations des mécanismes de la cancérogenèse ; en retour, il améliore notre compréhension de ces mécanismes. Aujourd'hui, on sait que les cancers résultent de l'accumulation de dommages dans l'ADN d'une cellule : quand ces anomalies finissent par supprimer des contraintes qui assurent une multiplication normale de la cellule, celle-ci prolifère, engendrant une tumeur qui grossit, envahit les tissus voisins et dissémine finalement des tumeurs satellites (les métastases) dans tout l'organisme.

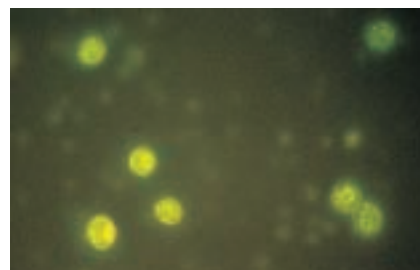
Si des anomalies génétiques sont responsables de cancers, toutes les tumeurs

ne sont pas déclenchées par des gènes endommagés hérités des parents. Dans les pays industrialisés, à peine cinq pour cent des cancers sont héréditaires. Les accidents génétiques qui transforment une cellule saine en une cellule maligne s'accumulent tout au long de la vie, au fil d'interactions complexes entre les agents cancérogènes et l'organisme, qui s'en protège de plusieurs façons. Divers agents cancérogènes sont présents dans l'environnement, mais d'autres, tels les agents oxydants, sont produits par l'organisme. En réalité, deux facteurs se conjuguent : la gravité de l'exposition à l'agent cancérogène – quel qu'il soit – et l'efficacité des mécanismes de défense





2. LES OUVRIERS DES FONDERIES (photographie ci-dessus), les fumeurs et les habitants des régions très industrialisées respirent souvent un air chargé en sous-produits de combustion, notamment en agents cancérogènes connus sous le nom d'hydrocarbures aromatiques polycycliques. Dans les cellules pulmonaires et sanguines de ces individus, ces composés forment des complexes avec l'ADN et l'endommagent. L'image de synthèse de gauche représente un tel complexe entre un hydrocarbure (en rouge) et l'ADN (en vert). Des complexes ont été mis en évidence dans des globules blancs d'une personne exposée : ils apparaissent en vert fluorescent sur la photographie ci-contre.



de l'organisme contre ce type d'agents. Or on sait aujourd'hui que les réactions diffèrent notablement selon les individus.

Au début des années 1980, nous avons établi les grandes lignes d'un programme de recherches en épidémiologie moléculaire sur le cancer après avoir découvert un marqueur moléculaire de l'action d'un agent cancérogène sur l'ADN. Pour trouver des biomarqueurs, nous nous proposons de chercher, dans des échantillons de tissus humains, des marqueurs biologiques qui témoignent d'une exposition à un agent cancérogène, d'une atteinte tissulaire qui déclenche un cancer ou d'une vulnérabilité particulière aux agents cancérogènes. On sélectionne les marqueurs indiquant qu'une personne présente un risque élevé de cancer bien avant que le moindre signe clinique n'apparaisse. On évalue alors les marqueurs validés (ceux qui ont été retenus après plusieurs tests) sur des groupes de patients, afin d'aider les cliniciens à décider de la conduite thérapeutique à tenir.

Examinons cette méthodologie dans le cas du marqueur de cancer pulmonaire que nous avons découvert. En 1982, nous avons remarqué que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, des agents cancérogènes bien connus, laissent une « empreinte » spécifique dans les cellules des poumons ou du sang. Ces hydrocarbures font partie des quelque 400 composés dont on a montré qu'ils sont cancérogènes

pour l'homme et pour l'animal ; ce sont des produits de combustion présents dans la fumée de cigarette, dans l'air pollué et dans les aliments cuits au barbecue, grillés ou fumés. L'empreinte que nous avons détectée était un complexe entre l'hydrocarbure et une molécule biologique, généralement l'ADN ou une protéine.

Intrigués par la présence de tels complexes dans le sang, nous avons cherché si ces empreintes étaient des marqueurs précoces d'un risque accru de cancer du poumon. Une longue collaboration avec Kari Hemminki, à Stockholm, nous a montré que les personnes exposées à des concentrations élevées en hydrocarbures aromatiques polycycliques, présents dans la fumée de cigarette, dans l'air pollué ou sur certains sites de travail, ont des concentrations sanguines en complexes hydrocarbures-ADN plus élevées que celles des personnes moins exposées.

Nos résultats ne prouvaient pas que les complexes hydrocarbures-ADN signalent un risque supérieur de cancer du poumon, mais les études ultérieures ont conforté notre hypothèse. Notamment, on a observé que les personnes dont les concentrations sanguines en complexes hydrocarbures-ADN étaient élevées avaient aussi plus de mutations génétiques et de modifications chromosomiques que la moyenne dans leurs cellules sanguines. Comme de telles anomalies sont fréquentes dans les cellules malignes, l'abondance de

complexes indiquerait que le risque de cancer est accru.

Ultérieurement, on a découvert que des échantillons sanguins de personnes atteintes de cancer du poumon contenaient plus de complexes hydrocarbures-ADN que des échantillons prélevés chez des personnes saines exposées à des doses identiques d'agents cancérogènes pulmonaires. Aujourd'hui nous analysons des échantillons sanguins prélevés sur des volontaires qui participent à une étude de longue durée, destinée à vérifier si les complexes hydrocarbures-ADN permettent de prévoir un cancer pulmonaire plusieurs années avant que les signes cliniques n'apparaissent.

Marqueurs d'exposition et de lésions

D'autres biomarqueurs semblent pouvoir révéler la probable survenue de cancers du foie et de la vessie. Ainsi l'aflatoxine B1, abondante dans les cacahuètes et dans le maïs moisis, joue probablement un rôle dans le cancer du foie. Diverses études d'épidémiologie moléculaire ont montré que cet agent cancérogène forme également des complexes avec l'ADN. De plus, une étude menée sur un groupe de Chinois dont l'urine contenait des complexes aflatoxine B1-ADN et des dérivés

de l'aflatoxine a montré qu'ils ont eu deux à trois fois plus de cancers du foie que ceux dont l'urine ne contenait pas de tels composés. Les sujets infectés par le virus de l'hépatite B, un autre agent cancérogène, avaient 60 fois plus de risques d'avoir un cancer.

Comme les complexes, les mutations génétiques représentent des biomarqueurs de l'apparition d'une tumeur ; toutefois, elles correspondent à des événements plus tardifs dans la longue évolution qui conduit au cancer. Quand on retrouve une anomalie génétique dans de nombreux types de cancers, on n'en tire aucune information sur l'agent causal. Au contraire, le type de la mutation peut être révélateur : c'est par exemple le cas pour le gène *p53*, muté dans plusieurs sortes de cancer. Normalement, *p53* est un gène suppresseur de tumeur, qui bloque le développement et la division des cellules contenant des gènes endommagés. Lorsque le gène *p53* subit lui-même une mutation, rien n'empêche plus les cellules de transmettre à leur descendance des modifications génétiques susceptibles d'être cancérogènes.

D'après Curtis Harris et ses collègues de l'Institut américain de cancérologie, certains types de mutations de *p53* révèlent une exposition préalable à des substances particulières : ainsi, les cellules de tumeurs pulmonaires de fumeurs portent généralement, sur le gène *p53*, plusieurs mutations typiques d'une exposition à des hydrocarbures polycycliques et à des agents oxydants. Au contraire, les cellules de tumeurs pulmonaires des mineurs exposés au radon dans les mines d'uranium portent une mutation particulière et unique du gène *p53*. Enfin, dans les régions où les cancers du foie dus à l'aflatoxine B1 et au virus de l'hépatite B sont nombreux, les mutations du gène *p53* dans les cellules tumorales sont également localisées en un site précis du gène, différent de celui qui est modifié chez les mineurs. On observe d'autres mutations sur le gène *p53* dans des tumeurs du foie rares, l'angiosarcome, dû à une exposition accidentelle au chlorure de vinyle, dans certains cancers du côlon probablement dus à des agents cancérogènes présents dans la nourriture, et dans des tumeurs de la peau résultant d'une exposition au rayonnement ultraviolet.

Ayant déterminé les mutations de l'ADN ou la présence de complexes entre agents cancérogènes et ADN, on ne parvient pas toujours à détermi-

ner l'agent responsable des modifications précancéreuses, mais, en combinant ces résultats avec d'autres données, on identifie parfois les agents cancérogènes. L'exposition à ces agents doit alors impérativement être réduite. Ces études sont complétées par des

recherches sur la variabilité des défenses naturelles face au cancer ; après une exposition à une même dose de substance cancérogène, certaines personnes ont un cancer, tandis que d'autres échappent à la maladie. C'est pourquoi les épidémiologistes recherchent à la

Les biomarqueurs à l'étude

Tissu ou liquide
biologique analysé

Ce que les
marqueurs indiquent

Marqueurs de l'exposition ou des lésions

Complexe entre l'aflatoxine B1 et l'ADN	Urine, foie	Lésion génétique par l'aflatoxine dans les cacahuètes ou le maïs moisis ; risque accru de cancer du foie
Complexe entre les hydrocarbures aromatiques polycycliques et l'ADN	Sang, poumons, placenta	Lésion génétique par les hydrocarbures aromatiques polycycliques présents dans l'air pollué, sur certains lieux de travail ou dans la fumée de cigarette ; en cours d'évaluation comme marqueur de risque du cancer pulmonaire
Complexe entre le 4-aminodiphényle et l'hémoglobine	Sang	Exposition active ou passive à la fumée de cigarette ; en cours d'évaluation comme marqueur de risque du cancer de la vessie
Thymine glycol (oxydation d'une base de l'ADN)	Urine	Lésion génétique par des agents oxydants ; en cours d'évaluation comme marqueur du risque de divers cancers
Mutation dans le gène <i>p53</i> suppresseur de tumeur	Sein, foie, poumons, notamment	Risque accru de divers cancers ; la nature de la mutation incriminée indique parfois l'agent cancérogène responsable

Marqueurs d'une susceptibilité innée au cancer

Certaines variations (assez courantes) du gène <i>cytochrome p4501A1</i> ou de son activité	Sang	En cours d'évaluation comme marqueur de risque du cancer pulmonaire
Absence du gène <i>glutathionine-S-trasferase M1</i> (absence très fréquente : presque chez un Blanc sur deux et chez 35 pour cent des Américains noirs)	Sang	Augmentation du risque de cancer pulmonaire et de cancer de la vessie
Absence du gène <i>H-ras-Vtr</i> , variant du gène <i>H-ras</i>	Sang	Augmentation du risque de cancer du sein et d'autres cancers
Mutation dans le gène <i>BRCA1</i> (mutation rare : observée dans moins de un pour cent de la population)	Sang	Risque très élevé de cancer du sein ou de l'ovaire

Marqueurs d'une susceptibilité acquise au cancer

Faibles concentrations sanguines en antioxydants ou en vitamines	Sang	En cours d'évaluation comme marqueur de risque du cancer du poumon, de l'œsophage, du sein et du cerveau, notamment
Immunodéficience	Sang	Risque accru de divers cancers

fois des biomarqueurs d'une exposition à des agents cancérogènes, mais aussi des biomarqueurs d'une susceptibilité, innée ou acquise, au cancer.

Quelques mutations génétiques héréditaires rares augmentent le risque de cancer. Tous les enfants reçoivent deux versions, ou allèles, d'un même gène, une provenant de chacun des deux parents. Parfois, un enfant naît avec un allèle défectueux d'un gène suppresseur de tumeur, tel le gène *retinoblastoma*, et il arrive que l'allèle normal subisse ultérieurement une mutation. Un tel concours de circonstances suffit à éliminer les freins de la croissance cellulaire : un cancer nommé rétinoblastome apparaît chez l'enfant, qui devient aveugle. De même, les femmes qui héritent d'un gène du cancer du sein muté (*BRCA1*) ont plus de 80 pour cent de risques d'avoir un cancer du sein au cours de leur vie. Pourtant, les cancers héréditaires du sein ne représentent que cinq pour cent environ de tous les cancers de ce type.

Des biomarqueurs de la susceptibilité

Souvent, les facteurs héréditaires de prédisposition au cancer agissent de façon indirecte, généralement en modulant les réactions individuelles aux agents cancérogènes (ils peuvent même n'avoir aucun effet quand l'exposition aux agents cancérogènes est brève). Chez les personnes sensibles, des substances cancérogènes quasi inoffensives risquent de provoquer rapidement un cancer, soit parce que l'organisme est incapable d'éliminer l'agent cancérogène, soit parce qu'il ne parvient pas à réparer les lésions ; les complexes entre l'agent nocif et l'ADN se multiplient, de même que les mutations, ce qui favorise le développement d'un cancer. Les réactions individuelles aux agents cancérogènes diffèrent, car notre patrimoine génétique contient de multiples formes des gènes qui commandent ces réactions ; toutes ne sont pas aussi efficaces.

La susceptibilité au cancer semble liée à l'expression des gènes qui codent une famille d'enzymes, les cytochromes p450. Les molécules de cytochromes p450 inactivent généralement nombre de substances chimiques produites par l'organisme ou présentes dans l'environnement. Malheureusement, elles produisent parfois, au cours de ces mécanismes d'inactivation, des produits intermédiaires qui risquent de léser

l'ADN et certains constituants cellulaires. Ces intermédiaires « activés » sont cancérogènes, tandis que les produits dont ils sont issus ne l'auraient pas été s'ils n'avaient pas été transformés.

Une de ces enzymes cytochromes p450, la CYP1A1, agit sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques. De nombreux fumeurs qui ont certaines formes du gène *CYP1A1* ont plus de risques de mourir d'un cancer pulmonaire que la moyenne de la population : certaines versions du gène *CYP1A1* favoriseraient l'activation des hydrocarbures aromatiques polycycliques par les protéines CYP1A1. De petites différences entre les gènes codant d'autres enzymes cytochromes p450 modulent le pouvoir cancérogène de diverses substances, tels l'aflatoxine, le benzène ou le tétrachlorure de carbone. Ces différences pourraient aussi servir de marqueurs de susceptibilité au cancer.

D'autres classes d'enzymes de détoxification sont plus efficaces que

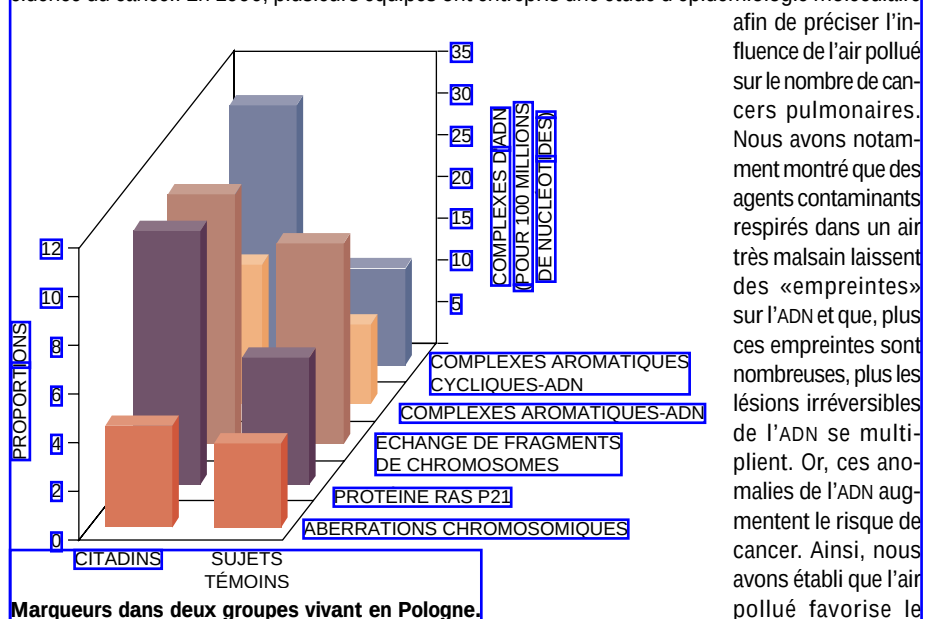
les cytochromes p450. Ainsi, parmi les glutathion-S-tranférases, les GSTM1 neutralisent efficacement les hydrocarbures aromatiques polycycliques, l'oxyde d'éthylène et le styrène, tous présents dans la fumée de cigarette, sur certains lieux de travail et dans l'air des villes. La moitié environ des Blancs sont dépourvus du gène codant les GSTM1, ce qui expliquerait un risque supérieur de cancer de la vessie et du poumon parmi ces personnes : l'absence de ce gène représenterait un biomarqueur de susceptibilité innée.

Une autre enzyme, NAT2 (la N-acétyl-transférase), désactive les amines aromatiques cancérogènes qui sont présentes dans l'air pollué, la fumée de cigarette et certains aliments cuits. Une forme lente de l'enzyme NAT2 semble participer au développement des cancers de la vessie : les personnes atteintes ont, plus souvent que les autres, le gène codant une forme de l'enzyme qui agit lentement, ainsi que des concen-

Anatomie d'une étude d'épidémiologie moléculaire

Depuis longtemps, on soupçonne les agents cancérogènes présents dans l'air de contribuer à l'augmentation des cancers pulmonaires dans les régions très industrialisées. Ce soupçon s'est précisé quand on a constaté que certains produits de combustion présents dans l'air pollué – notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques – peuvent déclencher des cancers pulmonaires chez des animaux de laboratoire et chez des personnes exposées à des doses élevées de ces substances sur leur lieu de travail.

Toutefois, la relation entre la pollution de l'air et le nombre de cancers dans la population générale a été difficile à établir, parce que les personnes qui vivent dans un environnement pollué, en général urbain, ont un mode de vie différent de celui des personnes qui habitent en zone rurale. Il n'a pas été aisé de montrer que la différence des modes de vie avait peu de conséquences sur l'incidence du cancer. En 1990, plusieurs équipes ont entrepris une étude d'épidémiologie moléculaire



afin de préciser l'influence de l'air pollué sur le nombre de cancers pulmonaires. Nous avons notamment montré que des agents contaminants respirés dans un air très malsain laissent des « empreintes » sur l'ADN et que, plus ces empreintes sont nombreuses, plus les lésions irréversibles de l'ADN se multiplient. Or, ces anomalies de l'ADN augmentent le risque de cancer. Ainsi, nous avons établi que l'air pollué favorise le

trations sanguines élevées en protéines liées aux amines aromatiques.

En plus des indices génétiques de vulnérabilité, on cherche aussi des marqueurs d'une susceptibilité acquise aux agents cancérigènes. Le risque de cancer augmente quand le système immunitaire est affaibli, quand l'équilibre hormonal est perturbé ou quand l'organisme a été atteint par une hépatite ou par une maladie pulmonaire chronique. Une alimentation pauvre en fruits et en légumes, qui contiennent des antioxydants et des vitamines A, C et E, augmente la probabilité d'une atteinte cancéreuse du poumon, de l'œsophage, de la gorge, du larynx, du cerveau ou du sein. Les antioxydants empêchent notamment les radicaux oxygène libres et les hydrocarbures aromatiques polycycliques d'endommager l'ADN.

En étudiant, dans la population générale, les variations de la susceptibilité innée ou acquise face au cancer, les épidémiologistes sauront mieux esti-

mer les risques. Toutefois, si les prévisions pour la population générale seront améliorées, l'évaluation du risque individuel restera partielle, voire fautive, car l'action de n'importe quel gène peut être modulée par celle d'autres gènes, par des facteurs de l'environnement, par l'état de santé de la personne, par son alimentation et par ses caractéristiques biologiques. De surcroît, certains gènes protègent parfois contre un type de cancer, tout en prédisposant à un autre : la protéine NAT2, par exemple, détoxifie les agents cancérigènes pour la vessie, mais active ceux qui atteignent le côlon. En combinant les caractéristiques individuelles avec les critères biologiques d'exposition et d'atteinte précoce, on estimera les risques de façon plus pertinente.

Les épidémiologistes moléculaires ne savent pas encore prévoir avec précision les risques de cancer pour une personne particulière, mais ils savent évaluer les risques en fonction

de la race et de l'âge. Les épidémiologistes ont, par exemple, montré que le nombre de cancers et de décès par cancer est souvent plus élevé pour les Américains de race noire que pour ceux de race blanche. Aux États-Unis, une forme de cancer de l'œsophage, le cancer des cellules squameuses, est trois fois plus fréquent chez les Noirs que chez les Blancs ; la fréquence du cancer du poumon est environ 50 pour cent supérieure chez les hommes noirs ; les femmes noires de moins de 40 ans ont davantage de cancers du sein que les femmes blanches du même âge, mais c'est l'inverse au-delà de 40 ans.

Populations à risques

Diverses études épidémiologiques ont montré que l'augmentation du risque, chez les Noirs ou dans diverses minorités, résulterait d'une exposition supérieure aux agents cancérigènes. Aux États-Unis, les Noirs ou ceux qui ont des conditions de vie difficiles sont davantage exposés à certaines substances toxiques de l'environnement, notamment le plomb, les polluants atmosphériques et les déchets contaminés. De plus, ces personnes ont souvent une alimentation pauvre en vitamines et en éléments nutritifs protecteurs.

