

■ POUR LA
SCIENCE

Juin 1997

édition française de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Votes étranges
et paradoxaux

Jules Verne

Les bactéries
de l'extrême

La chimie
combinatoire

La formation
des montagnes

Virus et immunité

Tyrannosaurus Rex
emprisonné



Canada \$ 8,75

L'évolution de l'homme

Bloc-notes de Didier Nordon

Jeu-concours

Partage équitable d'un gâteau triangulaire

par Pierre Tougne

Tribune

Point de vue

Science et intégrisme

par Claude Taïeb



Les inattendus de la science 10

Les inattendus du développement

par Alain Prochiantz



Présence de l'histoire 14

La malédiction du tyrannosaure

par Eric Buffetaut

Science et finance 20

Les flambées boursières

par Christian Walter

Science et gastronomie 21

La téléolfaction

Perspectives scientifiques : 22

Le champion du monde d'échecs battu par l'ordinateur

Changement pour l'un, différence pour l'autre?

Enzyme et cancer

Meurtres sexistes dans la fourmilière

Un accident stimulant

Les bébés étoiles ont le hoquet

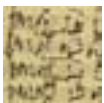
Un granite producteur d'électricité



Logique et calcul 102

Votes étranges et paradoxaux

par Jean-Paul Delahaye



L'expérience du mois 106

Illusions musicales

par Shawn Carlson



L'image du mois 108

Parasitisme en série

par Bernard Chaubet



Analyses de livres 110

– Les palmes de M. Schutz

– Les plantes protégées d'Île-de-France

– Les arbres qui cachent la forêt

– Universalités et fractales

– Histoire générale des techniques

Sur notre site Web (<http://www.pourlascience.com>),

vous trouverez des compléments bibliographiques

des articles de Pour la Science.

Les premiers exodes 40

par Ian Tattersall

L'Afrique est le berceau de l'humanité, mais combien d'espèces humaines y ont-elles évolué? Et quand l'ont-elles quittée?



Comment notre cerveau calcule-t-il? 50

par Stanislas Dehaene

L'observation de notre cerveau en activité révèle quelles régions cérébrales sont spécialisées dans le traitement arithmétique et comment leurs actions sont coordonnées.



Peut-on sauver les forêts tropicales? 58

par Richard Rice, Raymond Gullison et John Reid

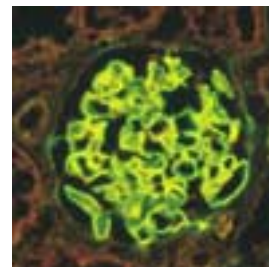
Une gestion «durable» des exploitations forestières tropicales réduirait la biodiversité. La constitution de réserves serait un mode de préservation plus efficace.



Le soi, le non-soi et les virus 64

par Rolf M. Zinkernagel

Parfois les traités de non-agression scellés entre le système immunitaire et l'organisme qui l'abrite sont rompus : des maladies auto-immunes apparaissent.



Chimie combinatoire et nouveaux médicaments

72

par Matthew Plunkett
et Jonathan Ellman

Grâce à cette nouvelle technique, on fabrique rapidement de nombreuses molécules de structures apparentées, accélérant ainsi la découverte de médicaments potentiels.



Comment l'érosion construit les montagnes

78

par Nicholas Pinter
et Mark Brandon

L'interaction des forces tectonique, érosive et climatique façonne les montagnes et éclaire l'histoire de la Terre.



Les organismes de l'extrême

86

par Michael Madigan
et Barry Marrs

Certains micro-organismes survivent dans des conditions qui tueraient toute autre créature. Les molécules qui leur permettent de prospérer intéressent l'industrie.



Jules Verne, visionnaire incompris

94

par Arthur Evans
et Ron Miller

La découverte d'un manuscrit longtemps égaré révèle que le père de la science-fiction se préoccupait des dangers de la science et de la technique.



Connais-toi toi-même...