Les effets de l'environnement et de l'alimentation sont probablement renforcés par des différences innées dans le métabolisme des agents cancérigènes. Ainsi, on a montré que le variant CYP1A1, qui active les agents cancérigènes et qui existe uniquement chez les Noirs américains, est associé à un risque majoré d'une forme de cancer pulmonaire, l'adénocarcinome : les fumeurs noirs qui ont ce variant génique ont deux à trois fois plus de cancers que les fumeurs noirs qui en sont dépourvus. Les lésions de l'ADN provoquées par les hydrocarbures aromatiques polycycliques semblent également plus importantes chez les Américains d'origine africaine que chez les Américains d'origine mexicaine. Un autre variant génique, celui du gène *H-ras*, est plus fréquent chez les Noirs que chez les Blancs : il est associé à un risque supérieur de leucémie et de cancers du poumon, du sein, du colon et de la vessie.

Quand on considère les groupes ethniques ou raciaux dans leur ensemble, aucun ne semble plus sensible au cancer qu'un autre ; pourtant, la proportion des divers types de cancers change selon les populations, sans doute parce que la

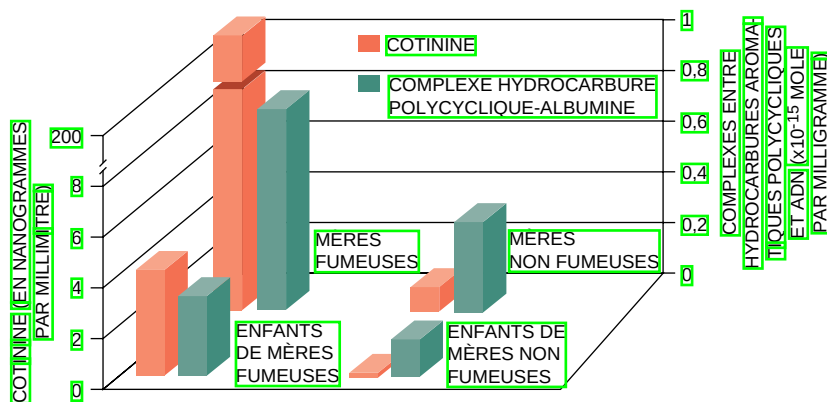
déclenchement de cancers pulmonaires. Pour cette étude, nous avons suivi deux populations. Certaines personnes habitaient Gliwice, en Silésie, l'une des régions les plus polluées du monde, où la mortalité par cancer est élevée. Les autres habitaient Biala Podlaska, une province rurale du Nord-Est de la Pologne, où l'air est beaucoup plus propre et où l'incidence du cancer est inférieure.

Nous avons mesuré les concentrations sanguines en biomarqueurs qui indiquent une exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques ou à d'autres composés aromatiques. Nous avons aussi recherché les modifications cellulaires plus spécifiques des risques de cancer. Les marqueurs d'exposition, qui indiquent aussi la dose d'agent cancérigène biologiquement active, sont des complexes entre des hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou d'autres composés aromatiques) et l'ADN. On observait également d'autres marqueurs : les aberrations chromosomiques, des échanges de fragments entre chromosomes et une production excessive de la protéine ras p21, codée par le gène *H-ras*.

D'après les résultats obtenus (voir le graphique de gauche), on trouve, chez les habitants de Gliwice, plus de complexes hydrocarbures aromatiques-ADN, plus d'aberrations chromosomiques, plus d'échanges de fragments chromosomiques et une plus forte activité du gène *ras*. Autrement dit, les agents cancérigènes présents dans un air pollué favoriseraient les cancers pulmonaires. On décèle leurs effets par la présence de complexes ADN-hydrocarbures aromatiques polycycliques. Depuis, d'autres études ont confirmé qu'une concentration élevée en complexes ADN-hydrocarbures aromatiques polycycliques représente un risque accru de cancer pulmonaire.



Une rue dans une ville de Silésie, une région très polluée de la Pologne.



3. LE TABAGISME PASSIF augmenterait le risque que les jeunes enfants aient, un jour, un cancer pulmonaire. L'auteur et ses collègues ont montré que les concentrations en cotinine (un dérivé de la nicotine, qui est un marqueur de l'inhalation de fumée) et en complexes hydrocarbures aromatiques polycycliques-albumine (un marqueur indirect

des lésions de l'ADN) étaient plus élevées chez les mères fumeuses que chez les mères non fumeuses, mais aussi chez les enfants des mères fumeuses (*histogramme de droite*). Ces femmes fumaient moins d'un paquet de cigarettes par jour, ce qui prouve que la fumée de cigarette – même en faible quantité – est une menace pour les enfants.

fréquence des caractères génétiques qui favorisent un type particulier de cancer varie d'une population à l'autre.

De surcroît, l'âge d'une personne au moment de son exposition à un agent cancérigène est essentiel : le risque est supérieur pour les fœtus, les bébés et les enfants exposés aux agents cancérigènes de l'environnement. Toutes les études réalisées sur la pollution atmosphérique, la fumée de cigarette, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les pesticides, les nitrosamines, l'aflatoxine B1 et les rayonnements montrent que le risque de cancer augmente quand l'exposition aux agents cancérigènes commence au stade utérin ou pendant l'enfance. C'est sans doute parce que la période d'incubation est plus longue et que la multiplication cellulaire augmente : or, les cellules qui prolifèrent risquent plus de subir des dommages génétiques que les cellules au repos. Chez les jeunes enfants, les mécanismes d'inactivation des agents cancérigènes et de réparation des anomalies moléculaires sont moins efficaces que chez l'adulte. De plus, les enfants absorbent souvent des quantités d'agents cancérigènes plus importantes que les adultes, si l'on rapporte ces quantités à leur poids.

Ainsi, on estime que les bébés ingèrent 10 à 20 fois plus de dioxine en une journée que les adultes (par rapport à leur poids). Nous avons récemment montré que, chez des nouveau-nés d'une zone polluée de l'Europe de l'Est, la concentration sanguine en complexes ADN-hydrocarbures aromatiques polycycliques est supérieure à celle de leur mère, bien que le fœtus ne soit exposé qu'au dixième de la dose d'hydrocarbures aromatiques polycycliques absorbée par la mère. Nous avons également

montré que de jeunes enfants dont les mères fumaient une dizaine de cigarettes par jour avaient des concentrations sanguines en protéines complexes hydrocarbures aromatiques polycycliques supérieures à celles des enfants nés de mères non fumeuses.

Ces études sur le cancer ont mis en évidence deux points qui auront des conséquences notables en santé publique. Tout d'abord, la plupart des cancers sont partiellement dus à l'environnement ; pour s'en protéger, on devra modifier les comportements à risques et prendre des mesures visant à réduire les expositions involontaires aux substances cancérigènes présentes dans l'air, dans l'eau, dans la nourriture et sur les lieux de travail. On estime qu'en l'absence de facteurs cancérigènes dans l'environnement, l'incidence du cancer diminuerait de 80 à 90 pour cent.

D'autre part, les agents cancérigènes présents dans l'environnement sont plus nocifs pour certains individus que pour d'autres ; pour améliorer la prévention, on devra protéger ces sujets plus vulnérables par diverses mesures, telles que des campagnes d'information ou des lois.

Aujourd'hui, les pouvoirs publics ne prennent pas en considération la disparité des susceptibilités individuelles face aux agents cancérigènes. Pour déterminer les doses d'agents cancérigènes qui entraîneraient un nombre «inacceptable» de cancers, on utilise un facteur de risques global, en admettant que toutes les personnes réagissent de la même façon à ces agents. Cette hypothèse est fautive, et la méthode actuelle sous-estime les risques pour certains groupes de la société. Ainsi, les personnes qui ont des facteurs de susceptibilité pré-

sentent dix fois plus de risques d'avoir un cancer que la population supposée «standard» et homogène.

Pour éviter d'exposer excessivement les populations sensibles (certaines ethnies, les femmes, les enfants, les vieillards), on devrait les avertir et rechercher des normes environnementales et des programmes de santé publique qui ne fassent pas courir les plus grands risques aux personnes les plus sensibles de la population.

Le meilleur traitement du cancer est sa prévention. En évitant ne serait-ce que 20 cancers sur 100, plus de 50 000 vies seraient épargnées, chaque année, en France. Les spécialistes de l'épidémiologie moléculaire pourraient faciliter l'élaboration de mesures préventives, et insister sur la nécessaire protection des plus vulnérables.

Frederica PERERA est directeur adjoint du Centre de cancérologie presbytérien, à Columbia.

F.P. PERERA et I.B. WEINSTEIN, *Molecular Epidemiology and Carcinogen-DNA Adduct Detection : New Approaches to Studies of Human Cancer Causation*, in *Journal of Chronic Diseases*, vol. 35, pp. 581-600, 1982.

Molecular Epidemiology, sous la direction de P.A. Schulte et F.P. Perera, Academic Press, 1993.

C.C. HARRIS, p53 : *At the Crossroads of Molecular Carcinogenesis and Risk Assessment*, in *Science*, vol. 262, pp. 1980-1981, 24 décembre 1993.

J.D. GROOPMAN et al., *Molecular Biomarkers for Aflatoxins and Their Application to Human Cancer Prevention*, in *Cancer Research*, vol. 54, n° 75, pp. 1907S-1911S, 1^{er} avril 1994.

LA CONSULTATION A DISTANCE
Les serveurs de vidéoconférences permettent aux médecins de consulter des confrères, afin d'obtenir plus d'informations sur certains cas.



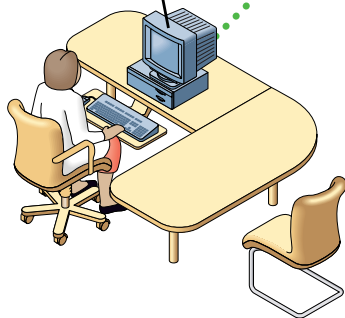
Programmes pour réseaux fiables

KENNETH BIRMAN • ROBERT VAN RENESSE

Les techniques qui permettent aux réseaux d'ordinateurs de se réorganiser peuvent rétablir le fonctionnement d'un réseau quand une partie de celui-ci tombe en panne.

LE MEDECIN

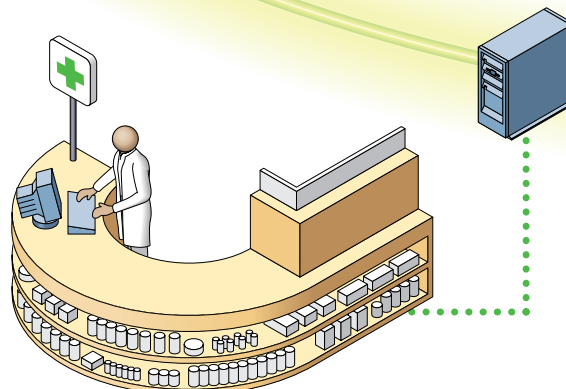
D'un cabinet privé, dans un autre immeuble que l'hôpital, un médecin peut surveiller des patients hospitalisés. Il accède ainsi aux rythmes respiratoire et cardiaque, aux résultats des analyses de laboratoire et aux dossiers médicaux mis à jour.



La navigation sur le réseau *Internet* n'est plus uniquement un passe-temps ludique : un nombre croissant d'entreprises utilisent des services en ligne analogues à ceux qui sont accessibles par le réseau *Internet*. Ces services facilitent la gestion d'informations importantes et accélèrent les prises de décision. Cependant, les entreprises qui se fondent sur ces systèmes se préoccupent des pannes éventuelles des réseaux. Les plus inquiets sont les utilisateurs des systèmes informatiques répartis, c'est-à-dire les systèmes qui relient des programmes, des serveurs et des

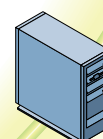
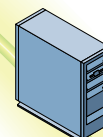
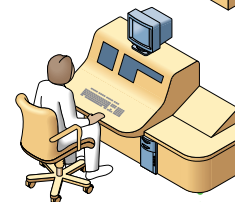
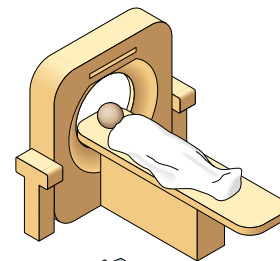
fichiers de données disséminés à travers un vaste réseau d'ordinateurs et de terminaux.

Tous ceux qui utilisent des réseaux savent, ô combien, que les programmes qui opèrent à travers les réseaux sont faillibles. Leslie Lamport, de la Société *Digital Equipment*, définit, avec humour, un système informatique réparti comme «un système où la défaillance d'un ordinateur dont vous ignoriez jusqu'à l'existence peut rendre votre propre ordinateur inutilisable». Cette «toile d'araignée mondiale» qu'est le *World Wide Web* (un réseau de serveurs qui couvre le monde) n'est évidem-



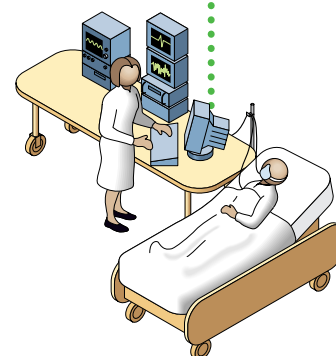
LA PHARMACIE
Le pharmacien hospitalier complète aussi le dossier médical des patients en notant quand les traitements prescrits ont été administrés. En enregistrant avec précision tous les médicaments que prend un malade, on évite les interactions médicamenteuses dangereuses.

AU LABORATOIRE
Pour s'assurer que médecins et infirmières ne prennent pas des décisions fondées sur des données périmées, les fichiers du serveur qui stocke les résultats d'analyses de laboratoire sont copiés sur plusieurs serveurs dans tout le système. Quand le serveur principal n'est plus accessible, les requêtes d'accès aux dossiers sont dirigées vers d'autres sites.



LE SUIVI DES PATIENTS

Le serveur de dossiers médicaux stocke les observations cliniques, les mesures physiologiques (tel leur rythme cardiaque et leur pression sanguine) et la liste des médicaments administrés. Ces informations doivent toujours être à la disposition des médecins et des infirmières ; le système garantit leur accessibilité en dupliquant les données et les programmes qui les gèrent.



ment pas à l'abri (voir l'encadré de la page 84) : en 1995, plusieurs coupures ont bloqué toutes les communications. On a attribué ces défaillances à des erreurs dans les programmes, à l'engorgement du trafic sur les lignes de transmission, à des surcharges des machines ou à des pannes des serveurs, c'est-à-dire les ordinateurs qui stockent les documents auxquels accèdent les utilisateurs ; une combinaison de ces facteurs a vraisemblablement contribué à ces coupures partielles. Sans aucun doute, les blocages se multiplieront à mesure que se développeront les réseaux informatiques, *Internet* lui-même ainsi que tous les autres réseaux informatiques desservant les banques, les universités ou les sociétés.

Une panne d'ordinateur n'a pas toujours de conséquences dramatiques : quand un distributeur de billets ne fonctionne pas, on traverse la rue et l'on s'approvisionne au distributeur voisin. En revanche, l'interruption du fonctionnement de réseaux complexes peut avoir des conséquences désastreuses. Le 15 juillet 1994, le NASDAQ (un marché boursier exclusivement électronique destiné aux entreprises de haute technologie) ouvrit avec deux heures de retard en raison d'un problème mystérieux qui avait bloqué le fonctionnement du système tout entier.

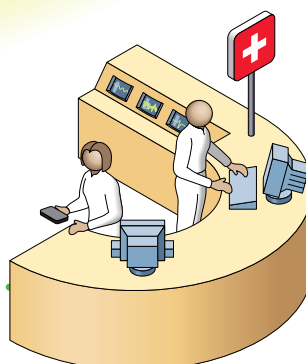
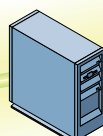
Initialement, les opérateurs du système pensèrent qu'une erreur de programme avait déclenché l'arrêt, mais ils identifièrent que celui-ci résultait du dysfonctionnement d'un disque dur. Comme le début des échanges n'avait été retardé que de quelques heures, peu d'argent fut perdu, mais le marché aurait dû faire face à d'énormes pertes si les échanges n'avaient repris si vite.

Dans un autre exemple datant de janvier 1990, le réseau téléphonique de la compagnie américaine AT&T a connu un dérangement de grande envergure lorsqu'un central électronique du système tomba en panne. Les appels furent automatiquement transférés à un central de secours, mais ce dernier tomba en panne à son tour en raison d'une erreur logicielle. La défaillance se propagea à travers tout le réseau et aboutit à une interruption des communications à l'échelle nationale : neuf heures durant, 60 000 personnes furent privées du téléphone. Pour tous ceux qui sont familiarisés avec la difficulté que représente la gestion d'un réseau même simple, l'étonnant n'est pas que ces incidents surviennent, mais plutôt qu'ils ne soient pas plus fréquents. La France n'a jamais connu de problèmes de ce genre grâce à une mise en place progressive du réseau et à des tests draconiens.

1. DANS LES HÔPITAUX, les réseaux relieront bientôt les patients au personnel médical de l'ensemble de l'hôpital ou de quelque lieu que ce soit dans le monde. Afin que des pannes informatiques ne mettent pas en danger les patients, les réseaux devront utiliser la technique de duplication active décrite dans cet article.

LE PERSONNEL SOIGNANT

Le personnel soignant met fréquemment à jour les dossiers des patients, entrant de nouvelles informations dans le système à partir d'un des terminaux de l'hôpital ou d'un bloc-notes électronique.

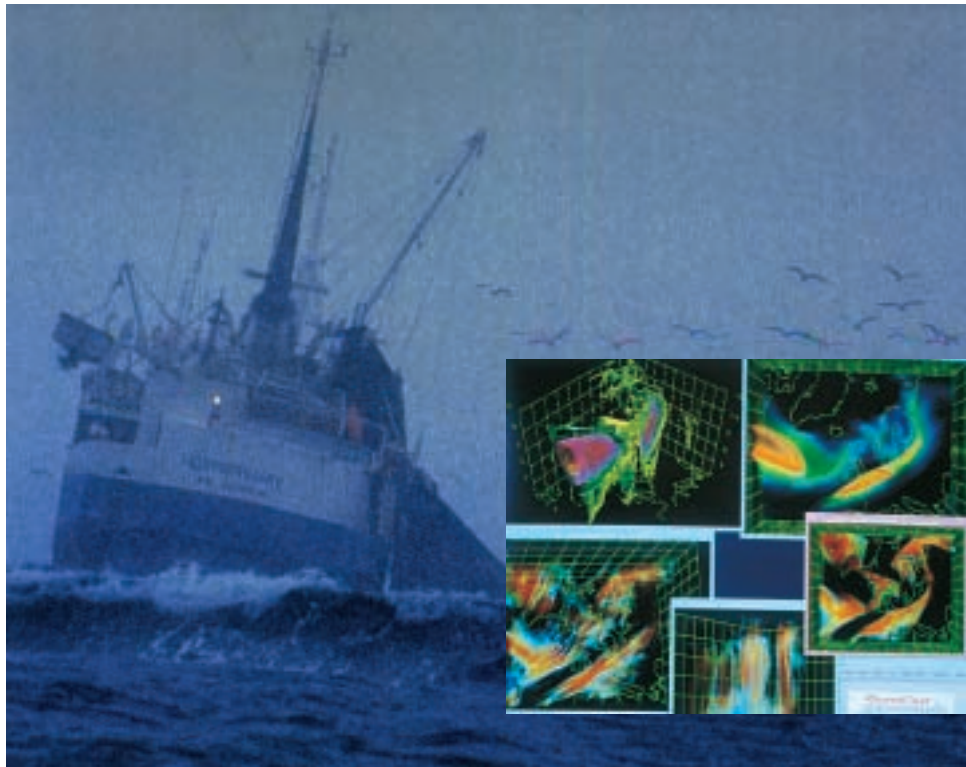


Des passerelles fiables

Même une brève défaillance des systèmes répartis est grave quand les programmes utilisés doivent fonctionner en permanence. Ainsi, les réseaux qui gèrent le trafic aérien ou les opérations bancaires doivent être extrêmement fiables et constamment remis à jour : un message tel que «l'ordinateur central ne répond pas» ou l'affichage d'informations périmées sur le trajet d'un avion en vol ou la cote de valeurs boursières risqueraient de provoquer des accidents ou des désastres financiers. Or les systèmes informatiques répartis se multiplient ; leur fiabilité devient vitale tant pour les entreprises que pour les particuliers. On vante aujourd'hui les avantages considérables des autoroutes de l'information, mais on n'obtiendra les avantages rêvés que si les liaisons entre les ordinateurs sont étudiées de près. Depuis la fin des années 1970, de nombreux informaticiens recherchent des programmes qui rendraient les réseaux plus sûrs et plus fiables, bref plus «robustes».

Pourquoi les réseaux tombent-ils en panne? Habituellement, un problème isolé en un site quelconque se propage dans le réseau, ce qui provoque l'interruption en chaîne des programmes, ordinateur après ordinateur. Il serait vain de renforcer les composants individuels, par exemple en introduisant des ordinateurs et des disques spécialement conçus pour tolérer les erreurs, car on ne parerait pas aux incidents imprévisibles tels qu'une fuite d'eau dans la salle informatique ou une panne de courant ; de surcroît, les communications peuvent être coupées par inadvertance ou par sabotage. Même si les ingénieurs et les programmeurs améliorent sans cesse les matériels et les logiciels, les ordinateurs ne sont jamais totalement fiables.

En outre, des ordinateurs fiables interconnectés et des programmes sans erreur ne conduisent pas nécessairement à des systèmes répartis robustes ; ils constituent seulement des réseaux qui fonctionnent correctement dans la plupart des conditions. Les programmes de gestion du courrier électronique, les tribunes de discussion et le Web ont été réalisés à partir de composants individuellement très fiables. Néanmoins, ces systèmes se bloquent fréquemment lorsqu'un événement inattendu survient dans l'un des composants du système. Le système tombe



2. UN RESEAU DE SURVEILLANCE METEOROLOGIQUE alerte les pêcheurs norvégiens en cas de tempêtes dangereuses (à gauche) ou de marée noire (à droite). Le système informatique StormCast relie des caméras éloignées, des stations météorologiques et des

en panne lorsqu'une machine ou une ligne de transmission est surchargée. D'autres formes de protection sont donc nécessaires.

Depuis 20 ans, les programmeurs fiabilisent les réseaux en mettant au point des logiciels qui tolèrent les erreurs : ces programmes permettent aux systèmes informatiques de quitter une tâche quand un blocage survient. Plus généralement, on cherche à éliminer les chaînes de dépendance internes qui subordonnent le fonctionnement d'un système réparti au fonctionnement de tous ses composants. Les systèmes qui en résultent continuent à fonctionner même lorsque certains sites sont déconnectés : le système change sa configuration de manière à contourner les serveurs indisponibles.

Sauvés par les sauvegardes

Les systèmes qui possèdent cette aptitude sont des systèmes répartis à haute disponibilité. En dupliquant en permanence les informations critiques et en distribuant les multiples copies de sauvegarde à leurs ordinateurs individuels, ces systèmes s'adaptent à des aléas de fonctionnement tels qu'un

lecteur de disque défectueux en un site, une surcharge dans un autre, une connexion coupée, etc. Tant que les défaillances surviennent à un rythme qui laisse aux programmes le temps de s'adapter, ces systèmes peuvent répondre aux requêtes en extrayant d'un site opérationnel une copie du fichier vital ou la copie d'un programme utilisé en ligne. Le système tout entier reste ainsi opérationnel et, dans l'idéal, fournit un service ininterrompu aux utilisateurs connectés.

On obtient, de manière simple, un système réparti à haute disponibilité en associant une machine principale et une machine de secours. Lorsque la machine principale tombe en panne, la machine de secours prend la relève. La commutation d'un système à l'autre est facile lorsque les données ne changent jamais. En revanche, la commutation est difficile lorsque les données ou les fichiers changent alors que le système fonctionne. De plus, dans les grands réseaux, on distingue difficilement les systèmes en panne des systèmes qui n'ont que des difficultés avec les transmissions.

Supposons que, lors de la mise à jour des informations du serveur principal et du serveur de secours, l'un des deux ne réponde plus. Si le problème



satellites pour fournir des données mises à jour. On accède à StormCast par le World Wide Web (la «toile d'araignée mondiale» véhiculée par le réseau Internet) à l'adresse <http://www.cs.uit.no/>

ne provient que des lignes de communication, la mise à jour finira par se faire. En revanche, si le serveur qui ne répond plus est hors service, l'ordinateur qui fait la mise à jour attendra indéfiniment ; pendant ce temps, le système sera indisponible. Si l'on se contente d'ordonner à l'ordinateur de cesser l'attente et de ne mettre à jour que le serveur qui fonctionne, le système principal et celui de secours ne seront plus identiques : des erreurs surviendront si le système tente d'utiliser le serveur périmé.

Le marché financier NASDAQ résout ce problème grâce à deux serveurs centraux d'échanges boursiers. Pour éviter toute confusion, un seul des deux serveurs est actif à un instant donné. Les administrateurs du NASDAQ décident eux-mêmes quand basculer sur le serveur de remplacement. Malheureusement, très peu de systèmes distribués peuvent compter sur la sagesse d'un opérateur humain pour détecter les pannes et décider le changement d'un serveur ; les programmeurs doivent généralement automatiser cette décision, afin que la transition survienne sans heurts.

En outre, les systèmes répartis à haute disponibilité gèrent souvent un grand nombre de serveurs et de pro-

grammes. Pour ce faire, les systèmes tiennent à jour la liste de leurs membres et gardent ainsi la trace de chaque programme et de son état d'activité. Un programme qui, pour quelque raison que ce soit, ne répond pas est jugé défectueux. En reconnaissant une défaillance en un site, le système change alors sa configuration et redistribue le travail vers les sites opérationnels.

Le système NASDAQ illustre également un second problème de fiabilité des systèmes distribués. Le retard de deux heures dans le début des échanges financiers, en 1994, aurait été évité si les opérateurs avaient immédiatement enclenché le système de secours. Ils choisirent pourtant d'attendre, car ils craignaient qu'une erreur logicielle n'ait causé le mauvais fonctionnement du système principal. Dans ce cas, la panne se serait produite également sur le système de secours, comme ce fut le cas en 1994 pour la panne du système de la compagnie de téléphone AT&T, mentionnée auparavant. Comme il est impossible de garantir qu'un logiciel soit exempt d'erreurs, on doit trouver des moyens de réduire le risque que les versions de secours d'un serveur critique ne tombent en panne à leur tour après la défaillance du serveur principal.

À cette fin, les programmeurs ont inventé la duplication active : un programme fait des copies de secours des programmes et des fichiers vitaux en utilisant des «groupes de processus». Un groupe de processus est un ensemble de programmes qui coopèrent. Un système réparti peut comporter plusieurs groupes de processus, et les programmes peuvent appartenir à plusieurs de ces groupes. Chaque groupe est identifié par un nom semblable à un nom de fichier et possède sa propre liste actualisée de participants (l'ensemble des programmes qui coopèrent). En outre, le groupe de processus permet d'envoyer des messages à ses membres. Cette fonction de transmission des messages garantit que chaque membre du groupe reçoit chaque message dans le même ordre, même si l'émetteur tombe en panne pendant la transmission, ce qui est vital pour de nombreuses applications.

Lorsqu'un programme particulier est vital pour maintenir la disponibilité du système, ce dernier crée un groupe de programmes qui sont, chacun, une copie de l'original. Pour garder à jour les données manipulées par le programme dupliqué, le système envoie un message au groupe de programme. Chaque membre réagit en mettant à jour sa copie du programme. Comme tous les programmes «voient» les mêmes mises à jour dans le même ordre, ils restent dans des états cohérents.

La duplication active permet à un système de tolérer les erreurs, car n'importe quel membre du groupe peut traiter n'importe quelle requête : quand une machine tombe en panne, la tâche est confiée à un site opérationnel. En outre, quand une requête ne modifie pas les données, elle est satisfaite par un site unique au lieu de mettre tout le système à contribution. De cette façon, de multiples tâches sont menées en même temps par différents programmes, ce qui accélère l'application en utilisant le traitement parallèle.

Naturellement, si tous les membres d'un groupe de processus traitaient de manière erronée un message, ils tomberaient tous en panne simultanément. Toutefois, les erreurs de ce genre sont exceptionnelles, car les programmeurs ont observé que les erreurs qui passent le plus facilement inaperçues lors des tests du logiciel sont plutôt celles où intervient l'ordre de réception des données. Ces erreurs sont provoquées uni-

quement par des séquences d'événements improbables. Lorsqu'un système utilise la duplication active, les différentes copies voient les mêmes mises à jour dans le même ordre ; toutefois, les mises à jour sont seulement une petite partie des requêtes reçues par un programme. La plupart du temps, les programmes dupliqués travaillent en parallèle, chaque programme traitant son propre ensemble de requêtes dans un ordre spécifique. Dès lors, même si une erreur logicielle échappait aux tests et interférerait avec un

membre d'un logiciel réparti, il serait improbable qu'elle mette hors service tous les membres d'un groupe de traitement en même temps.

L'idée de la duplication active est simple, mais sa mise en œuvre est difficile. La gestion dynamique des listes de participants, qui changent continuellement, et les communications avec les groupes de processus sont sujettes aux erreurs systèmes et à la perte de messages. Bien que l'informatique répartie se soit imposée au cours de la dernière décennie, la dupli-

cation active n'est sortie que récemment des laboratoires de recherche.

La boîte à outils des réseaux robustes

Durant ces dernières années, plus d'une dizaine d'équipes d'ingénieurs ont mis au point des logiciels qui assurent la robustesse des systèmes répartis. Tous offrent une haute disponibilité grâce à la duplication active, mais ils diffèrent sur leurs priorités : les uns privilégient la rapidité ; d'autres, la sécurité.

À l'Université Cornell, nous avons réalisé deux logiciels. L'un d'entre nous (K. Birman) a dirigé l'équipe qui a produit le logiciel *Isis* en 1987 ; puis, ensemble, nous avons construit le logiciel *Horus*, achevé en 1994. Les noms de ces programmes indiquent leurs propriétés : la déesse égyptienne Isis ressuscita le dieu Osiris après qu'il avait été tué, lors d'un duel, par Seth, dieu de la guerre ; Horus, fils d'Isis, vainquit finalement Seth. De même, les logiciels *Isis* et *Horus* établissent le fonctionnement d'un système distribué interrompu par une défaillance.

Des logiciels comme *Isis* utilisent un assortiment de fonctions logicielles, ou «outils», qui dupliquent et mettent à jour les données, gardent la trace des groupes de processus et aident à gérer l'appartenance de ces groupes. *Isis* peut aussi répartir le traitement des données entre les serveurs (une procédure nommée partage des tâches). Les systèmes répartis qui utilisent le partage des tâches présentent la plupart des avantages du parallélisme sans recourir à des ordinateurs parallèles spécialisés. En divisant le travail entre de nombreux serveurs fonctionnant de concert, *Isis* permet aux systèmes d'effectuer rapidement de lourdes tâches. De même, lorsqu'une application particulière nécessite davantage de puissance de calcul, on peut ajouter un serveur, en conservant la technique de partage des tâches pour le nouveau groupe. Les performances d'*Isis* et d'*Horus* surprennent souvent les programmeurs, qui considèrent qu'un système robuste est nécessairement lent et onéreux.

La duplication active a été utilisée pour de nombreuses applications : télécommunications, marchés financiers, banques... En Norvège, des informaticiens ont mis au point un système de surveillance de l'environnement

Le Web s'emmêle

La majeure partie du *World Wide Web* est invisible. De nombreux utilisateurs ne voient qu'un programme de navigation et des serveurs distants, où les documents à charger sont stockés. Cependant, les sites du réseau et le réseau lui-même, qui relie ces sites, est composé de millions



Netscape n'arrive pas à localiser le serveur :
www.sciam.com
Le serveur n'a pas d'adresse DNS.
Vérifiez le nom du serveur et réessayez.

OK

signale qu'un serveur est bloqué ou occupé (ci-dessous) peut-il être trompeur : la surcharge ou la panne d'un nombre quelconque de programmes intermédiaires peut aussi conduire à ce message.

Le réseau *Internet* dans sa globalité peut connaître des pannes partielles assez semblables à celles des réseaux téléphonique et électrique. Ainsi, fin 1995, l'un des principaux serveurs de temps du réseau *Internet*, à Atlanta, fut surchargé de façon intermittente. Pendant ce temps, personne sur le *Web* ne pouvait obtenir de documents de serveurs dont

d'autres programmes et de serveurs ; des dizaines d'entre eux coopèrent pour fournir un seul document. Par exemple, quand on cherche une information dans un serveur du centre de coordination européen du réseau à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique, le nom «www.inria.fr» doit être converti en une adresse numérique que les logiciels reconnaissent. Cette tâche est effectuée par une série de programmes de conversion d'adresses avant que l'adresse correcte soit localisée. En outre, toute requête d'accès à un site du réseau passe normalement par un certain nombre de relais, qui sauvegardent une copie des documents fréquemment demandés, afin de diminuer la charge de travail des serveurs *Web* distants. Ainsi, quand un intermédiaire proche a stocké une copie du document recherché, l'utilisateur évite un long transfert de fichier à travers le réseau.

Ce système de relais est classique dans les réseaux, mais c'est une source de défaillances : quand un serveur de nom ne répond pas, ou quand un relais échoue, ou quand le serveur *Web* tombe en panne, la requête initiale n'aboutit pas. Aussi l'incircournable message d'erreur du *Web* qui

l'adresse n'était pas déjà connue du système local. Ce type de pannes gêne un grand nombre de personnes dans le monde entier. Même si une connexion avec un serveur réussit, cela n'exclut pas des erreurs ultérieures. Les copies faites par les programmes intermédiaires du *Web* ne sont pas actualisées lorsque le document original l'est. Aussi les utilisateurs n'ont-ils aucune garantie que la version qu'ils consultent est la dernière mise à jour. Si les documents nécessaires ne sont pas gardés à jour, certaines applications dépendantes du temps perdent alors leur fiabilité. D'un côté, les programmes mandataires du *Web* améliorent la fiabilité du réseau *Internet* en diminuant sa charge de travail, mais, de l'autre, ils diminuent la fiabilité en créant l'éventualité de l'obtention d'informations périmées.

Les projets vitaux, sur le réseau *Internet* ou sur d'autres systèmes informatiques répartis, requerront la garantie que les informations extraites du système soient précises, mises à jour et toujours disponibles. On peut éviter des problèmes en sauvegardant les informations vitales par le biais de la duplication active décrite dans l'article.

fondé sur cette technique (voir la figure 2). L'organisme français de contrôle du trafic aérien expérimente également cette technique pour l'appliquer à une nouvelle génération de logiciels de contrôle du trafic. Des usines de production ont utilisé les groupes de processus pour coordonner les tâches et pour reconfigurer les chaînes d'assemblage lorsque certains équipements de ces chaînes sont retirés pour être révisés.

Toutefois, à mesure que la complexité des applications augmente, les informaticiens découvrent que la duplication active a des limitations. Le partage des tâches n'est ni toujours possible, ni désirable : certains systèmes (notamment ceux où les données stockées dans un serveur changent très rapidement) ralentissent quand leurs éléments sont dupliqués. Par exemple, pour les vidéoconférences, la duplication active améliore la tolérance aux pannes du réseau de serveurs qui doivent continuer de fonctionner même quand certains participants sont déconnectés. En revanche, appliquée à la transmission de données vidéo à distance, cette technique ralentira le système sans améliorer sa fiabilité.

Le besoin de flexibilité nous a conduits à mettre au point *Horus*. *Horus* utilise à la fois la technique de duplication active et un traitement modulaire des tâches : un peu comme avec des *Lego*, les différentes pièces de construction, ou modules, d'*Horus* peuvent s'assembler selon n'importe quelle combinaison pour répondre aux besoins spécifiques d'un groupe de processus particulier. Un module chiffre les données, afin de fermer le réseau aux pirates ; un autre module identifie les erreurs de communication potentielles pouvant survenir lorsque des messages sont perdus ou altérés. Les programmeurs qui utilisent *Horus* décident des propriétés nécessaires à leur système et adaptent le système à l'usage projeté. En outre, *Horus* est extensible à l'aide de modules faits sur mesure pour des besoins spécifiques que nous n'avons pas rencontrés ni imaginés.

Horus a un nombre croissant d'utilisateurs dans le monde. À l'Université Cornell, Brian Smith l'a utilisé pour construire un système de vidéoconférences associé à des groupes de discussion et à des outils de travail coopératif assisté par ordinateur.



3. CES PASSAGERS, qui attendent leurs avions à l'aéroport de La Guardia, à New York, sont victimes d'une panne du système local de contrôle de trafic aérien faisant suite à une coupure de courant, en mai 1995. Les efforts pour rajeunir les logiciels américains vieillissants de contrôle de trafic aérien utilisant des systèmes répartis remontent aux années 1980.

Un manque de volonté?

Notre travail sur *Isis* et sur *Horus* nous a convaincus qu'une étude soignée assure la fiabilité d'un réseau informatique. Toutefois, la réalisation d'autoroutes de l'information robustes coûtera plus cher et prendra plus de temps que ne le voudraient les fabricants et les utilisateurs. Les logiciels de gestion des systèmes répartis sont habituellement construits avec la technique existante, qui n'a pas été conçue pour être fiable. En outre, les informaticiens doivent trouver des techniques nouvelles pour les très gros réseaux : un système extrêmement robuste lorsque 50 utilisateurs y accèdent simultanément peut se révéler trop lent, et donc non fiable, lorsque 5 000 personnes s'y connectent.

Bien que les programmeurs aient appliqué la technique de l'informatique répartie robuste avec succès dans certains cas, le public entend plus souvent parler des défaillances des systèmes non robustes. Ainsi, ces dernières années, des dizaines de rapports ont fait état de problèmes du système de contrôle du trafic aérien américain. Fin 1995, le système de Los Angeles tomba en panne, mettant les contrôleurs dans l'impossibilité de communiquer avec les avions ; une collision en plein ciel fut évitée de justesse.

Pis encore, les mises à jour des logiciels de contrôle de trafic aérien commandées, en 1982, par le ministère américain de l'aviation ont été retardées et les logiciels finalement proposés sont moins performants que ceux qui avaient été initialement choisis : les aspects «haute disponibilité» et «distributivité» ont été presque éliminés. Pourtant, les contrôleurs aériens considèrent que le système existant est inapproprié, notamment parce qu'il lui manque une architecture de logiciel distribué et qu'il a perdu de sa fiabilité avec l'âge.

L'industrie logicielle est-elle en crise? Si une crise existe, c'est peut-être autant par manque de volonté que par manque de moyens. Tous les ingénieurs n'ont pas besoin de rendre robustes leurs logiciels réseaux : la pression du public pour accroître la fiabilité ne semble pas s'étendre au-delà de quelques applications particulièrement sensibles. Les sociétés qui commercialisent les logiciels d'informatique répartie précisent souvent, dans les garanties de leurs produits, que la technique de programmation employée n'est pas assez fiable pour un usage dans des applications critiques, avouant implicitement que la fiabilité n'est pas un objectif. C'est un peu comme si un constructeur d'automobiles vendait ses voitures en prévenant que les véhicules pourraient ne pas

Des langages aux systèmes

La recherche française étudie beaucoup les problèmes fondamentaux que posent les systèmes répartis. Par exemple, l'utilisation croissante du Web pour des transactions commerciales (en particulier bancaires) imposent des protocoles de communication très sûrs : le projet *Verified Internet Protocol* (protocole certifié pour *Internet*) établit une « preuve formelle » de la confidentialité des protocoles de transactions proposés sur le réseau *Internet*. Citons aussi la conception de modèles théoriques des systèmes distribués, qui part du constat que la plupart des langages disponibles pour écrire des applications réparties intègrent mal les fonctions primitives donnant accès à la distribution : l'obtention des programmes mobiles et la résistance aux pannes locales nécessitent des appels système complexes. Inspiré de la théorie des « processus mobiles » de R. Milner, le J-calcul (*Join calculus*) apporte un modèle simple de la distribution qui définit précisément le comportement des primitives de distribution en présence de migrations et de pannes. À l'aide de ce calcul, on espère créer un langage de programmation de haut niveau intégrant directement la programmation distribuée et mobile.

Sur le plan moins spéculatif des systèmes d'exploitations, la recherche française a été à l'origine de *Chorus*, une famille de composants de systèmes d'exploitation qui permet à

partir d'un ensemble réduit de fonctionnalités de base, de créer un système d'exploitation adapté aux contraintes de l'application répartie à réaliser. Les travaux actuels de la recherche en systèmes d'exploitation répartis concernent les mécanismes de partage d'informations dans les grands systèmes répartis, la tolérance aux pannes, en particulier dans la vidéoconférence, ainsi que l'application des techniques de haute disponibilité aux distributeurs de films vidéo à la demande : la défaillance d'un serveur pendant la diffusion du film doit rester imperceptible au spectateur qui conserve ainsi l'illusion d'un service continu.

Le système français concurrent du logiciel *Isis* cité dans l'article est le système *SafeTech* qui consiste en une couche logicielle intermédiaire qui intercepte les communications de l'application et assure la tolérance aux pannes sans modification du programme d'origine.

En ce qui concerne plus spécifiquement le système *Horus* que nous décrivont K. Birman et R. van Renesse, la recherche française a joué un rôle indirect dans sa conception : une version d'*Horus* a été écrite en *Caml*, un langage de programmation mis au point par les chercheurs de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique. Ce langage est uti-

lisé pour l'enseignement de l'option informatique dans les classes préparatoires aux Grandes Écoles. Les chercheurs américains ont pris le risque d'utiliser un langage de haut niveau pour écrire une application proche du système, et la qualité du logiciel obtenu montre que ce pari est gagné.

Si les informaticiens qui ont écrit *Horus/ML* (la version *Caml* du logiciel *Horus*) ont ainsi bénéficié du travail fait en France, en récupérant par le réseau *Internet* un langage de programmation adapté à leur problème, réciproquement, les développeurs et les usagers du langage *Caml* tirent bénéfice de l'expérience, puisque *Horus/ML* permet maintenant de créer et de gérer en *Caml* des systèmes répartis.

Cette synergie du travail d'équipes distantes de plusieurs milliers de kilomètres est caractéristique de la recherche actuelle. C'est bien entendu le réseau mondial d'information qui permet cette coopération. Dans le cas d'*Horus* et de *Caml* cette coopération porte directement sur l'amélioration de la fiabilité des réseaux qui permettront bientôt à tous de communiquer plus sûrement et plus facilement. Ainsi l'existence du réseau et des systèmes distribués rend possible ces recherches sur le réseau et les systèmes distribués, sujets et acteurs à part entière de la recherche qui les concerne...