L'immunologie est la discipline philosophique fondamentale : elle décrit les causes et les relations qui nous maintiennent en équilibre sur le fil du rasoir nous séparant de la maladie et de la mort. Patient serviteur de la vérité du monde vivant, l'immunologiste étudie comment les expériences sont mises en mémoire par les cellules qui nous défendent contre les intrusions étrangères maléfiques. Est-il sujet plus important?

Car notre système immunitaire n'a jamais été aussi exposé : la rapidité et la fréquence des échanges font du monde un village immunitaire global. Aussi la société demande-t-elle aux scientifiques de prémunir les individus. Hélas, la prévention ne peut aboutir quand les données fondamentales manquent. Et les connaissances de base ne sont acquises que par des recherches originales, développées indépendamment de leur utilité immédiate. Si la science semble toujours en retard par rapport à nos besoins, elle précède et fonde les décisions opportunes, les réponses pratiques à des questions vitales.

Telles que : comment les cellules sont-elles éduquées pour éliminer les envahisseurs indésirables? Comment distinguent-elles les cellules de l'organisme, le soi, des cellules étrangères à éliminer, le non-soi? La différence entre le soi et le non-soi est existentielle.

Rolf Zinkernagel démêle une partie de l'écheveau en étudiant les cas extrêmes, les dérèglements catastrophiques qui amplifient et mettent en lumière le fonctionnement de l'organisme (voir *Le soi, le non-soi et les virus*, page 64). Ainsi soulève-t-il un coin du voile. Contrairement à une idée reçue, les molécules du soi ne portent pas une «étiquette intrinsèque» d'identification. Soi et non-soi sont distingués par les caractéristiques (qualitatives et quantitatives) de leur présentation aux agents du système immunitaire. En revanche, des virus pathogènes dressent parfois ce système contre le soi. De ces études naîtront un jour des médicaments.

Philippe BOULANGER

Le menteur arrosé

Gâce à des micros bien placés, un psychologue de l'Université de Californie du Sud a démontré que les gens mentent toutes les huit minutes en moyenne, soit 200 mensonges par jour.

Effrayé du résultat de son enquête, ce chercheur se croit tenu de défendre le mensonge, «crucial au bon fonctionnement de la société», affirme-t-il. Là, mon collègue, vous voilà pris à votre tour ! Parce que prétendre que notre société fonctionne bien, c'est un mensonge – et pas un petit.

En fait, ce chiffre reste à interpréter. Les gens mentent 200 fois par jour ? Cela paraît beaucoup. Mais – qui sait ! – peut-être disent-ils la vérité 300 fois par jour, voire 400. En ce cas, ne faudrait-il pas les considérer comme des adeptes du parler vrai ?

Syndrome de la page blanche

Une criante injustice vient enfin d'être réparée... J'ai déjà fait allusion dans ces colonnes à une plaisanterie chère aux scientifiques : publier un article faux

est appréciable, car cela mène à publier un rectificatif, ce qui augmente donc le nombre de vos publications de deux unités au lieu d'une.

Ainsi, les chercheurs fiables sont-ils injustement pénalisés. Du moins, ils l'étaient. Consultons en effet le *Conspectus materiae tomi LXXVIII, fasciculi 1* de la revue *Acta Arithmetica*. (Cette revue polonaise, consacrée à la théorie des nombres, publie des articles en français, anglais, allemand et russe ; pour ne pas faire de jaloux, la table des matières est en latin.) Consultons donc la table des matières. Elle annonce que, en page 99, P. Bundschuh et M. Waldschmidt publient un errata à un précédent article. Toujours heureux d'assister à la chute de vos collègues, précipitons-nous pour voir quelle faute grossière ces vilains chercheurs avaient commise... Las, la page 99 est vierge, intégralement blanche ! Je l'ai vue de mes yeux.

Erreur due à l'imprimeur ? Non ! Écartons résolument cette plate supposition. Reconnaissons plutôt les avantages du procédé inauguré par P. Bundschuh et M. Waldschmidt. D'abord, il permet à un auteur de publier deux fois en toutes circonstances, même si par malchance son

article initial était correct. Ensuite, il évite au lecteur une fastidieuse vérification. Si l'errata est vide, c'est la preuve que l'article initial était vierge de toute tache.