Pierre WEIS – INRIA–Rocquencourt

fonctionner sur autoroute ! Les équivalents informatiques des ceintures de sécurité et des coussins gonflables sont rares, car les ingénieurs et les usagers s'intéressent plus à la rapidité et à la convivialité qu'à la fiabilité.

Lorsqu'on pense à la fiabilité, on imagine souvent des systèmes lents et pesants, à l'opposé de ces autoroutes de l'information tant vantées. Pourtant la technique qui rend les systèmes répartis robustes n'est pas nécessairement lente ni désagréable à utiliser. Alors que les informaticiens trouvent sans cesse de nouvelles utilisations aux liaisons entre les ordinateurs, la question s'impose : ces ponts supporteront-ils l'énorme flux d'informations qu'on se propose de leur faire transmettre ? Nous pensons que les systèmes répar-

tis robustes offrent un outil précieux pour relier rapidement et de manière fiable des ordinateurs. Dans notre future société de l'information, ces réseaux offriront une nouvelle manière de

concevoir les affaires et les loisirs. Toutefois, si un système réparti n'est pas construit pour fonctionner de façon robuste, il peut être préférable de ne pas le construire du tout.

Kenneth BIRMAN est professeur d'informatique à l'Université Cornell. Robert van RENESSE est chercheur dans cette même université.

J. GRAY, J. BARTLETT et R. W. HORST, *Fault Tolerance in Tandem Computer Systems*, in *The Evolution of Fault-Tolerant Computing*, sous la direction de A. Avizienis, H. Kopetz et J.C. Laprie, Springer-Verlag, 1987.

Ivars PETERSON, *Fatal Defect : Chasing Killer Computer Bugs*, Random House, 1995.

R. BALTER, J.P. BANÂTRE, S. KRAKOWIAK, *Construction des systèmes d'exploita-*

tion répartis, Collection Didactique, 1991, INRIA-UCIS diffusion.

Jean-Marie RIFFLET, *La communication sous Unix*, 7, Ediscience International, 1990.

Informations disponibles sur le Web :

• Le programme *Horus* : <http://www.cs.cornell.edu/Info/Projects/horus/>

• Partage d'informations : <http://prof.inria.fr/>

• Le langage *Caml* : <http://pauillac.inria.fr/caml/caml-fa.html>

• Serveurs de films vidéo : <http://www.inria.fr/Rapports/solidor/node21.html>

L'horreur des mines antipersonnel

GINO STRADA

Les mines antipersonnel tuent ou mutilent 26 000 personnes par an, surtout des civils et des enfants. Leur interdiction est urgente.

Au Rwanda, le terrible bain de sang avait cessé. Alphonsine rentrait chez elle, avec sa famille, quand elle marcha sur une mine : l'explosion lui déchiqueta les jambes et lui fractura l'avant-bras gauche. À l'hôpital de Kigali, nous avons réparé les dégâts du mieux que nous pouvions : nous avons amputé ses deux jambes au-dessus du genou. Sa sœur était touchée à la tête : un fragment métallique lui était entré dans le cerveau. Elle mourut six heures après l'opération, sans avoir repris conscience. Le père des deux fillettes, qui se tenait à plusieurs mètres d'elles, ne souffrait «que» de nombreuses petites plaies au thorax.

De nombreux civils, comme Alphonsine et sa famille, sont aujourd'hui la cible des mines, car la plupart des conflits actuels sont des guerres civiles, des luttes d'indépendance, des «épurations ethniques», des opérations terroristes. Les soldats utilisent fréquemment des armes dévastatrices dans des régions très peuplées. Beaucoup de groupes armés se mêlent à la population, sans uniforme pour éviter d'être identifiés, et ils utilisent parfois les civils comme bouclier. En outre, terroriser les populations civiles est une vieille stratégie militaire.

Depuis le début du siècle, de plus en plus de civils sont victimes de la guerre. Pendant la Première Guerre mondiale, 15 pour cent des tués étaient civils. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les victimes civiles comptaient pour 65 pour cent des morts. Dans les conflits actuels, plus de 90 pour cent des blessés seraient des civils.

L'un des aspects les plus dramatiques de cette situation est la diffusion

d'armes, telles que les mines antipersonnel, qui constituent une menace indiscriminée et durable. Elles ne distinguent pas le pied d'un combattant de celui d'un enfant qui joue. Elles ne reconnaissent ni cessez-le-feu, ni accord de paix. Elles tuent ou mutilent plusieurs décennies après la fin des hostilités. Ce sont des armes de destruction de masse à action lente.

Les mines ont été utilisées de diverses façons depuis le début du siècle, mais la stratégie militaire en a progressivement fait un usage de plus en plus important. Autrefois, elles interdisaient certaines régions à l'ennemi, canalisait ses déplacements ou protégeaient des installations stratégiques. Aujourd'hui, elles empêchent les populations de s'approvisionner en eau, en bois ou en essence, leur interdisent d'emprunter les voies de communication, voire d'accéder aux cimetières. Dans de nombreux pays, les hélicoptères, l'artillerie ou d'autres moyens de largage à distance ont servi à disséminer des mines dans les villages et dans les champs, actes délibérés de terrorisme envers les populations civiles.

Une faible pression suffit

En termes techniques, une mine antipersonnel est un dispositif conçu pour tuer ou mutiler toute personne qui le déclenche. Les mines antichars, en revanche, sont spécifiquement conçues pour détruire les tanks et les véhicules, et eux seuls : elles n'explosent que lorsqu'elles subissent une pression de plusieurs centaines de kilogrammes. Les mines antipersonnel sont petites (parfois moins de dix centimètres de dia-

mètre) et difficiles à détecter. Certaines ont une couleur et une forme qui les rendent quasi invisibles.

Une mine antipersonnel est activée quand une victime déclenche le mécanisme de mise à feu en appuyant directement sur la mine ou en tirant sur un fil déclencheur tendu au ras du sol. Un détonateur met alors à feu une charge auxiliaire (une petite quantité d'explosif puissant), qui fait enfin exploser la charge principale de la mine.

Ces dernières années, les industries de l'armement ont mis au point des mines en plastique, qui contiennent peu de métal et sont plus fiables, plus durables, plus difficiles à détecter... et aussi plus difficiles à désamorcer. En outre, des systèmes de largage à distance, par hélicoptère, par exemple, permettent de poser des milliers de mines en quelques minutes. Comme ce type de minage ne permet pas de dresser une carte du champ de mines, la localisation ultérieure est devenue très difficile.

Les mines antipersonnel sont faciles à fabriquer et peu coûteuses (entre 15 et 60 francs pièce). Environ 50 pays, y compris des pays en développement, ont produit quelque 350 modèles et les ont vendus aux divers groupes armés du monde.

Combien de mines posées de par le monde n'ont-elles pas explosé ? Selon l'Organisation des Nations unies et diverses associations humanitaires,

1. LA PETITE MINE SB-33, fabriquée en Italie, est montrée ici grandeur nature. Elle se confond si bien avec les pierres qu'elle en devient presque invisible. Lorsqu'une personne marche sur une telle mine à effet de souffle, son pied ou sa jambe sont arrachés.

plus de 100 millions de mines seraient aujourd'hui disséminées dans 64 pays. Comme ni les fabricants ni les utilisateurs n'en gardent une trace fiable, ces chiffres sont vraisemblablement inférieurs à la réalité. Une grande partie de la planète est «polluée» par les mines antipersonnel.

Selon les organismes qui secourent les victimes ou qui participent au déminage, ces armes auraient tué ou mutilé de 15 000 à 30 000 personnes par an depuis 20 ans. Environ 60 pour cent des victimes étaient des civils. En fait, le nombre véritable de victimes est sans doute supérieur : beaucoup de blessés le sont dans des zones reculées, dépourvues d'installations médicales, de sorte qu'ils ne sont pas comptabilisés. Dans une région minée, des activités aussi quotidiennes qu'aller chercher du bois, de la nourriture ou de l'eau, cultiver, garder le bétail ou jouer, sont risquées.

Les mines antipersonnel sont de deux types principaux : les mines à effet de souffle et les mines à fragmentation. Les mines à effet de souffle sont déclenchées par la pression, par exemple d'un pied, sur un capteur. Les lésions corporelles dues à ce type de mine sont causées par l'explosion elle-même. Les mines à fragmentation, plu-

tôt déclenchées par la traction sur un fil tendu, projettent un grand nombre de fragments métalliques qui volent à une distance considérable. Ces fragments sont contenus dans la mine ou sont produits par l'éclatement de son boîtier.

À chaque mine ses blessures

Le type de mine, la façon dont elle explose, sa position sur le sol, la position de la victime et la configuration du site de l'explosion déterminent la nature et l'étendue des dommages causés par l'explosion. Les victimes sont blessées très diversement. On regroupe toutefois les blessures en quatre classes, qui correspondent chacune à un type de mine.

Les petites mines à effet de souffle, de diamètre inférieur à dix centimètres, produisent des blessures de classe A. Ces armes arrachent couramment un pied ou une jambe. Selon la position de la mine et la façon dont on marche dessus, une partie du pied seulement peut être déchiquetée. La plupart des blessures graves infligées par ce type de mines sont situées au-dessous du genou, rarement plus haut sur le corps ou sur l'autre jambe.

Les mines à effet de souffle de plus de dix centimètres de diamètre produisent des blessures de classe B. L'onde de choc de l'explosion se propage vers l'extérieur à la même vitesse que pour une petite mine, environ 6 800 mètres par seconde, mais le cône d'explosion (le volume où se concentre l'énergie) est bien plus large. En outre, les plus grosses mines contiennent plus d'explosif puissant : moins de 50 grammes de TNT dans une petite mine contre 150 à 250 dans de plus grands modèles.

Les victimes qui marchent sur ces grosses mines antipersonnel ont toujours un membre arraché. Assez souvent, la partie inférieure de la jambe est détruite. Un morceau de tibia dépasse parfois du moignon, et ce qui reste de muscle est déchiqueté et repoussé vers le haut, donnant à la blessure une apparence grotesque de chou-fleur. La partie inférieure de la jambe peut aussi être complètement pulvérisée jusqu'au genou. La cuisse, les parties génitales et les fesses sont souvent blessées. Chez de nombreuses victimes, l'autre jambe est aussi endommagée, présentant des plaies béantes ou des fractures ouvertes. Certaines parties des deux jambes sont parfois condamnées. Les lésions perforantes de l'abdomen et de la poitrine sont fréquentes.



L'interdiction totale, seule solution

Les mines antipersonnel sont-elles utiles? Le général Norman Schwartzkopf, commandant en chef de l'opération *Tempête du désert* contre l'Iraq, en 1991, et 14 autres militaires américains de haut rang ont écrit au président William Clinton que: «L'interdiction totale des mines antipersonnel est une responsabilité non seulement humanitaire, mais aussi militaire, car elles entrent dans la même catégorie que les armes chimiques, indiscriminées par nature. Compte tenu de la diversité des armes disponibles, les mines antipersonnel ne sont pas indispensables à nos forces armées. Leur interdiction n'affaiblirait ni notre efficacité militaire, ni la sécurité de nos soldats, ni celle d'autres nations.» Selon une étude publiée par le Comité international de la Croix rouge, les mines antipersonnel sont rarement utilisées dans le respect des doctrines militaires, faute de temps et de contrôle sur les événements. Elles se retournent plutôt contre ceux qui les ont posées et n'ont qu'exceptionnellement joué un rôle décisif dans l'issue des conflits.

Malgré ces faits et la prise de conscience de l'opinion publique internationale en faveur de l'interdiction des mines antipersonnel, la conférence de révision de la Convention sur les armes inhumaines, qui a eu lieu à Genève en avril dernier, a accumulé les compromis techniques et les exceptions qui légitiment la poursuite de l'utilisation de cette arme. Le protocole adopté à l'issue de cette conférence encourage même la production et l'utilisation d'une nouvelle génération de mines antipersonnel, munies d'un dispositif d'autodésactivation, dont le caractère «intelligent» est présenté comme une authentique avancée sur le plan humanitaire. C'est la première fois que des négociations destinées à limiter ou interdire un type d'arme aboutissent à la promotion d'un autre.

Pour Handicap International, qui mène des programmes d'aide aux victimes, de fabrication de prothèses et de déminage, le débat sur la fiabilité des nouvelles mines autodestructibles est sans objet: ces armes ne font toujours pas la différence entre les cibles

civiles et les cibles militaires. En outre, les études scientifiques dont elles ont fait l'objet sont trop succinctes et ne permettent pas de connaître leur fonctionnement en situation réelle. Lorsqu'une zone sera parsemée de mines de types, de modèles et de dates de pose différents, comment les paysans, les réfugiés, les personnes déplacées par un conflit ou les soldats eux-mêmes distingueront-ils une mine «stupide» d'une mine «intelligente active», et d'une mine «intelligente désactivée»?

Le principal point positif du protocole mis au point à Genève réside dans l'intention de proscrire les mines antipersonnel non détectables. Les moyens sont toutefois insuffisants: outre les neuf années de délai de mise en œuvre, le seuil de détectabilité des mines, fixé à seulement huit grammes de métal, reste délibérément trop faible.

Sous prétexte de réglementation internationale, les responsables politiques ont ainsi négocié un pseudo-compromis. Les pays les plus avancés veulent intégrer les mines programmables, qu'ils savent fabriquer, à un arsenal qui se recompose au fil des évolutions stratégiques, tandis que les pays qui sont arrivés récemment sur le marché des ventes d'armes, incapables de mettre au point des armes aussi perfectionnées, préfèrent écouler leur production classique. Un troisième groupe de pays, minoritaire, plaide pour l'interdiction, au profit des populations menacées.

Plusieurs régimes risquent de s'installer: d'un côté, les états relativement industrialisés utiliseront des moyens toujours plus perfectionnés et modifieront le cadre réglementaire en fonction de leurs intérêts stratégiques; de l'autre, la grande masse des états utiliseront, hors convention, les moyens qui leur semblent bons en fonction des ressources dont ils disposent. N'ayant pas tranché sur l'essentiel, l'interdiction d'une arme non discriminante dont les effets dévastateurs sont massifs, juristes et diplomates ont perdu de vue leur but initial: la réduction des dommages et des souffrances causés aux populations civiles.

Jean-Baptiste RICHARDIER
Handicap international, Lyon

Une mine jouet

La mine russe PFM-1, familièrement surnommée mine-papillon, provoque des blessures de classe C. Cette mine tient son surnom des ailettes qui lui permettent de planer jusqu'au sol après son largage d'hélicoptère. Larguée en grand nombre pendant la guerre d'Afghanistan, c'est une arme particulièrement démoniaque, car elle ressemble à un jouet. Les spécialistes prétendent que sa forme est déterminée par sa fonction, mais le fait demeure qu'elle attire particulièrement les enfants.

L'originalité de cette mine est son déclenchement par la déformation ou la pression cumulées sur ses ailes: elle n'explose pas toujours au premier contact. En Afghanistan, des enfants jouent parfois plusieurs heures avec une de ces mines avant qu'elle n'explose. Sur 150 victimes de ce type de mine, notre groupe n'a pas vu un seul blessé adulte.

Techniquement, la PFM-1 n'est qu'une petite mine à effet de souffle largable à distance, mais elle cause des blessures spécifiques. Elle explose le plus souvent dans les mains de la victime, sectionnant une main, ou les deux, jusqu'au poignet. Dans les cas les moins graves, seuls deux ou trois doigts sont arrachés. Souvent, le souffle de l'explosion blesse la poitrine et le visage. Des blessures aux yeux sont fréquentes, entraînant une cécité partielle ou totale.

Les mines antipersonnel à fragmentation sont responsables des blessures de classe D. Il en existe plusieurs sortes. Les mines sauteuses sont posées sur le sol mais, lorsqu'elles sont déclenchées, elles sautent en l'air avant d'exploser de façon à disperser leurs fragments avec la plus grande portée possible, avec un effet létal maximal. Les mines à fragmentation directionnelle et celles qui envoient leurs projectiles dans une direction prédéterminée appartiennent aussi à cette catégorie. Toutes ces mines sont déclenchées par des fils tendus.

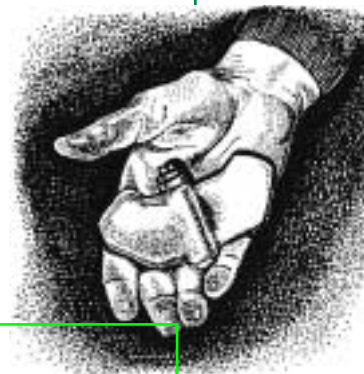
Les mines à fragmentation envoient des éclats métalliques sur une grande surface. Un modèle italien explose à une hauteur de 50 centimètres à un mètre (à peu près à hauteur de la ceinture d'un homme) et projette 1 000 fragments métalliques sur 360 degrés. Cette mine tue à 25 mètres et blesse jusqu'à 200 mètres.

Les mines à fragmentation touchent l'ensemble du corps. L'importance des

Les classes de blessure

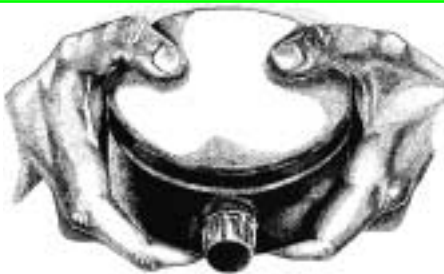


Les blessures de classe A, telles celles que présente le jeune garçon ci-contre, sont le plus souvent causées par des petites mines à effet de souffle (*ci-dessus*). Ces armes, de moins de dix centimètres de diamètre, arrachent un pied ou une jambe selon la façon dont on a marché dessus. Elles produisent rarement des blessures au-dessus du genou ou sur l'autre jambe.



Des blessures de classe C sont produites par la mine PFM-1, dite mine-papillon (*à droite*). Ces mines explosent seulement après que des pressions cumulées ont été appliquées sur leurs ailes, qui les aident à planer jusqu'au sol après leur largage d'hélicoptère. Comme elles sont généralement tenues en main au moment où elles sautent, ces mines arrachent des doigts ou les mains et blessent le visage et la poitrine. Presque toutes les victimes sont des enfants (*ci-dessus*) qui jouent avec.

Les grosses mines à effet de souffle (*ci-contre*) provoquent des blessures de classe B, telles celles dont ont souffert certains des enfants de



l'hôpital de la Croix-Rouge de Kaboul (*ci-dessus*). Ces mines ne sont pas beaucoup plus grosses que les petites mines à effet de souffle, mais elles contiennent plus de charge explosive. Elles pulvérisent souvent la partie inférieure de la jambe et causent des plaies aux cuisses, aux parties génitales ou aux fesses.

Des blessures de classe D indiquent qu'une personne a trébuché sur le fil tendu d'une mine à fragmentation, telle une mine sur piquet (*ci-contre*). Ces mines, qui tirent des fragments métalliques à grande distance, tuent en principe toute personne qui entre en contact direct avec elles.



lésions dépend en partie de la taille de l'éclat qui a pénétré la chair. Si la victime est à plusieurs mètres du lieu de l'explosion, les fragments pénètrent l'abdomen, la poitrine ou le cerveau, surtout

s'il s'agit d'une mine sauteuse. À plus courte distance, les blessures sont de classe B. Toutefois les médecins ont rarement à traiter des membres arrachés par des mines à fragmentation, car les per-

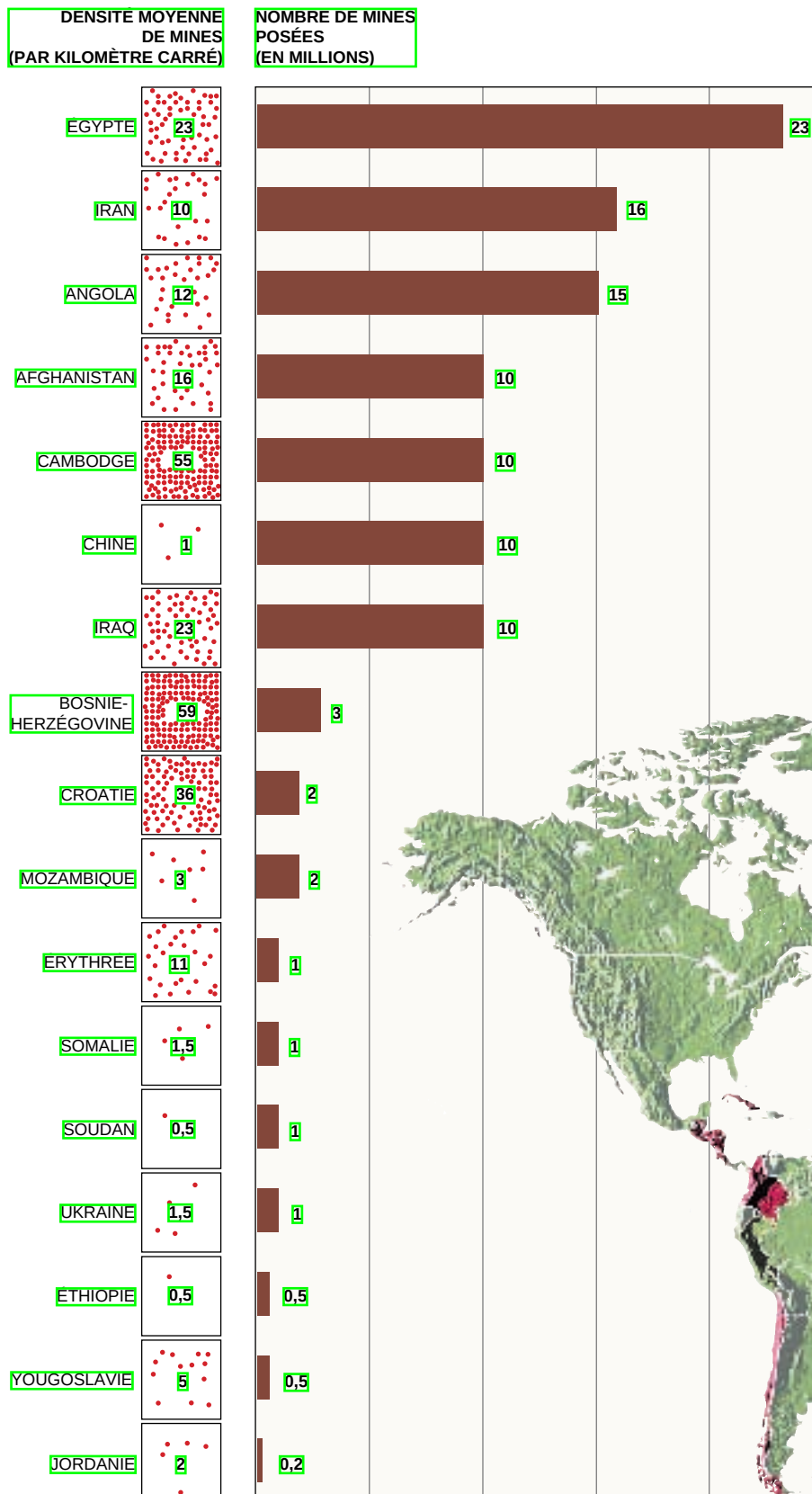
sonnes qui les déclenchent par contact direct sont presque toujours tuées.