L'instant de vérité

Parmi tant d'alexandrins parfaits et parfaitement ennuyeux, Boileau en a écrit un (et peut-être un seul) où s'exprime une émotion poétique. «Le moment où je parle est déjà loin de moi», lit-on dans l'Épître III.

Cette même nostalgie du temps qui passe et nous interdit même de nous raccrocher à nos propres paroles inspire aussi François George : «La vérité d'existence, c'est que A n'est pas égal à A, parce que, le temps de poser l'égalité, A n'est plus le même, a déjà vieilli...»

Les logiques modernes sont émancipées du carcan aristotélicien. J'imagine cependant mal qu'on parvienne à en concevoir une où l'égalité, évanescence et fugitive, ne durera que le bref instant du croisement de deux variables, avant que chacune ne s'éloigne dans sa nuit...

Il n'est de science que de la mienne

Exercice. Décliner sur tous les tons, et conjuguer à tous les modes, la phrase suivante : «Le centre du monde existe, et j'ai la chance de m'y trouver.»

Application. Les références d'un certain nombre de citations ont été égarées. Sauvez-vous retrouver qui a dit quoi ?

Liste des citations :

1. L'insomnie, fléau majeur de notre vie industrielle.
2. On peut légitimement se demander si l'objet d'étude de l'arithmétique n'est pas l'esprit humain lui-même.
3. Existe-t-il un problème scientifique plus important dans la recherche contemporaine que de comprendre comment fonctionne notre cerveau ?
4. L'histoire de l'humanité s'identifie complètement avec celle des matériaux utilisés aux différentes époques.
5. L'homme est le primate capable de découvrir le monde mathématique. Face à une conception biologique envahissante de l'homme, dont la différence avec l'animal ne semble reposer pour certains que sur le nombre de ses neurones, il est bon de mettre en valeur cette capacité qui est la sienne de construire la mathématique du monde et de découvrir le monde mathématique.
6. Parfois, je me demande si l'Univers est fait d'autre chose que de 0 et de 1.

Liste des auteurs :

- A. Michel Juvet, spécialiste du sommeil.
- B. Gérald Tenenbaum et Michel Mendès France, théoriciens des nombres.
- C. Jean-Pierre Changeux, spécialiste du cerveau.
- D. Michel Duneau et Christian Janot, spécialistes de la physique des matériaux.
- E. Paul Germain, mathématicien.
- F. Un informaticien, caricaturé par Jean-Pierre Petit.

Une preuve d'existence

Selon un sondage récent sur les croyances des scientifiques, les mathématiciens sont les plus enclins à croire en Dieu (44,6 pour cent), et les physiciens et astronomes le moins (77,9 pour cent de mécréants). Voilà une information intéressante. Mais le simple fait que les sondeurs aient pu mener à son terme une pareille enquête est, en soi, bien plus intéressant.

Si les sciences sont vraiment l'école de la rigueur, un scientifique ne peut ni ne doit répondre à une question dont les termes n'auraient pas au préalable été correctement définis. Ainsi, sa première réaction quand le sondeur vient sonner à sa porte ne peut être que demander : «Pardonnez-moi, Monsieur l'enquêteur, qu'entendez-vous précisément par "Dieu" ?»

De deux choses l'une, donc. Soit l'affirmation, souvent répétée, selon laquelle les sciences éduquent l'esprit et le rendent exigeant quant à la rigueur intellectuelle, est fautive : les scientifiques acceptent de répondre à n'importe quelle question. Soit les instituts de sondage ont réussi là où les théologiens ont échoué : ils savent définir Dieu.