Dans le Nord de l'Iraq, pendant la guerre du Golfe, j'ai été appelé après que deux personnes eurent essayé de désamorcer une mine sauteuse pour récupérer son contenu en aluminium, qui valait environ cinq francs sur le marché local. Elles ont été tuées sur le coup. Quatre autres personnes qui se trouvaient à proximité ont été gravement blessées. Seules deux d'entre elles ont survécu.

Des blessés toujours gravement atteints

Les différentes classes de blessures ne correspondent pas à des niveaux de gravité. Un arrachement du pied associé à une petite blessure à la cuisse, un cas caractéristique de la classe A, peut être mortel si l'artère fémorale est touchée. Les personnes blessées par les mines terrestres sont toujours dans

2. LES PAYS OU DES PERSONNES SONT BLESSÉES par des mines antipersonnel sont en rouge sur la carte. L'histogramme indique les nombres de mines posées dans ces pays, pour ceux où une estimation existe. Les carrés (à gauche) indiquent la densité moyenne de mines dans ces pays.



un état très grave : les organes vitaux sont souvent directement endommagés, et les blessures sont si étendues que les chocs hémorragiques sont fréquents (la perte de sang est si grande que le cœur risque de battre à vide). Dans tous les cas, l'équipe chirurgicale (et les démineurs éventuels) est aidée quand elle peut associer rapidement la forme des blessures avec un modèle de mine.

La chirurgie des blessures infligées par les mines antipersonnel est un art difficile, car elle s'effectue souvent dans des régions en guerre, avec des équipements sommaires. L'insuffisance des moyens, le manque d'hygiène et, parfois, l'absence d'eau et d'électricité compliquent le travail et les suites opératoires. En outre, les chirurgiens ont à traiter tous les types d'urgence : vasculaire, thoracique, abdominale, orthopédique. Des fragments d'os deviennent des «balles secondaires» : j'ai un jour reconstruit l'artère axillaire de l'épaule d'un patient qui avait été sectionnée par un éclat d'os de son pied, arraché par une mine.

D'un point de vue technique, l'opération capitale est le nettoyage chirurgical de la blessure. Quand une mine à effet de souffle explose, des pierres,

de la terre, de l'herbe et même des lambeaux de vêtements ou de chaussures de la victime pénètrent profondément dans les chairs. L'extirpation de tous les corps étrangers et, encore plus, l'excision de tous les tissus morts ou endommagés sont d'une importance cruciale dans la prévention des infections postchirurgicales.

Réinsérer les rescapés

La plupart des blessés qui survivent à l'explosion d'une mine terrestre ne reprennent jamais une vie familiale ou sociale totalement normales. Leur réinsertion est souvent difficile. De nombreuses victimes vivent dans des pays en développement, où les conditions de vie compliquent le traitement des handicaps physiques et psychologiques.

Outre le terrible coût humain infligé par les mines, celles-ci sont aussi un lourd fardeau économique et social. Le minage des champs a des conséquences à long terme sur les communautés paysannes, pour qui l'accès à la terre est une question de survie. La présence de mines antipersonnel dissuade aussi des réfugiés de guerre de revenir chez eux. Les personnes déplacées deviennent alors des réfugiés permanents, qui surchargent les structures économiques et sociales des régions où ils ont fui.

En 1980, l'ONU a adopté une Convention «sur les armes inhumaines». Bien que cette convention et ses protocoles garantissent en principe la protection des civils, les événements de la dernière décennie ne démontrent que trop clairement leur inefficacité. Plus de 450 organisations humanitaires, dans près de 30 pays (dont *Handicap International*, *Agir Ici*, *Médecins sans frontières*, *Greenpeace* et la *Croix rouge*, en France), ont lancé une campagne pour attirer l'attention de la communauté internationale sur les effets dévastateurs des mines antipersonnel. Elles ont exhorté l'ONU et les gouvernements à interdire la production, le stockage, la vente, l'exportation et l'usage des mines. Cette campagne a eu des résultats : plusieurs pays, dont la France, ont officiellement arrêté la production ou l'exportation de mines terrestres, au moins temporairement.

En septembre 1995 et en avril 1996, des conférences de révision de la convention, organisées par l'ONU, se sont tenues à Vienne et à Genève. La diplomatie internationale a concentré la discussion sur divers aspects techniques et militaires de l'usage des mines

antipersonnel. D'un point de vue humanitaire, ces conférences ont échoué. Une interdiction totale de ces armes non discriminantes, la seule véritable solution, n'a même pas été prise en considération. Alors que la plupart des pays et des citoyens du monde réalisent désormais l'horreur des bombes atomiques, il est consternant que ces mêmes nations n'élèvent aucune objection devant le massacre quotidien perpétré par les poseurs de mines antipersonnel.

Pourtant, le monde devra affronter un terrible héritage d'ici un siècle. Les mines larguées chaque année restent actives pendant plusieurs décennies. Même si l'on n'en posait plus, celles qui sont déjà en place garderont longtemps leur potentiel meurtrier. Nous espérons que le problème des mines antipersonnel deviendra rapidement une priorité fondamentale de la communauté internationale et que cette dernière fournira les fonds nécessaires pour soutenir l'assistance chirurgicale d'urgence et la réinsertion des victimes, ainsi que les opérations de déminage et l'éducation des populations sur les dangers des mines.

Même pour un chirurgien militaire expérimenté, la vision d'un corps d'enfant mis en pièces par ces armes est bouleversante. Ce carnage n'a rien à voir avec une quelconque stratégie militaire. C'est un choix délibéré d'infliger des souffrances et des mutilations monstrueuses. C'est un crime contre l'humanité.

Gino STRADA est chirurgien. Il a soigné des victimes de mines dans plusieurs pays et a fondé l'Association humanitaire *EMERGENCY*.

Mines antipersonnel : la guerre en temps de paix, Handicap International, Les dossiers du GRIP, à paraître en septembre 1996.

La guerre des lâches : les mines au Viêt-nam, Handicap International, Bruxelles, 1996.

Landmines : A Deadly Legacy, The Arms Project of Human Rights Watch and Physicians for Human Rights, Human Rights Watch, 1993.

Jody WILLIAMS, *Social Consequences of Widespread Use of Landmines*, in *ICRC Report of the Symposium on Antipersonnel Mines*, ICRC, Genève, 1993.

Jim WURST, *Ten Million Tragedies, One Step at a Time*, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 49, n° 6, pp. 14-21, juillet-août 1993.



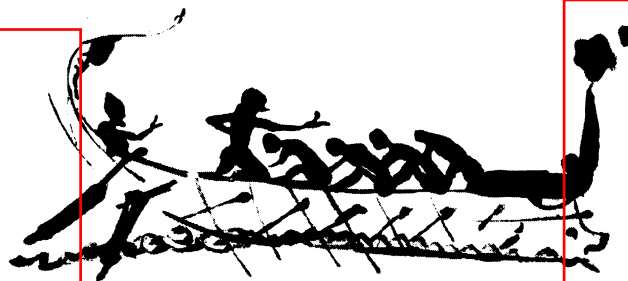
La technique des rameurs de la Grèce ancienne

JOHN HALE

Les rameurs athéniens s'imposèrent en Méditerranée parce qu'ils glissaient sur le banc de nage, assis sur un coussin. Leur technique, longtemps oubliée, a été réinventée par les rameurs de compétition au XIX^e siècle.

Dans l'Antiquité, les galères grecques dominaient la Méditerranée, et les Athéniens dominaient les autres Grecs. La plupart des cités-états de la Grèce avaient une cavalerie aristocratique ou une infanterie plébéienne, mais Athènes enrôlait des milliers de citoyens dans sa flotte de guerre. Thémistocle, qui avait prôné cette politique maritime, avait subi les critiques de ses rivaux conservateurs, qui l'accusaient d'avoir arraché aux soldats leur bouclier et leur lance pour les affubler de coussins et de rames. Il fallait 170 paires de rames pour propulser les trières (galère à trois rangs superposés de rameurs). Mais pourquoi des coussins ?

La conception des sièges des rameurs athéniens est l'une des nombreuses énigmes de l'histoire des techniques. Les coussins athéniens furent de ces modestes progrès, au même titre que l'étrier ou l'arc médiéval, qui ont changé l'histoire. Mystérieux pour nous, le coussin du rameur était si familier aux Grecs anciens que le géographe Ératosthène expliquait à ses contemporains la forme de la Mésopotamie en la comparant à celle d'un coussin de rameur. Toutefois on n'a retrouvé aucune description précise de cet objet dans les textes, et les historiens doivent se contenter d'indices fortuits qui ont survécu à la disparition du monde ancien. Comme bien d'autres objets techniques, le coussin de rameur n'a sans doute jamais été décrit ni dessiné en détail.



1. UNE DÉCORATION DE VASE CORINTHIEN datant du VI^e siècle avant J.-C. montre des rameurs grecs en position genoux relevés.

S'il avait la forme de la Mésopotamie, il devait être large au centre et étroit aux extrémités. Le siège des rameurs (en grec, *hyperesion* signifie « sous le rameur ») était effectivement garni d'un coussin. Les érudits romains et byzantins, qui ont élaboré des dictionnaires expliquant les termes obscurs rencontrés dans les textes grecs, donnaient d'*hyperesion* plusieurs définitions : toison, peau ou coussin protégeant le postérieur des rameurs. Ces derniers emportaient leur coussin avec eux, comme les motards actuels leur casque : un orateur athénien se moque de ses compatriotes, lorsqu'ils arrivent à l'étranger, affublés de leurs coussins de rameurs. Néanmoins ces accessoires étaient devenus indispensables. Lorsque les Spartiates attaquèrent Athènes, en 429 avant J.-C., chaque rameur traversant les terres pour atteindre son navire dut porter son coussin et sa rame.

Les Romains armaient des navires semblables à ceux des Grecs, mais leurs rameurs n'utilisaient pas de coussin, et la langue latine ne comporte aucun terme correspondant à un tel objet.

De même, les coussins étaient inconnus dans les galères vénitienes du Moyen Âge et de la Renaissance : s'il en avait été fait usage, ils auraient certainement figuré dans les inventaires maritimes tenus par Venise, qui détaillaient le moindre accessoire, jusqu'aux bonnets des rameurs. Peut-on admettre que les Grecs, y compris les Spartiates, réputés pour leur rudesse, étaient si délicats qu'ils ne pouvaient ramer assis sur un banc à même le bois ?

Pour répondre à cette question, examinons l'évolution des techniques de propulsion à la rame. Jadis un inventeur préhistorique a probablement observé que sa pagaie pouvait servir de levier quand elle était fixée au bord de l'embarcation. La propulsion obtenue en ramant, et non plus en pagayant, était si efficace qu'elle suscita le développement de techniques variées : le gondolier vénitien, par exemple, bat l'eau latéralement d'une seule rame, dans un mouvement de va-et-vient comme la queue d'un poisson ; le marin breton godille, en faisant décrire des huit à son unique aviron, placé derrière le bateau, parallèlement à son axe ; les galères médiévales étaient propulsées à l'aide d'énormes avirons dont la manœuvre obligeait les rameurs, debout, à avancer et à reculer. Les rames ont aidé les Vikings à traverser l'Atlantique, et les Phéniciens à contourner l'Afrique. La force humaine était particulièrement indispensable aux marines de la Grèce

ancienne, dont les navires de guerre ressemblaient à des galères-torpilleurs, avec un lourd éperon de bronze à la proue (voir *Les galères de combat dans l'Antiquité*, par Vernard Foley et Werner Soedel, *Pour la Science*, juin 1981).

Graisse et peau de chamois

Parmi les techniques successives de propulsion à la rame, seule celle qui date du XIX^e siècle fait appel à un coussinet de cuir : dans les années 1850 et 1860, les athlètes qui participaient aux compétitions d'aviron ont expérimenté des rembourrages en peau de chamois cousus sur le fond de leur pantalon. Une fois graissé, ce coussinet permettait aux rameurs de glisser d'avant en arrière sur leur banc, augmentant ainsi la longueur de leur coup

de rame et ajoutant la poussée puissante des muscles de leurs jambes au mouvement de leurs bras et de leur dos.

En 1871, le *Catalogue annuel illustré servant de manuel du rameur* préconise cette innovation. Le siège est constitué d'une mince planche de bois dur (généralement du merisier), dont les fibres courent dans le sens longitudinal de l'embarcation et dont la surface est soigneusement poncée. Pour réduire encore le frottement, cette surface, ainsi que le pantalon du rameur, renforcé d'une peau de chamois, sont graissés. L'auteur du *Catalogue*, George Balch, conseillait également des potions pour soulager les brûlures et les ampoules causées par les glissements répétés.

À cette époque, les compétitions rapportaient jusqu'à 4 000 dollars. Aussi les rameurs cherchèrent-ils de

nouvelles techniques capables de leur donner l'avantage en vitesse. On observa qu'un déplacement de un centimètre de la poignée de la rame vers l'avant correspond à une distance double, dans l'eau. Ainsi un glissement de 15 centimètres seulement ajoute 30 centimètres au début du coup de rame, c'est-à-dire au stade où l'effet de levier est le plus efficace. Les sièges fixes, qui obligent les rameurs à effectuer un mouvement brusque et plongeant, ne favorisent pas ce glissement.

Au XIX^e siècle, les courses d'aviron ressemblaient à des combats navals de l'Antiquité, car la victoire revenait souvent à ceux qui viraient le plus serré, à grande vitesse. Les concurrents s'élançaient généralement vers un point marqué par un poteau, le contournaient et revenaient à leur point de départ. Dans un tableau, *Les frères Biglin virant*



2. DES SCULPTURES SUR PIERRE, découvertes sur l'Acropole d'Athènes par l'archéologue français Charles Lenormant, représentent une galère grecque à trois rangs de rameurs appelée trière. La

position des rameurs, avec les genoux pliés et relevés sur le corps (au centre), indique que les rameurs grecs glissaient sur leur banc, ajoutant la poussée des jambes à la force des bras.



3. LES RAMEURS DE COMPÉTITION ont redécouvert, au milieu du XIX^e siècle, les avantages de la technique du glissement. Une lithographie qui représente une course d'aviron du début du XX^e siècle

dépeint la position genoux pliés au début du coup de rame (rameurs au premier plan) et en extension complète à la fin (rameurs de l'arrière-plan).

au poteau, le peintre américain Thomas Eakins montre, en 1873, qu'un coup de rame plus long à l'extérieur du virage fait rapidement tourner l'embarcation. Le coup de rame effectué en glissant, selon la méthode de la «peau de chamois graissée», se révélait le plus efficace pour une telle manœuvre.

La peau de chamois du XIX^e siècle fut finalement remplacée par un système mécanique qui facilitait et amplifiait le mouvement de glissement : le siège fut monté sur des roues guidées par un rail. Ces sièges coulissants se sont imposés, des courses universitaires aux Jeux olympiques. Toutefois, même aujourd'hui, les équipages australiens qui participent à des courses dans des conditions de mer forte n'aiment pas risquer de coincer ou de casser ce système mécanique. Ils préfèrent des bancs de nage recouverts d'un polymère lisse, afin de glisser sur une surface fixe, comme les rameurs du siècle dernier.

L'apport des comédies grecques

Ne peut-on penser que les Grecs utilisaient leurs coussins comme les rameurs du XIX^e siècle leur peau de chamois graissée, afin de fournir un coup de rame plus puissant en glissant sur une surface fixe? Et les Grecs ont-ils employé, ailleurs que dans les galères, une technique avec glissement? On trouve dans des représentations artistiques et dans des descriptions techniques de construction navale des indices qui semblent confirmer l'hypothèse de la nage avec glissement du rameur sur son banc. Ainsi des céramiques peintes et des reliefs sculptés représentent des rameurs grecs assis dans les navires, genoux repliés : c'est une position qui s'impose si le rameur glisse. Ces représentations montrent également que les rameurs grecs n'étaient pas assis sur des bancs surélevés, mais sur des planches basses, placées à la hauteur de leurs pieds. Dans cette position, les mouvements du haut du corps sont limités, et le meilleur moyen de fournir un coup de rame efficace est le glissement.

Curieusement, ce ne sont pas les écrits historiques ou les manuels techniques qui donnent le plus de détails sur les rameurs de la Grèce ancienne, mais les comédies athéniennes. Initialement ces pièces satiriques s'adressaient essentiellement aux classes



4. LES RAMEURS MANŒUVRANT SUR UN SIÈGE COULISSANT exploitent la poussée supplémentaire fournie par les muscles des jambes, ce qui leur permet d'allonger le coup de rame (*flèche*) et d'amplifier l'effet de levier. Le coup de rame commence genoux repliés et se termine jambes complètement étendues.



5. LES GALERES ROMAINES étaient équipées de bancs surélevés pour les rameurs (qui étaient essentiellement des hommes libres, et non des esclaves comme les décrit le film *Ben Hur*). Ces rameurs ne pouvaient donc pas utiliser la technique du glissement mise au point antérieurement par les Grecs.



6. LA LONGUEUR ET LA PUISSANCE du coup de rame sont augmentées quand la poussée des jambes s'ajoute à la traction des bras. Le mouvement commence genoux fléchis ; grâce au glissement, il s'achève jambes tendues.

populaires, dont étaient issus la plupart des rameurs athéniens (contrairement à l'idée que donne le film *Ben Hur*, les rameurs des navires grecs étaient généralement des hommes libres, et non des esclaves). Aristophane, par exemple, a mis en scène un chœur de grenouilles qui caricature les gémissements d'un rameur novice se plaignant d'ampoules sur les fesses. Dans une scène familière aux rameurs, le vieux général Phormion apprend à ramer à une nouvelle recrue : «Arrête d'éclabousser!», crie-t-il. Cette première remarque pourrait s'appliquer à n'importe quel style de manœuvre à la rame, mais la deuxième, «Étend les jambes!», permet d'identifier la technique du glissement, au cours duquel les jambes, initialement pliées, s'étendent sous la poussée du rameur.

Les ingénieurs et constructeurs navals construisaient leurs navires en tenant compte de la technique de nage particulière utilisée à Athènes. Les trières grecques étaient équipées de rebords en bois qui dépassaient de chaque côté de l'embarcation, afin de porter les dames de nage ou les tolets en bois sur lesquels se fixaient les rames. Ces rebords étaient vulnérables, au cours des batailles, mais ils étaient indispensables pour donner sa pleine amplitude au coup de rame. Au cours du XIX^e siècle, la réintroduction de la technique du glissement s'accompagna d'un allongement de 30 pour cent de la distance entre le rameur et l'axe de la rame.

Les concepteurs d'embarcations du XIX^e siècle adoptèrent finalement une coque basse, profilée, et ils supprimèrent le banc, plaçant les fesses à la hauteur des pieds. Les ingénieurs navals de la Grèce ancienne étaient parvenus au même résultat, mais pour une toute autre raison : afin d'augmenter le nombre de rameurs dans la coque, ils ajoutèrent une rangée de rameurs au-dessus et au-dessous de la rangée initiale. Pour ne pas gêner le mouvement des rames de la rangée inférieure, ils durent surélever les jambes des rameurs de la rangée supérieure.

La répartition des trois rangées de rameurs sur trois niveaux, dans les trières grecques, fut contestée par certains historiens, qui jugeaient cette disposition peu pratique. Toutefois John Morrison, de l'Université de Cambridge, démontra que cette répartition avait bien existé, et ses thèses furent confirmées par la reconstruction de la



7. LES RAMEURS DU XIX^e SIÈCLE, tel le champion Renforth, de Newcastle, ont adopté la technique du glissement dans les années 1850 et 1860. Ces rameurs utilisèrent initialement des pièces de cuir graissé cousues sur le fond de leur pantalon. Puis les sièges mécaniques à coulisses remplacèrent ce premier système.

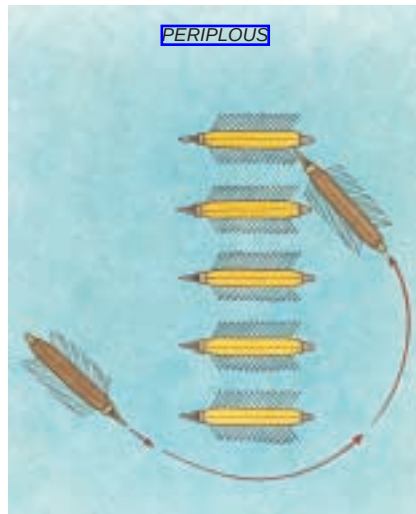
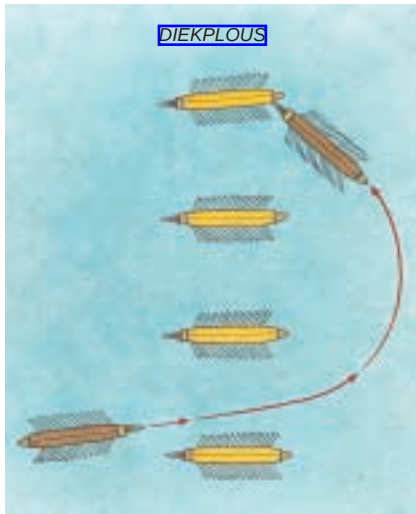
trière *Olympias* (voir *La reconstitution d'une trière*, par John Coates, *Pour la Science*, juin 1989). Les essais en mer de cette expérience ambitieuse d'archéologie nautique ont établi plusieurs affirmations anciennes. Notamment on a vérifié que ces galères atteignaient leur vitesse maximale lorsqu'elles étaient propulsées à la fois à la rame et à la

voile. Cependant, au cours des combats, les trières et autres navires de ce type étaient manœuvrés uniquement à la rame. Les mâts et les voiles étaient démontés et laissés à terre, et la plupart des batailles navales se déroulaient à l'aube, quand le calme des mers permettait une manœuvre optimale à la rame.

Droit devant !

Lors des batailles navales, les trières cherchaient à fracasser les navires ennemis. Les abordages se faisaient de deux façons, consistant toutes deux à se mettre en position favorable, face à la poupe ou à la partie arrière du navire ennemi ; pour se placer ainsi, les trières étaient avantagées par un rayon de giration réduit. Les commandants évitaient l'abordage proue contre proue, car de telles collisions frontales endommageaient autant leur propre navire que celui de leur adversaire.

La manœuvre nommée *diekplous* («charger droit devant») consistait à traverser les lignes ennemies en chargeant droit devant, à la faveur d'une brèche entre les vaisseaux des adversaires, pour se placer derrière eux ; un rapide demi-tour permettait alors de venir percuter la poupe ou la hanche arrière des rivaux. Une autre manœuvre fréquemment utilisée était le *periplous* (ou «contournement») : lorsque l'ennemi resserrait les rangs ou doublait sa première ligne pour éviter un *diekplous*,



8. LA TRIÈRE DE GUERRE GRECQUE des v^e et iv^e siècles avant J.-C. utilisait comme principale arme offensive l'éperon d'abordage au cours des combats navals. Un navire attaquant se position-

nait généralement du côté vulnérable de la ligne ennemie et procédait à une ou deux manœuvres nommées *diekplous* et *periplous* (ci-dessus).

l'attaquant profitait de la largeur réduite de la ligne ennemie et la contournait par l'une ou l'autre extrémité. Le *diekplous* et le *periplous* nécessitaient des navires capables de virer en épingle à cheveux derrière la ligne ennemie sans perte de vitesse, afin de ne pas devenir une cible trop facile.

L'usage des coussins semble ainsi avoir favorisé les Athéniens lors d'un duel entre deux galères grecques, en octobre de l'an 429 avant J.-C., au début de la guerre du Péloponnèse. Le commandant spartiate Timocrate pourchassait le vaisseau amiral *Parados* de l'Athénien Phormion, jusque dans le port. Phormion ne pouvait faire demi-tour sans exposer le flanc vulnérable de sa trière à l'éperon du Spartiate, mais un navire marchand était ancré à l'entrée du port. Lorsque le *Parados* se trouva à hauteur de ce bâtiment en stationnement, Phormion donna l'ordre de virer. En s'abritant derrière le navire marchand, l'équipage athénien exécuta un virage serré à 270 degrés, si rapide que la galère spartiate n'eut pas le temps de l'éviter. Phormion éperonna le navire ennemi par le milieu, la détruisant. Timocrate, honteux de ce soudain revirement de la situation, se donna la mort. Les Athéniens avaient ainsi profité de la technique du glissement : Phormion et son équipage parfaitement entraînés savaient virer sans perdre de vitesse.

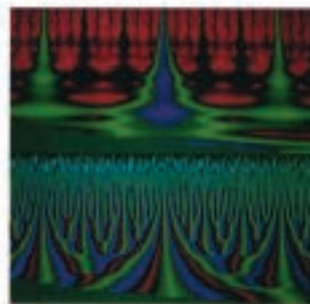
Dans certains combats, ni le *diekplous* ni le *periplous* n'étaient possibles, de sorte que l'avantage revenait alors au navire capable de virer à 90 degrés le plus rapidement possible, dans un espace aussi restreint que possible. Ainsi pouvait-on se ruer droit sur la ligne ennemie pour finir par une embardée visant à jeter l'éperon contre le flanc du vaisseau ennemi.

Le plus célèbre de ces brusques virages eut lieu à Salamine, à la fin septembre de l'an 480 avant J.-C. Au large de l'île de Salamine, une alliance de plusieurs cités grecques indépendantes, conduites par Athènes, se battit contre la flotte du roi Xerxès de Perse. La marine de Xerxès était surtout composée de bateaux phéniciens de Tyr et de Sidon (anciennes cités situées dans ce qui est aujourd'hui le Sud du Liban).

À Salamine, les Grecs ne purent recourir au *diekplous* ni au *periplous*, car l'imposante flotte perse bloquait le détroit d'une côte à l'autre. En outre, les Grecs étaient inférieurs en nombre. C'est pourquoi ils attaquèrent avant que les Perses aient eu le temps de rompre ou

**SCIENCES
D'AVENIR**

BARBARA BURKE HUBBARD
**ONDES ET
ONDELETTES**
LA SAGA D'UN OUTIL MATHÉMATIQUE



PRIX D'ALEMBERT 1996

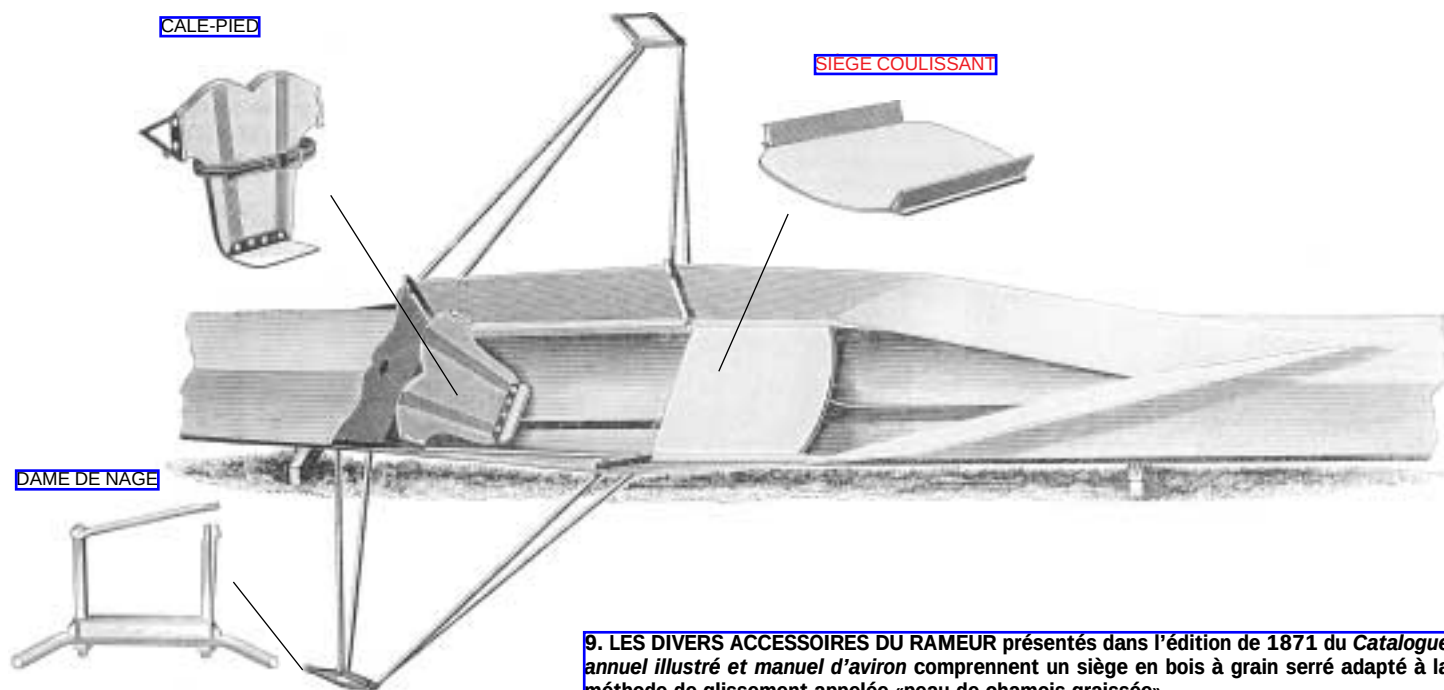
ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes est une saga moderne. Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écloie une idée, et comment ils coopèrent. Voir bon de commande p. 98

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN



9. LES DIVERS ACCESSOIRES DU RAMEUR présentés dans l'édition de 1871 du *Catalogue annuel illustré et manuel d'aviron* comprennent un siège en bois à grain serré adapté à la méthode de glissement appelée «peau de chamois graissée».

d'encercler leur ligne. Quelqu'un qui assista au combat vit un premier navire grec virer si serré que son éperon arracha la proue du vaisseau ennemi. De nombreuses avancées grecques furent ainsi victorieuses, et la ligne perse fut bientôt encombrée de navires endommagés essayant de tourner et de se réfugier à l'arrière. L'aile gauche de la ligne perse fut enfoncée, de sorte que les Athéniens purent se frayer un chemin pour effectuer un *periplous* qui encercla ainsi la flotte ennemie. Si les navires et les équipages perses avaient eu la même manœuvrabilité, les Grecs n'auraient jamais pris l'avantage initial, qui se révéla décisif.

La bataille de Salamine, qui repoussa les Perses et leurs alliés, marqua le début de la domination d'Athènes sur les îles et sur les cités de la mer Égée. Athènes s'imposa parce qu'elle consacra du temps, de l'argent et de la main-d'œuvre à la création d'une marine de métier. Les Athéniens payaient 12 000 rameurs afin qu'ils s'entraînent huit mois par an, en partie parce que la technique du glissement, pour être pleinement maîtrisée, exigeait une grande pratique.

Une technique oubliée, puis retrouvée

Pourquoi la technique du glissement fut-elle abandonnée, malgré la supériorité qu'elle conférait aux trières de guerre? Les États incapables de concu-

rer les navires athéniens finirent inévitablement par innover en mettant au point leurs propres techniques. En l'an 400 avant J.-C., les Carthaginois lancèrent les premiers quadrirèmes. Avec ce nouveau type de galères commença une course à la puissance de propulsion, la clé du succès résidant dans la multiplication du nombre de rameurs par aviron (la trière avait toujours compté un seul rameur par aviron). L'augmentation de la taille des navires et des équipages supplanta la finesse des professionnels athéniens, soumis à de longues périodes d'entraînement intensif. Les tactiques évoluèrent également. Une nouvelle manœuvre offensive, qui consistait à amener le navire ennemi bord à bord à l'aide de grappins et à passer à l'abordage, se substitua à l'éperonnage, et les galères de guerre devinrent des plates-formes mobiles de petites unités de fantassins. La technique du glissement semble n'avoir survécu que dans quelques lieux reculés. Il est fait mention du coussin du rameur pour la dernière fois sur un papyrus qui donnait la liste des matériels utilisés par les petites galères évoluant sur le Nil, plusieurs siècles après le remplacement des trières par des galères plus grandes, avec des équipages plus nombreux.

Entre-temps, Athènes était devenue la plus grande puissance navale du monde antique. Les Athéniens eux-mêmes étaient conscients du rôle qu'avait joué leur technique dans la

victoire contre la flotte de Xerxès, qui marqua le début de leur domination maritime. Une comédie d'Aristophane met en scène un vieil homme nommé Demos (il incarne le «Monsieur Tout le Monde» d'Athènes) sur le point de s'asseoir sur une pierre rugueuse. Un Athénien s'empresse de lui offrir un coussin, afin de ne pas risquer d'user son postérieur qui «fut si précieux à Salamine».

Ainsi un simple coussin fut à l'origine d'un siècle de suprématie maritime en mer Égée. Le tribut de cet empire maritime permit de construire le Parthénon, de financer la démocratie athénienne, de subventionner les pièces de Sophocle et d'Aristophane, et de créer l'Académie de Platon et d'Aristote.

John HALE est archéologue à l'Université de Louisville.

Gilbert Charles BOURNE, *A Text-Book of Oarsmanship, with an Essay on Muscular Action in Rowing*, Oxford University Press, 1925.

John S. MORRISON et John F. COATES, *The Athenian Trireme: The History and Reconstruction of an Ancient Greek Warship*, Cambridge University Press, 1986.

Christopher DODD, *The Story of World Rowing*, Stanley Paul, 1992.

Lionel CASSON, *Ships and Seafaring in Ancient Times*, University of Texas Press, 1994.

Les nombres-univers

JEAN-PAUL DELAHAYE

Votre photographie est dans la suite des puissances de 2.

La Bibliothèque de Babel est peut-être la plus merveilleuse nouvelle de littérature fantastique jamais écrite : Jorge Luis Borges y émet l'hypothèse que le monde est une immense bibliothèque dont les salles de lecture contiennent tous les livres possibles de 420 pages. Chaque page comporte 40 lignes de 80 caractères pris dans un alphabet de 25 symboles : 22 lettres, le blanc, le point et la virgule (on serait plus à l'aise en acceptant, comme en informatique, 128 ou 256 caractères différents, mais c'est sans grande importance).

Les habitants de ce monde-bibliothèque sont conscients que le nombre total des ouvrages différents d'une telle bibliothèque est fini. Il y a $25^{420 \times 40 \times 80} = 25^{1344000} = 2,35 \times 10^{1878831}$ ouvrages distincts. Les habitants doivent donc se résoudre à admettre soit que la bibliothèque est elle-même finie (aucun livre n'étant présent deux fois), soit qu'elle est infinie, mais alors elle comporte plusieurs fois les mêmes ouvrages, peut-être répétés périodiquement (c'est la théorie soutenue par le narrateur).

Tentons d'imaginer ce que signifie cette idée d'une bibliothèque incluant tous les ouvrages possibles de 420 pages. Elle contiendrait le livre composé uniquement de la lettre A imprimée 1 344 000 fois, celui composé de la suite EFGHIJ indéfiniment recopiée (un autre n'en différerait qu'à la page 100 où le J disparaîtrait). Elle contiendrait aussi le texte du prochain prix Goncourt, le texte du prochain prix Goncourt dont la dernière page a été remplacée par une page blanche, une autre version encore avec chaque 'i' remplacé par 'y', une autre version avec votre nom comme nom d'auteur, une autre avec votre nom comme nom du personnage principal, les traductions italienne, bulgare, en vieux français, en latin primitif, etc. Cette bibliothèque contiendrait aussi un livre dont les pages paires porteraient le texte de l'Évangile, et les pages impaires de

la Justine de Sade ; un livre qui serait Fictions de Borges (le recueil qui contient la nouvelle que nous examinons) écrit à l'envers, un autre qui serait Fictions comme je pourrais essayer de le reconstituer de mémoire si je m'y essayais ; un autre qui serait Fictions dont les mots auraient été classés par ordre alphabétique ; un autre qui serait Fictions sans la lettre 'e' résultant de l'exercice d'un Georges Pérec ressuscité. Il y aurait aussi, bien sûr, un livre qui énumérerait les décimales de π écrites en toutes lettres tout au long des 420 pages, mais malheureusement il y aurait aussi le même avec une erreur en page 200, et le même avec une erreur toutes les pages, et le même avec une erreur par ligne. Il y aurait aussi un livre qui raconterait votre vie, mais un autre la prolongerait de dix ans, et un autre la raccourcirait de 15 ans. J'arrête là, car la liste des possibilités est infinie... Non... Elle est finie, mais le fini très grand ne ressemble-t-il pas à l'infini ?

On pourrait réécrire la nouvelle de Borges en imaginant une filmothèque où seraient entreposés tous les films possibles enregistrés sur des disques optiques numériques (chaque disque ne comporte qu'un nombre déterminé d'informations, et le nombre de disques différents est fini). Cette filmothèque universelle contiendrait quelque part le journal télévisé de demain soir, le film des derniers instants d'Hitler, l'enregistrement sur le vif des cours que donnait Aristote il y a 2 000 ans, un résumé en une heure des 50 prochaines années de la vie sur Terre, mais aussi une multitude de films fallacieux, mal montés, incohérents, indéchiffrables, parasités ou presque entièrement noirs.

Le nombre de combinaisons de M symboles pris dans un alphabet fini de N symboles (en acceptant les répétitions) est fini : c'est N^M , car il y a N possibilités pour le premier symbole, autant pour le second, et ainsi de suite jusqu'au dernier symbole, ce qui fait en tout

$N \times N \times \dots \times N$ (M fois) combinaisons. La richesse d'un tel ensemble laisse froid le mathématicien, alors que le physicien, lui, se rend compte que certains nombres trop grands, comme celui des livres de la Bibliothèque de Babel, sont irréels. Le volume de l'Univers visible est d'environ 15 milliards d'années-lumière au cube, soit :

$$(15 \times 300\,000 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \times 100\,000)^3 \text{ cm}^3 = 2,85 \times 10^{57} \text{ cm}^3.$$

On est loin des $2,35 \times 10^{1878831}$ ouvrages du monde-bibliothèque de Borges, et donc, même si nous réussissions à remplir de livres tout l'espace à raison d'un livre par centimètre cube, l'Univers visible entier ne contiendrait qu'une infinitésimale partie de la Bibliothèque de Babel ou de la filmothèque universelle. Les nombres trop grands n'ont pas de sens physique, et peut-être pas de sens du tout.

LES SUITES-UNIVERS

Le mathématicien est plus intéressé par l'infini que par les nombres grands, mais finis (on peut penser que cette facilité sera un jour remise en question). Le mathématicien n'éprouve, par exemple, aucune difficulté à imaginer la suite des nombres entiers écrits en base dix : 0 1 2 3 ... 10 11 12 ... 99 100 101 ... Il peut la manipuler en pensée sans mal. Réalise-t-il cependant que, dans cette suite de symboles, il y a tout l'univers des livres ou films possibles que nous envisageons au-dessus, et bien plus ?

Convenons de regrouper deux par deux les chiffres et d'associer à chaque couple de chiffres un symbole pris dans un ensemble de 100 caractères (ce qui est suffisant pour obtenir une assez belle typographie et mieux que les 25 caractères de Borges). Alors, quelque part dans la suite, il y aura la séquence des chiffres correspondant au texte du prochain prix Goncourt, autre part celle du roman de votre vie, etc. Les images et le son d'un disque optique sont codés par une suite finie de chiffres, et donc, dans la suite des nombres entiers mis bout à bout, il y a quelque part le codage du film du sacre de Napoléon du 2 décembre 1804, celui du film de votre première journée d'école, etc.

Nous appellerons suite-univers toute suite de chiffres qui possède la propriété que toute séquence finie de chiffres y est présente au moins une fois. C'est le cas de la suite de chiffres 12345678910111213... (la suite des chiffres des entiers écrits en base dix les uns derrière les autres), car, par exemple, on trouve la séquence 5365 quand on arrive au nombre 5 365 (en fait, on la trouve déjà avant quand on passe

de 653 à 654). Par définition, les suites-univers contiennent donc tout livre possible, tout film possible, toute vie humaine possible, toute musique possible... tout l'Univers.

Bien que cela soit moins évident que pour l'énumération des entiers, la suite des puissances de 2 écrites en base 10 les unes après les autres (2 4 8 16 32 64 128, etc.) est aussi une suite-univers. Un théorème énonce que, pour toute séquence de chiffres $c_1 c_2 \dots c_n$, il existe une certaine puissance de 2 dont l'écriture décimale commence par $c_1 c_2 \dots c_n$. On connaît même un programme de cinq lignes (dû à Stephan Heilmayr et écrit dans le langage *Mathematica*) qui vous donne l'exposant de 2 voulu quand vous lui donnez la séquence.

Laissons-nous encore aller à imaginer ce que cela implique : il existe un entier n tel que le début des chiffres de 2^n en base 10 code le texte de la description sur 420 pages de votre visage en train de tirer la langue ; il y a aussi le texte des cinq milliards de bases AGCT correspondant à votre génome ; il y a aussi les données informatiques permettant de faire revivre la vie de Vercingétorix du début à la fin dans un appareil de réalité virtuelle : vous mettez le casque sur la tête, vous vous attachez sur l'armature du simulateur, et vous voilà projeté en arrière dans le temps. Et c'est vrai aussi de toutes les autres vies humaines passées ou futures qui se trouvent là, dispersées au fil des décimales des puissances de 2.