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la découverte
à l'enregistrement
des
Inattendus
de la
Science**

**Samedi 14 juin 1997
à 15 h**

*Les objets cosmiques
inattendus*

avec André BRAHIC,
astronome à l'Observatoire
de Paris-Meudon

**Samedi 21 juin 1997
à 15 h**

*Les inattendus
des vies artificielles*

avec Francisco VARELA,
directeur de recherche
au CNRS, Laboratoire
Neuro Science, Cognition
et Imagerie cérébrale

**Invitations à demander au
08 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



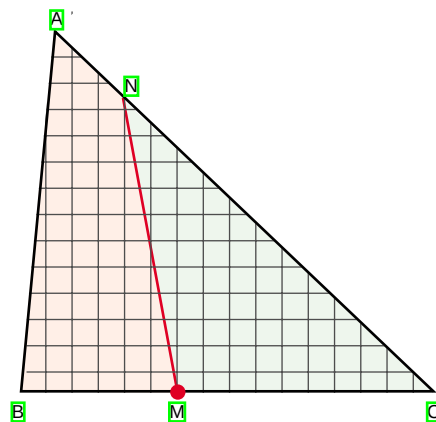
Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

JEU-CONCOURS N°36

**PARTAGE ÉQUITABLE D'UN GÂTEAU
TRIANGULAIRE**

Si l'on veut partager un gâteau triangulaire quelconque en deux parts égales (c'est-à-dire de même surface) d'un seul trait de couteau, il y a une solution évidente en partant de l'un quelconque des sommets (pensez à la médiane). En revanche, si l'on s'impose de commencer d'un point quelconque du périmètre du triangle, le problème est plus intéressant. Plus précisément, si l'on se donne un triangle ABC et un point M sur un côté disons BC , sauriez-vous construire le point N sur le périmètre du triangle (voir la figure) tel que le segment MN coupe le triangle en deux surfaces égales ?



Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à Pour la Science, 8, rue Féroù, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de juin 1997, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°34

Soit x l'âge du mathématicien qui parle en premier et y celui de son interlocuteur. Le dialogue se traduit mathématiquement par les deux équations : $2y + 17 = nx$ et $x + 4 = my$, où les termes m, n, x, y sont des entiers positifs. En résolvant ces deux équations en m et n , on obtient facilement : $x = (17m + 8)/(mn - 2)$ et $y = (4n + 17)/(mn - 2)$.

Comme l'âge des mathématiciens est, par hypothèse, plus grand que 1, l'inéquation $y > 1$ donne $m < 4 + 19/n$, soit $m < 23$ (car $n \geq 1$). D'autre part, si m est pair, cela entraîne que x est pair, ce qui est impossible, car $2y + 17$ impair ne peut être un multiple de x . En définitive, m ne peut prendre que les valeurs impaires comprises entre 1 et 21. De plus, pour m donné, x est un diviseur de $17m + 8$ d'où l'algorithme de recherche de x et y . Pour m impair donné jusqu'à 21, on cherche les diviseurs x (différent de 1) de $17m + 8$ et pour chaque diviseur x , on teste si $y = (x + 4)/m$ est entier.

Quand cela est vrai, le couple (x, y) est une solution du problème posé. En procédant de la sorte, on trouve, dans l'ordre les cinq solutions suivantes : $(5, 9)$, $(25, 29)$, $(59, 21)$, $(31, 7)$ et $(23, 3)$.

Quelques lecteurs ont interprété la première phrase du dialogue par l'équation $2(y + 17) = nx$, ce qui conduit à d'autres solutions en plus grand nombre, mais je ne pense pas qu'il y avait ambiguïté, car la phrase correspondant à cette équation aurait été «mon âge divise deux fois la somme de ton âge et 17».

Enfin d'autres lecteurs ont traduit cette phrase par $nx^2 = y + 17$ (!), ce qui me semble difficilement justifiable, mais en revanche conduit à une solution unique $x = 2, y = 3$.

Hasard et investissement

Je veux bien admettre que les spéculateurs s'enrichissent ou s'appauvrissent selon les lois du hasard, et encore faut-il tenir pour zéro les capacités de l'intervenant. Il ne faudrait toutefois pas en déduire que les variations boursières ne sont que le fait du hasard (voir *Les tendances du hasard*, *Pour la Science*, avril 1997). Sinon comment expliquer que, depuis plus de 40 ans que j'investis en Bourse, j'ai fait quatre fois mieux que les indices ?