LES NOMBRES-UNIVERS

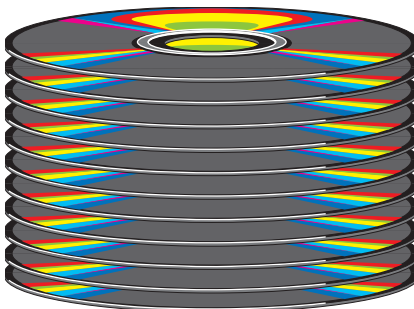
Convenons d'appeler nombre-univers un nombre dont la suite des décimales est une suite-univers. Existe-t-il beaucoup de nombres-univers ?

On sait qu'un nombre réel rapport de deux entiers (comme $2/3$, $150/235$, etc.) a une suite de décimales qui n'est pas une suite-univers, car périodique : quand on fait la division, on retombe, à un moment ou un autre, sur un reste obtenu précédemment, et donc tout recommence.

Pour les nombres non rapport de deux entiers – on dit irrationnels –, comme $\sqrt{2}$, π , e , personne ne sait si ce sont des nombres-univers. On ne sait d'ailleurs même pas si π , à partir d'un certain rang, s'écrit sans utiliser de '0' (ou sans '1', ou sans '2', etc.) : on juge que c'est improbable (que peut vouloir dire «improbable» dans un tel cas ?), mais rien n'est démontré. On pense en général que π est un nombre-univers, et j'ai d'ailleurs trouvé sur *Internet* à l'adresse suivante : <http://gryphon.ccs.brandeis/~grath/attractions/gpi/>



1. Borges avait imaginé la bibliothèque de Babel contenant tous les livres de 420 pages : un de ces livres contient l'histoire de votre vie. On peut souhaiter qu'une partie (infime) de cette bibliothèque soit réunie dans celle de l'abbaye d'Admont, en Autriche.



2. Un disque optique comporte environ 5 000 000 000 de bits d'information. Il n'y a donc qu'un nombre fini de disques optiques différents possibles ($2^{5\,000\,000\,000}$). On peut alors imaginer, comme Borges le propose avec sa bibliothèque de Babel, une filmothèque universelle réunissant tous les disques optiques possibles. Tout film passé ou futur se trouve dans la filmothèque.

SUITE-UNIVERS DES PUISSANCES DE 2									
1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
1024	2048	4096	8192	16384	32768	65536			
131072	262144	524288							

NOMBRE-UNIVERS DE LA SUITE DES ENTIERS									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

3. Les suites-univers. Une suite-univers est, par définition, une suite qui contient toute séquence finie. La suite des puissances de 2 en base 10 est une suite-univers : toute séquence s'y trouve, tout comme dans la suite des décimales du nombre-univers. Quelque part il y a votre date de naissance, ailleurs il y a la version numérique du film de vos épreuves orales de baccalauréat, etc.



4. L'infinité des mondes et l'infinité de vos jumeaux. Si (1) l'Univers est infini, (2) il y a une infinité de galaxies et (3) il existe un principe qui fait que chaque combinaison de particules élémentaires se présente avec une probabilité non nulle dans une galaxie, alors toute combinaison de particules élémentaires est réalisée une infinité de fois dans l'Univers. Et donc il y a une infinité de personnes parfaitement semblables à vous en train de lire ce numéro de *Pour La Science*. Ce problème «de la duplication» gêne certains cosmologistes.

5. Les nombres-univers sont très nombreux

Non seulement il existe des nombres-univers, mais, en réalité, ils sont très nombreux. En voici la preuve en deux étapes.

(a) Il y a une infinité non dénombrable de suites de Pile ou Face (version binaire du principe de diagonalisation de Cantor). Supposons qu'on puisse associer, sans répétition et sans en oublier, un nombre entier à chaque suite de Pile ou Face, par exemple :

```
0 → P P F F P P...
1 → F P F F P P...
2 → F P P F F P...
...
```

La suite obtenue en prenant la diagonale et en échangeant **P** et **F** n'est pas dans cette liste (car elle diffère par son premier élément de la première suite, par son deuxième élément de la deuxième liste, etc.). Il est donc impossible de numéroter les suites infinies de P et de F par des entiers : l'infini des suites de Pile ou Face est donc strictement plus grand que l'infini des entiers. On dit : il y a une infinité non dénombrable de suites de Pile ou Face.

(b) Il y a une infinité non dénombrable de nombres-univers. On part du nombre-univers 0,1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11... On prend une suite infinie de PF quelconque. On permute '1' et '2' si le premier élément est P ; sinon, on ne permute pas. On permute '3' et '4' si le second élément est P, etc. Par ce procédé, deux suites de Pile ou Face différentes donneront deux nombres-univers différents. Il y a donc une infinité non dénombrable (plus grande que celle des entiers) de nombres-univers différents.

un programme qui recherche pour vous si votre date de naissance ou toute séquence qui vous intéresse est dans les décimales de π . J'ai ainsi appris qu'une suite de sept 7, soit 7777777, se trouvait dans π à partir de la décimale 3 346 229.

L'ignorance dans laquelle nous sommes pour $\sqrt{2}$, π , e est en partie compensée par l'élaboration de nombres irrationnels et même transcendants (non solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers) qui sont des nombres-univers, ou au contraire ne le sont pas. Le nombre 0,101001000001... ($n!$ fois le '0' entre deux '1') est transcendant, mais n'est pas un nombre-univers. Le nombre 0,1020030000004... ($n!$ fois le '0' entre l'écriture décimale de n et de $n + 1$) est un nombre-univers transcendant.

Notons que les nombres incompressibles, c'est-à-dire que l'on ne peut coder sous une forme plus concise, sont tous des nombres-univers. Si un nombre, 47 par exemple, manque dans un nombre A , alors ce nombre A peut être codé plus économiquement en évitant le signe 47, en remplaçant 48 par 47, 49 par 48, etc. La suite ne comporte plus 99, et l'on peut écrire le nombre A en base 99, ce qui donne une séquence de chiffres un peu plus courte. Un nombre qui n'est pas un nombre-univers est donc compressible, ce qui, dit autrement, signifie : tout nombre incompressible est un nombre-univers. On démontre qu'il y a une infi-

nité de nombres incompressibles, donc de nombres-univers.

Un moyen simple et direct de construire une infinité non dénombrable (plus grande que l'infini des entiers) de nombres-univers est indiqué sur la figure 5.

L'INFINI ET LES POSSIBLES

J'ai lu, il y a quelques mois, la remarque suivante qui semble être en rapport avec ce que nous examinons ici : «S'il existe un nombre infini de galaxies, toutes les combinaisons possibles présidant à la naissance et à l'existence d'un être vivant doivent se produire un nombre infini de fois : il existe non seulement une infinité de mondes, mais aussi une infinité d'individus ayant la même structure que n'importe quel individu de notre Terre : vous ou moi.»

Vous avez remarqué, j'imagine, que ce raisonnement est faux. L'infini autorise certains délires, et nous nous y sommes laissés aller avec nos énumérations de tout à l'heure, mais il n'autorise pas à dire n'importe quoi. C'est à G. Cantor que nous devons la démonstration qu'il existe une science rigoureuse de l'infini, dont les mathématiciens découvrent les lois, et qui permet d'affirmer à propos de l'infini certaines choses et en interdit d'autres. L'auteur des lignes citées pense, semble-t-il, que dès qu'un

ensemble est infini alors tout est dedans, et même que tout y est inclus une infinité de fois. C'est clairement inexact : l'ensemble des nombres s'écrivant avec les chiffres pairs 0, 2, 4, 6, 8 par exemple est infini et pourtant il ne contient pas tous les nombres, puisque 3 n'y est pas, ni 123, ni 25267!

Même si tout infini est grand (par nature!), tout infini n'est pas tout!!!

Malheureusement pour notre goût de l'éternité et notre souhait qu'il y ait d'autres formes de vie dans l'Univers : même s'il existe un nombre infini de galaxies, il se peut que la vie ne soit apparue qu'une fois, et qu'il n'y ait nulle part ailleurs un individu possédant la même structure que vous ou moi.

Il existe cependant un résultat de la théorie des probabilités qui explique peut-être l'erreur mentionnée. Si l'on tire au sort indéfiniment des chiffres, chaque chiffre ayant une probabilité non nulle d'être obtenu (par exemple 1/10) alors la suite infinie construite ainsi est, avec une probabilité 1, une suite-univers et donc toute suite finie de nombres se présentera si l'on sait attendre assez longtemps.

On affirme parfois qu'un singe tapant au hasard sur une machine à écrire finit à un moment ou un autre par écrire *Le songe d'une nuit d'été* de Shakespeare ou l'encyclopédie *Larousse* en 20 volumes. Si on prend la précaution de préciser que les choix du singe suivent une loi de probabilité qui n'omet aucune touche de la machine, c'est tout à fait exact d'après le résultat cité (*voir un raisonnement direct sur la figure 6*).

On peut aussi tirer du résultat probabiliste mentionné que si l'Univers est infini, qu'il comporte une infinité de galaxies et que les particules élémentaires à l'intérieur de chaque galaxie occupent une configuration (parmi un nombre de configurations possibles qu'on suppose fini) en respectant une loi de probabilité qui n'attribue une probabilité nulle à aucune configuration (ce qui n'est pas invraisemblable si l'Univers mélange bien tout), alors il est vrai maintenant que «toutes les combinaisons possibles présidant à la naissance et à l'existence d'un être vivant doivent se produire un nombre infini de fois : il existe non seulement une infinité de mondes, mais aussi une infinité d'individus ayant la même structure que n'importe quel individu de notre Terre : vous ou moi».

Perspectives troublantes! Certains cosmologistes comme John Barrow et Franck Tipler n'hésitent pas à les évoquer et à s'interroger sur ce qu'ils dénomment le «problème de la duplication», dont ils remarquent malicieusement que, s'il se pose vraiment, alors ils ne sont certainement pas les seuls à s'y intéresser.

L'idée que, dans certains types d'univers, tout est présent plusieurs fois entraîne qu'en un certain sens chacun de nous est éternel : lorsque vous mourrez ici sur Terre, un autre vous-même, ailleurs, vit les choses légèrement différemment et reste vivant. C'est le thème d'un livre étrange de Frank Tipler, *The Physics of Immortality*, paru l'année dernière aux éditions Doubleday et dont les spéculations sauvages ont provoqué des commentaires outragés de nombreux de ses collègues.

PROBLÈMES SUR LES NOMBRES-UNIVERS

Les nombres-univers sont des objets fascinants, puisqu'ils contiennent, par définition, toutes les combinaisons possibles de chiffres et donc, sous forme numérique, tous les livres, tous les films, toutes les vies, etc. On peut cependant assez aisément démontrer des propriétés simples de ces nombres. En voici quelques-unes sous forme de petits problèmes.

Problème 1. Est-il vrai que, dans un nombre-univers, chaque séquence est présente non seulement une fois (comme la définition le demande), mais une infinité de fois ?

Réponse. Oui. Considérons une séquence c . Chacune des séquences $c0$ (c suivie de '0'), $c10$ (c suivie de '1' et de '0'), $c110$, $c1110$, etc., est présente au moins une fois, et donc la séquence c est présente une infinité de fois.

Problème 2. Est-il vrai qu'en modifiant un nombre fini de chiffres d'un nombre-univers, il le reste ?

Réponse. Oui. Soit c une séquence finie de chiffres, elle est présente une infinité de fois (problème précédent), donc en modifiant un nombre fini de chiffres du nombre-univers s , on ne touche qu'un nombre fini d'exemplaires de la séquence c , qui est donc présente (une infinité de fois) dans le nombre modifié.

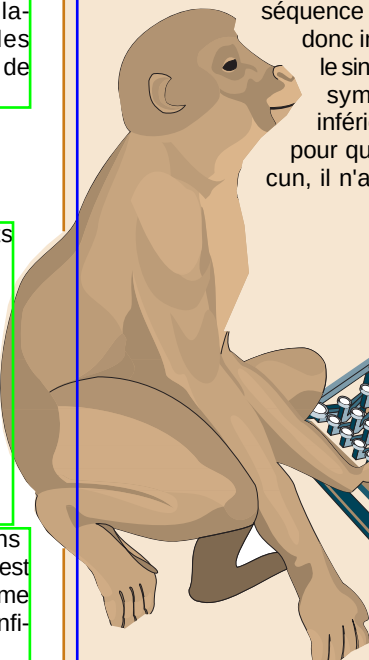
Problème 3. La somme de deux nombres-univers est-elle toujours un nombre-univers ?

Réponse. Non. Soit c un nombre-univers, soit le nombre c' obtenu en «complémentant c », c'est-à-dire en prenant pour décimale numéro i le complémentaire à 9 de la décimale numéro i (le complémentaire de 0 est 9, le complémentaire de 1 est 8, etc.). Le nombre $c + c'$ possède la suite de décimales 0,99999999... et n'est donc pas un nombre-univers. Je ne connais pas la réponse à la même question pour le produit : un lecteur saura-t-il y répondre ?

Problème 4. Le mélange par inter-pénétration de deux nombres-univers (un

6. Le singe qui tape au hasard

Supposons qu'à chaque fois que le singe tape sur une touche de sa machine, la probabilité pour qu'il tape un 'a' soit supérieure à $1/1\,000$. De même pour le 'b', etc. Donnons-nous une séquence s de 500 000 symboles (un texte de Shakespeare, par exemple). Alors la probabilité pour que le singe tape, dès son premier essai, la séquence s est supérieure à $1/1\,000^{500\,000}$, ce qui est très faible, mais non nul. La probabilité pour que le singe ne tape pas la séquence s lors des premiers 500 000 symboles qu'il écrit est donc inférieure à $1 - 1/1\,000^{500\,000}$. La probabilité pour que le singe ne tape pas la séquence s lors des premiers 500 000 symboles ni lors des 500 000 symboles suivants est inférieure à $(1 - 1/1\,000^{500\,000})^2$. De même, la probabilité pour que, au bout de m essais de 500 000 symboles chacun, il n'ait pas écrit s , est inférieure à $(1 - 1/1\,000^{500\,000})^m$.



Lorsque m augmente, c'est-à-dire quand le singe tape indéfiniment sur sa machine, la probabilité de ne pas voir apparaître s tend vers 0 (on utilise le fait que, si r est un nombre positif strictement inférieur à 1, alors r^m tend vers 0 quand m tend vers l'infini). Autrement dit, voir apparaître s devient de plus en plus probable : à un moment ou à un autre, le singe écrit le texte de Shakespeare.

bout du premier, un bout du second, un bout du premier, etc.) en est-il toujours un ?

Réponse. Non. Si on mélange deux fois le même nombre-univers par bouts de longueur 1 (un chiffre du premier, un chiffre du second, etc.), on n'a plus que des chiffres doublés 115544..., ce qui ne peut pas être un nombre-univers, puisque 123, par exemple, ne sera pas présent.

Problème 5. Existe-t-il toujours une façon de faire le mélange par inter-pénétration de deux nombres-univers de façon à obtenir un nombre-univers ?

Réponse. Oui. Soit S et S' deux nombres-univers. On fait la liste de toutes les séquences finies $c_1, c_2, \dots, c_N, \dots$. On construit un nouveau nombre-univers S'' de la façon suivante. On prend un bout de S assez long pour que c_1 y soit présent (c'est possible, car S , par définition, contient une infinité de fois c_1), on prend un bout de S' assez long pour que c_2 soit dedans (c'est possible), on prend un bout de ce qui reste de S assez long pour que c_3 soit dedans, etc. Par construction, S'' est un nombre-univers.

Problème 6. Dans un nombre-univers, la probabilité de tomber sur un '1' peut-elle être nulle à l'infini ?

Réponse. Oui. Le nombre-univers transcendant évoqué plus haut 0,1020030000004... donne la réponse : la probabilité de tomber sur un '1' (ou un '2', etc.) est nulle à l'infini, car les zéros sont de plus en plus nombreux.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et techniques de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

Jorge Luis BORGES, *Fictions*, éditions Gallimard, Paris, 1951.

Franck J. TIPLER, *The Omega Point as Eschaton : Answers to Pannenberg's Questions for Scientifics*, Zygon, vol. 24, n° 2, pp. 217-253, 1989.

David GALE, *Popular Mathematics*, in *Math. Intel.*, vol 14, n° 3, pp. 62-64, 1992 (pour une preuve de ce qui est affirmé sur 2').

John D. BARROW et Franck J. TIPLER, *Is the Universe Big Enough to Contain all Possibilities?*, R.R. 1993.

Jean-Paul DELAHAYE, *Cinq classes d'idées, chapitre 3 de Information, complexité et hasard*, éditions Hermès, Paris, 1994.

Franck J. TIPLER, *The Physics of Immortality*, Doubleday, 1994.

Mère punaise

Texte et photographies : Bernard Chaubet

Hormis chez les espèces sociales (fourmis, abeilles, termites...), les comportements parentaux sont assez rares dans le monde des insectes. Le plus souvent, la descendance est laissée sans soins particuliers. Certains papillons, par exemple, pondent en vol, sans se soucier de l'environnement où évoluera leur progéniture. Une fois éclos, la chenille doit trouver elle-même sa provende.

Parfois les œufs sont déposés dans un abri naturel ou créé pour la circonstance ; ce comportement dénote une stratégie élémentaire de protection.

La punaise *Elasmotherus interstinctus* va plus loin dans les soins maternels puisque, une fois la ponte déposée, elle monte une garde assidue, couvrant de son corps sa progé-

ture avant et après l'éclosion. Tel un bouclier vivant, elle s'incline en direction du danger.

Après l'éclosion des jeunes punaises, si celles-ci se déplacent, la mère suit le mouvement. Parasol mobile, elle surplombe ses petits rassemblés sous son couvert. Enfin, après la première mue larvaire, la femelle abandonne sa descendance. Les petites punaises conserveront quelque temps encore leur instinct grégaire, puis chacun et chacune vivra sa vie.

Elasmotherus interstinctus vit sur le bouleau, où elle n'est pas rare. Elle se nourrit de feuilles en absorbant le contenu cellulaire au moyen de son stylet. On observe les couvains dès le début du mois de juin.





Protection de la nature

À la découverte des réserves naturelles de France

Françoise Mosse. Éditions Nathan, RNF, 1996.

Ce magnifique ouvrage, réalisé avec l'aide du ministère de l'Environnement, ne constitue pas seulement une présentation de l'état du patrimoine naturel préservé dans notre pays au sein des réserves naturelles ; il apporte un éclairage précis et précieux sur cette notion elle-même, qui n'est pas clairement perçue par la plupart de nos contemporains ni même, paradoxalement, par quelques-uns des plus ardents défenseurs de la nature.

Pour certains d'entre ces derniers, créer des espaces protégés impliquerait le droit de saccager les milieux partout ailleurs et d'y anéantir les espèces vivantes jugées sans utilité économique : les réserves seraient ainsi des îlots de «nature en bocal» au sein d'un désert biologique dévasté par l'urbanisation et par l'agriculture intensive. Plutôt que de sauver à tout prix des espèces ou des écosystèmes singuliers par leur originalité ou menacés d'extinction, il importerait donc avant tout de préserver les formations végétales (forêts, prairies...)

constituant la «nature ordinaire». Cette préoccupation est légitime, d'autant que la «nature ordinaire» peut, en quelques décennies, devenir «extraordinaire» : la lande armoricaine, autrefois banale, se réduit comme peau de chagrin, de même que les formations dunaires de notre littoral ; hors des camps militaires, au sort incertain compte tenu de la prochaine réforme de nos armées, il ne subsiste, en Champagne crayeuse, que de minuscules témoins des savants xériques et de l'immense pinède à flore montagnarde qui ont successivement couvert toute cette région jusqu'aux années 1950... C'est d'ailleurs à cette préoccupation que répond, au moins pour partie, la directive européenne «Habitats» du 21 mai 1992, dont la première phase d'application, en cours de discussions ardues, est le recensement des «sites Natura 2000». Il faut être enfin conscient que des milieux ne peuvent être «réservés» (en principe, «préservés») en étant écologiquement isolés des divers écosystèmes de «nature ordinaire» qui les entourent (notamment ceux du même bassin versant), et dont ils sont nécessairement solidaires.

Le mot même de «réserve» est souvent mal compris. Certains imaginent qu'il s'agirait de territoires réservés aux études et aux expériences des chercheurs. L'ouvrage de Françoise Mosse fait justice de cette opinion : l'objectif premier des réserves naturelles n'est pas la recherche scientifique, même si les espèces ou les milieux souvent très originaux réfugiés en leur sein méritent études (ne serait-ce qu'en vue de leur conservation). D'autres ne conçoivent les réserves qu'«intégralement», c'est-à-dire qu'en leur sein la pré-

sence de l'homme devrait être à jamais exclue. Si la conservation de certains sites, notamment forestiers, est compatible avec l'interdiction absolue de toute intervention humaine, il est vite apparu, au moins sur notre territoire métropolitain, que, pour les milieux soumis de très longue date aux actions anthropiques (ils sont qualifiés de semi-naturels), l'arrêt de ces interventions (fauche des prairies, pacage extensif des pelouses sèches ou des landes...) aboutit très vite à l'appauvrissement de leur flore et de leur faune. Dans la grande majorité des sites, la préservation de la biodiversité, objet essentiel de la création de réserves, repose donc sur une gestion raisonnée, en fonction de l'écologie des espèces et des écosystèmes à préserver, fondée principalement sur le maintien (ou la reprise) des activités humaines traditionnelles. Dans la *Lettre des réserves naturelles* (n° 38, 1996), le récent article de Jacques Lecomte, éminent spécialiste de ces problèmes, apporte à ce sujet (et sur les autres points évoqués ci-après) d'utiles éléments de réflexion.

Les méthodes de conservation des milieux semi-naturels, fondées sur le «génie écologique», restent encore largement empiriques : le comité de gestion attaché à chaque réserve digne de ce nom propose leur mise en œuvre, examine leurs résultats et doit les modifier en cas de nécessité. Les gestionnaires sont toutefois certains que, si chaque écosystème requiert des méthodes spécifiques de conservation, celles-ci ne sont pas uniformément applicables à la totalité des milieux de même type dans des réserves géographiquement éloignées.

Pratiquée par une dizaine d'organismes, dont la part respective d'activité est précisée dans l'ouvrage, cette gestion entraîne des frais importants, alors même qu'elle s'appuie sur un nombre considérable de bénévoles. Il faut souligner que la préservation d'un milieu en équilibre, même précaire, comme une pelouse héliophile entretenue par le pacage extensif, est d'un coût infiniment plus faible que la restauration (aléatoire) d'une telle pelouse envahie depuis des années par des buissons à la suite de la déprise agricole. Dans tous les cas, l'action préventive est à la fois plus efficace et plus économique : le retard apporté à la création de certaines réserves représente donc non seulement un risque de banalisation à brève échéance pour nombre de milieux fragiles, mais encore la perspective de frais élevés pour tenter de leur rendre leur richesse.

Rappelons enfin que, même si la création de la plupart des réserves repose sur le souci de conserver prioritairement soit une faune menacée, soit une flore



Le lac Luitel (Isère) et sa tourbière flottante, enchâssés dans la forêt montagnarde. La première réserve créée en France, en 1961.

relictuelle, soit même un gisement géologique d'intérêt national, les interactions entre les diverses composantes des écosystèmes en cause sont telles que leur préservation, donc leur gestion, ne doit pas privilégier l'une par rapport aux autres.

Les réserves sont-elles des sanctuaires interdits au public ? Ici encore, tout dépend de la nature et de la fragilité des milieux en cause ; dans quelques cas, toute pénétration humaine constitue un danger et doit se limiter aux quelques personnes habilitées, respectant les plus grandes précautions. En revanche, le plus souvent, l'accueil du public reste possible dans des conditions contrôlées. Si cet accueil ne constitue nullement l'objectif principal des réserves naturelles, beaucoup d'entre elles jouent un rôle pédagogique apprécié, qui vise à pallier les lacunes actuelles de la culture naturaliste et écologique quelque peu négligée dans notre enseignement. Elles sont équipées pour recevoir, sans danger pour les milieux parcourus, des visiteurs attirés par la beauté ou par la singularité de leurs paysages ou par la diversité des plantes et des animaux vivant au sein de ces milieux préservés. Ces visiteurs, dont le nombre dépasse à ce jour quatre millions, sont le plus souvent encadrés par des guides compétents qui les amènent à «une meilleure connaissance de la nature et de son fonctionnement» et leur font comprendre la nécessité comme les méthodes de la préservation de la biodiversité.

L'ouvrage de F. Mosse est nécessairement limité aux réserves naturelles françaises créées par arrêtés ministériels, celles dont la réglementation a été examinée et validée par les instances officielles accréditées (dont le Conseil national de protection de la nature). Il donne toutefois des informations sur les autres types d'espaces protégés, à la réglementation et aux procédures de création variables : parcs nationaux, territoires acquis par le Conservatoire du littoral, réserves privées, notamment propriétés d'associations de protection de la nature, réserves domaniales de l'Office national des forêts, réserves volontaires, arrêtés de biotopes... Par ailleurs, l'introduction fait le point sur la nécessité d'une méthodologie pour la connaissance et l'évaluation du patrimoine naturel de notre pays et sur les textes nationaux et internationaux (arrêtés ministériels, directives européennes, labels internationaux...) qui ont en vue la protection légale des espèces et de leurs biotopes.

Le cœur de l'ouvrage présente les réserves naturelles selon 12 grands ensembles géographiques pour la métropole, un treizième concernant l'outre-mer. Ces chapitres sont précédés d'un com-

mentaire biogéographique et écologique, illustré par de superbes photographies et d'une carte régionale de situation des réserves. Celles-ci sont l'objet de monographies précises, chacune appuyée sur deux photographies (généralement un paysage caractéristique et une espèce représentative), pour la plupart splendides et en même temps d'une parfaite valeur démonstrative. Outre une description détaillée des milieux significatifs, des particularités de la flore, de la faune, éventuellement de la géologie, on trouvera toutes précisions sur la localisation de la réserve (avec une carte à grande échelle des principaux groupements végétaux), sa date de création, les organismes gestionnaires, les conditions d'accès et d'accueil, les autres mesures de protection, notamment européennes, concernant ce territoire, sa géologie et sa géomorphologie, le recensement des milieux et des espèces de faune et de flore protégées ou rares...

En dépit du nombre annoncé de «126 itinéraires», l'analyse porte en fait sur 122 sites, la plus récente création prise en compte étant celle de la réserve des landes de Versigny, dans l'Aisne (10 mai 1995). La différence tient au fait que deux réserves ont été jugées (avec raison) trop fragiles, les informations données à leur sujet risquant d'entraîner des risques de dégradation ; deux autres ont vu le jour entre la rédaction et la parution de l'ouvrage : rappelons que le processus n'est heureusement pas interrompu, même si la création d'une réserve naturelle est un parcours long et semé d'obstacles ; une dizaine de sites nouveaux sont en cours de classement, d'autres, également de grande valeur patrimoniale, sont en attente... Les réserves citées couvrent tout de même 140 000 hectares ; si elles renferment 80 pour cent des espèces protégées de la faune française, ce nombre tombe à 40 pour cent pour la flore... On ne peut même pas invoquer ici le banal cliché du verre à moitié plein !

Ce remarquable ouvrage suscite cependant quelques regrets : il est dommage que l'auteur n'ait pas pu se concerter avec Michel Baffray et Philippe Danton, dont l'ouvrage sur les plantes protégées en France a été publié chez le même éditeur et est antérieur de plusieurs mois. Il en résulte que la liste des espèces végétales protégées relative à chaque réserve est en partie erronée, puisqu'elle ne tient pas compte de l'arrêté ministériel du 31 août 1995 modifiant celui du 20 janvier 1982.

Quelques affirmations méritent rectification : ainsi le rôle estimé favorable de l'incendie dans la conservation de la lande de Versigny (alors que l'effet néfaste du feu a été dénoncé dans plusieurs publi-

cations concernant ce même site)... Mais, de par la nature même de son contenu, ce très beau livre, presque un ouvrage d'art, ne pourra manquer d'avoir d'autres éditions. Souhaitons-les prochaines, puisqu'elles seraient le signe de la création d'un nombre important de nouvelles réserves naturelles.

Marcel BOURNERIAS

Chimie

The Same and not the Same

Roald Hoffmann. Columbia University Press, 1995.

La chimie a besoin de défenseurs passionnés, car bien qu'indispensable, elle reste dans l'ombre. Paradoxalement elle est si présente qu'elle passe inaperçue et qu'elle est sous-estimée. Que serions-nous pourtant sans essence, sans médicaments, sans fibres et sans engrais, fruits de la chimie ? D'autre part, l'invention a ses risques, dont Dédale a souffert ; une certaine presse laisse croire que l'actualité chimique se réduit à des accidents. Enfin on pourrait regretter que la discipline qui s'intéresse à la matière, bien concrète, se fonde sur des abstractions : les explications chimiques emploient les concepts d'entropie, d'énergie, d'atomes ou d'électrons.

Peu de chimistes ont les capacités, ou la volonté, de combler ce fossé entre l'abstraction et le quotidien. Pourtant, comprendre le monde matériel en termes d'atomes ajoute à la richesse et au délice de notre compréhension du monde. Roald Hoffmann, professeur à l'Université Cornell et prix Nobel de chimie, est un défenseur passionné de sa discipline. Le titre de son livre, *Le même et pas le même*, reconnaît les tensions dialectiques de la discipline. Non seulement il montre comment la maîtrise du monde suscite des risques inévitables, mais il dégage d'autres oppositions de la chimie : le statique et le dynamique, la création et la découverte, le naturel et l'artificiel, le connu et l'inexpliqué, montrant comment ces termes opposés sont souvent si mêlés qu'ils en deviennent indiscernables.

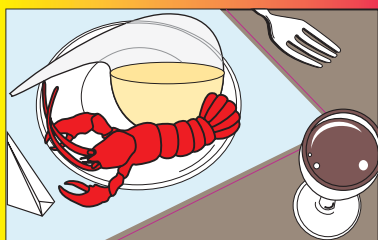
R. Hoffmann révèle, par exemple, une des grandes idées de la chimie : la chimie est dynamique même quand elle considère des équilibres : même quand rien ne semble se passer, les réactions sont incessantes au niveau moléculaire, les produits de réaction se formant exactement aussi vite qu'ils se décomposent. Cet équilibre

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 30 juillet 1996.



dynamique, sous la surface de l'ostensiblement statique, provoque un réseau subtil de réactions qui forment la vie.

Poète et prix Nobel, R. Hoffmann connaît bien la différence entre la pratique de la chimie – et de la science en général –, où intervient la découverte, et la pratique des arts, qui est principalement création. Pourtant il remarque que les progrès de la chimie dépendent également d'une pensée créative et que les arts, d'autre part, trouvent une grande partie de leur force dans la révélation de ce qui était caché.

Dans sa discussion du naturel et de l'artificiel, R. Hoffmann indique combien il est ambigu de chercher une distinction entre les produits recueillis dans la nature et leurs contreparties synthétiques (souvent calomniées). Un des principaux rôles de la chimie est l'identification des propriétés pharmaceutiques des composés dispersés dans le monde naturel et la recherche de méthodes pour produire ces composés actifs en quantité suffisante pour soigner les peuples. À ce stade, je comprends mal R. Hoffmann quand il mentionne que la révélation et l'accaparement sont une des oppositions essentielles de la chimie. Évoque-t-il l'art de la publication scientifique, où l'objectif est de montrer ? Il dit que les processus éditoriaux actuels cachent les faux pas et les sauts intuitifs qui font progresser la science, et il mentionne que les articles scientifiques masquent une tension, et que la révélation de cette tension est «une reconnaissance de la profonde humanité de l'acte créatif en science».

Bien qu'il y ait beaucoup plus dans le livre que ce que j'en ai dit ici, je crains qu'il y en ait bien moins. En tant que chimiste, j'apprécie l'amour de R. Hoffmann pour la science, qui lui a fait faire tant de belles découvertes, mais je peine souvent à le lire : à vouloir être «humaniste», R. Hoffmann nous assène trop de prose tourmentée, telle que «les minerais naturels, l'utilisation artificielle des hauts fourneaux et les techniques de métallurgie sont utilisés par l'homme naturel dans l'acte artificiel de la sculpture pour manipuler des éléments les plus naturels...» En d'autres endroits, l'auteur emploie des termes techniques sans les expliquer : «adsorbés», «élué», «dichlorométhane», «fraction», «chromatographie en phase gazeuse», employés au début du livre, feront décrocher les lecteurs non chimistes.

Le livre est composé de nombreux petits chapitres, ou mini-essais. Bien que nombre d'entre eux puissent être considérés comme des vignettes provocantes quand ils sont isolés, leur succession ininterrompue donne l'impression de banalité. Mais peut-être faut-il butiner et non avaler l'ensemble d'un coup.

Enfin un mot d'avertissement pour les tous les adeptes de R. Hoffmann : le titre de son livre est bien choisi, car 18 des 51 chapitres ont déjà été publiés, puis présentés sous la forme de cours en 1990.

R. Hoffmann aime sans doute écrire. Mais au total, son livre plaira plutôt à ceux qui aiment savoir comment les scientifiques pensent et à ceux qui aiment recueillir des preuves de la non existence de la dichotomie de la culture.

Peter ATKINS

Biologie

Les créationnistes

Jacques Arnould. Éditions du Cerf, 1996.

Ce petit ouvrage livre les réflexions d'un religieux sur les réponses que l'Église peut et doit apporter aux créationnistes. Ce mouvement fondamentaliste est né dans le creuset de l'Amérique puritaine et calviniste de la seconde moitié du XIX^e siècle, en réaction, dit-on, à la parution de *L'origine des espèces*, de Charles Darwin (1859), mais plus généralement à toute idée transformiste. Depuis, il tente d'opposer à «la descendance avec modification par la sélection naturelle» une théologie prétendue tout aussi naturelle, et s'en tient à une lecture littérale de la Genèse.

Il appartient donc à toute une vague d'anti-évolutionnisme qui s'est manifestée alors – le Ku Klux Klan (1866) n'en est pas le moindre épigone – et qui reste tout aussi houleuse 150 ans après Darwin. Depuis la fondation de leur mouvement et, entre autres, au travers de divers procès dont le plus célèbre est le procès du Singe (1925), les créationnistes humilient régulièrement et tout à fait officiellement la communauté scientifique tout entière. Ils ont même réussi à trouver un avocat en Ronald Reagan, lorsqu'il était président des États-Unis, et à quasiment exclure de l'enseignement secondaire de ce pays toute référence au darwinisme. Dernier épisode, ils tentent d'établir des bases scientifiques à leurs propositions théologiques, sans résultat il est vrai, mais cela ne semble pas les porter à infléchir leur réflexion.

Après avoir rendu compte de l'histoire du créationnisme et de ses démêlés avec la société laïque aux États-Unis, l'auteur tente d'apporter quelques suggestions, afin surtout, et c'est ce qui lui importe le plus, que ne soit pas rompu le dialogue

entre, d'une part, les créationnistes, qu'il considère comme des égarés et, d'autre part, les Églises, en particulier leurs théologiens. C'est donc avant tout un ouvrage qui s'adresse aux croyants troublés par les démêlés judiciaires et l'impact médiatique certain qu'ont réussi à susciter les créationnistes outre-Atlantique. Reconnaissons que, jusqu'ici, le créationnisme a trouvé peu d'échos dans le pays de Descartes, mais il n'est pas inintéressant que l'on se penche chez nous sur ces mouvements de pensée : la culture américaine a la volonté et les moyens techniques et économiques de pénétrer la nôtre. Tôt ou tard, la même vague fondamentaliste a toutes chances de nous affecter, sous sa forme originelle ou en ersatz.

Si la partie historique de ce petit livre pose bien les données du problème, on s'aperçoit ensuite que les réponses apportées par l'auteur sont du ressort de recettes bien classiques. En effet, qu'il vienne ou non de scientifiques, de croyants ou d'agnostiques, on nous a déjà servi ce refrain qui consiste à ressasser qu'il convient de diviser le champ de la réflexion des hommes en deux niveaux étanches : la science doit s'occuper du comment, la théologie du pourquoi. Notre histoire naturelle serait-elle

un fardeau si lourd à porter que nous adoptions une stratégie qui nous condamnerait de fait à éluder ces deux questions existentielles : l'homme est-il vraiment différent des autres êtres vivants ? Dieu le créa-t-il à son image ou fut-ce l'inverse ?

Nous voici cependant rassurés sur deux points : les évolutionnistes darwiniens n'ont plus à craindre un procès galiléen ; mieux, les croyants qui nient la réalité de l'évolution biologique sont considérés par l'Église comme de dangereux trublions, et l'auteur n'apprécie guère, et on le comprend, l'intrusion créationniste dans la politique et l'enseignement, servie par des médias plutôt complaisants. Il n'en demeure pas moins que, comme les scientifiques, il semble que les théologiens n'arrivent pas à contrer, de façon qu'il perde tout crédit auprès du public, un mouvement de pensée dont le sectarisme est la qualité première. Peut-être les uns et les autres sommes-nous trop ambitieux en souhaitant éradiquer cette dérive des esprits : il n'y aura jamais de bataille définitive à mener qui réussisse à jeter à bas l'adversaire. Nous devons conduire de multiples combats, en toutes occasions refuser ses assertions et, par là, le priver de tout droit de cité.

Jean-Louis HARTENBERGER

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Robert Rodriguez. Pp. 7 et 8 : doc. Pp. 10 à 12 : Georges Bram. PLS. P. 13 : C.M. Hladik. P. 14 : Équipe Astriane, télescope du Pic du Midi. P. 15 : Rodger Doyle. P. 16 (en bas) : Isabel Loyola. Pp. 16 (en haut) et 17 : doc. PLS. P. 20 : Jacana. P. 21 : M. Troncy/HOAQUI. P. 22 (à gauche) : doc. PLS. P. 22 (à droite) : Wolf Dietrich Nieweier, Scientific American. P. 24 : Della Giustina. P. 25 (en bas) : Catherine Perrin. P. 25 (en haut) : INED. P. 26 : S. Duffaud. P. 27 : doc. PLS. P. 28 (dessins) : Jan Adkins. P. 28 (électronique) : Analog Devices. P. 28 (au milieu) : TRW Vehicle Safety Systems. P. 33 : Jean-Marc Loubat/Vandystadt. Pp. 34 (en bas) et 35 (en haut) : M. Khanoussi. P. 35 (en bas) : F. Lontcho. P. 36 : Harold Edgerton/Science Photo Library (Cosmos). P. 37 : Vania Fine/Vandystadt. P. 38 (en bas) : Gray Mortimore/Vandystadt. P. 41 : Richard Martin/Vandystadt. P. 42 (en haut) : Pascal Rondeau, Allsport. P. 42 (en bas) : Laurie Grace. P. 43 : Ken Regan, Camera 5. P. 44 (à gauche) : Laurie Grace. Pp. 44 (à droite) à 47 : Ken Regan, Camera 5. P. 48 : Laurie Grace. P. 49 : Bruno Bade/Vandystadt. P. 50 (en haut) : Tony Duffy/Vandystadt. Pp. 50 (en bas) à 52 : doc. PLS. P. 53 (à gauche) : Jean-Marc Loubat/Vandystadt. P. 53 (à droite) : Pat Black/Vandystadt. P. 54 : Claude Prelorrenzo. Pp. 56 et 57 : Flip Nicklin, Minden Pictures. P. 58 (en haut) : L. Grace. P. 58 (en bas) : F. Nicklin, Minden Pictures. P. 59 : avec l'autorisation de Pierre Béland. Pp. 60 et 61 : Roberto Osti. Pp. 62 et 63 : F. Nicklin, Minden Pictures. Pp. 64 et 65 : Alfred T. Kaman. Pp. 66 et 67 (en haut, à gauche) : Peter Samek. P. 67 (en haut à droite, au milieu et

en bas) : Jane X. Luu et David C. Jewitt. P. 69 (en haut, à gauche) : P. Samek. P. 69 (en haut, à droite) : Yerkes Observatory. P. 69 (en bas) : J.X. Luu et D.C. Jewitt. P. 70 : P. Samek. Pp. 72 et 73 : L. Grace. P. 74 (en haut, à gauche) : A.M. Jeffrey et I.B. Weinstein et al., Columbia University. P. 74 (en haut, à droite) : Michel Maiouffs, Gamma Liaison. P. 74 (en bas, à droite) : Regina M. Santella, Columbia University. P. 76 : Bryan Christie. P. 77 : Christopher Pillitz, Matrix. P. 78 (en haut, à gauche) : Richard Elkins, Gamma Liaison. P. 78 (en haut, à droite) : B. Christie. Pp. 80 et 81 : Jared Schneidman/JSD. P. 82 : Ola Røe, Røe Foto. P. 83 (photographie en arrière plan) : John Paul, Gamma Liaison. P. 83 (photographie au premier plan) : Ola Røe, Røe Foto. P. 84 : avec l'autorisation de Netscape. P. 85 : Andrew Lichtenstein. Pp. 89 et 91 (photographies) : Emergency Archive. P. 91 (dessins) : Pamela Blotner, Ther Arms Project/PHR. Pp. 92 et 93 : Boris Starosta. P. 94 : avec l'autorisation de Cambridge University Press. P. 95 (en haut) : Craig Mauzy et Marie Mauzy, avec l'autorisation du Musée de l'Acropole. P. 95 (en bas) : d'après Hibberd V.B. Kline, avec l'autorisation de Thomas E. Weil, Jr. P. 96 (en haut) : Roberto Osti. P. 96 (en bas) : Everett Collection. P. 97 (en haut) : R. Osti. P. 97 (en bas) : d'après Sydney Hall, avec l'autorisation de John R. Hale. P. 100 (en haut) : R. Osti. P. 100 (en bas) : Mark Myers. P. 102 : avec l'autorisation de Thomas E. Weil, Jr. P. 105 (en haut) : Pix-Guillaume de Laubier. P. 105 (au milieu) : doc.PLS. P. 105 (en bas) : USIS. P. 107 : doc. PLS. Pp. 108 et 109 : Bernard Chaubet. P. 110 : Marcel Bournérias.

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Michel Claude, Philippe Fleurance, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Alessandro Morbidelli, Claude Olivier, Guy Paulus, Chantalle Thepaut-Mathieu, Pascale This, Pierre Weis.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degusti.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. (1) 46 34 21 42.
Téléc : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : 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 adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.