On peut tout à fait prévoir l'évolution future de la Bourse à la hausse ou à la baisse. Il est tout aussi possible et souhaitable de choisir les sociétés dans lesquelles on veut investir. Il s'agit là de prévisions sur leurs performances à venir qui dépendent pour beaucoup de la capacité de leurs dirigeants à prévoir. Tout ceci n'a rien à voir avec un jeu de pile ou face. Quant aux tendances décalées par les analystes « techniques », elles peuvent être décelées par tout investisseur bien informé qui sait se placer ou vendre au bon moment.

G. LE FLOCH, Hennebont

Réponse de Christian Walter

Les évolutions des cours boursiers ne sont pas dues au hasard. Mais la question de la prévisibilité boursière est différente : il faut bien distinguer la prévisibilité des dividendes futurs de la prévisibilité des cours eux-mêmes. Les bons choix de titres s'effectuent à partir des prévisions de dividendes futurs. Mais la façon dont ces prévisions influencent les cours boursiers est très compliquée. Les analystes techniques ont proposé des méthodes essentiellement graphiques, trop simples pour la complexité des marchés. Elles sont trop simples car elles ne différencient pas une variation boursière réelle d'un tirage aléatoire simulé par un jeu de pile ou face. Quant à Bachelier, il ne postulait l'imprévisibilité radicale que pour les cours « hors dividendes » ou « pied de coupon » (qu'il appelle « cours vrai »). Ce qui ne remet pas en cause la capacité à réaliser de bonnes performances par de bonnes prévisions de dividendes, attitude qui correspond au comportement de l'investisseur walrasien, par opposition à celui du spéculateur keynésien (voir *Pour la Science*, mai 1997).

Loi de Murphy

Toute personne ayant utilisé un râteau a constaté qu'il revient quasi systématiquement en position dents hautes lorsqu'on l'abandonne au sol. Cette position entraîne le pivotement du manche vers la tête du malheureux qui pose le pied sur la

partie basse. Cette fatalité ne serait-elle pas une expression de la loi de Murphy ?

La forme de l'outil est responsable à la fois du pivotement et de l'étrange insistance avec laquelle il se retrouve en mauvaise position. Lorsque le râteau est lâché après utilisation, le centre de gravité se trouve, si le manche est proche de la position verticale, décalé du côté opposé des dents.

S'agit-il d'une mauvaise conception historique du râteau ou de quelque chose de plus fondamental ? Il est difficile de concevoir un outil rendant les mêmes services et moins dangereux : une courbure du bas du manche ou une inclinaison des dents le rendrait peu maniable, une disposition symétrique ne réglerait rien et un lestage en alourdirait le manie- ment. Par ailleurs, la longueur du manche est évidemment du même ordre de grandeur que la taille de l'utilisateur, ce qui place inévitablement son visage sur la trajectoire de l'extrémité.

Christian CUSSET, Montbrison

Défense (para)normale

Dans l'article mentionné par Didier Nordon (voir *Bloc-notes*, *Pour la Science*, février 1997) et contesté par plusieurs lecteurs (voir *Tribune*, *Pour la Science*, avril 1997), je n'ai pas affirmé l'existence des phénomènes dits paranormaux, ni « sommé » la science de se mettre à leur étude. J'ai simplement pointé que le rejet dont ils sont l'objet est insoutenable, au regard des principes qui régissent aujourd'hui l'anthropologie. Me gardant de considérer la science comme une « entité abstraite », et les chercheurs comme des « autorités tutélaires », je me suis simplement efforcé d'analyser les arguments et les mécanismes institutionnels qui contribuent à ce rejet. Et j'attends de pied ferme ceux qui parviendront à justifier une telle clôture au nom du principe d'ouverture de la science. Mes deux contradicteurs s'inscrivent dans cette tradition.

P. Debusschere, qui confond habilement la parapsychologie et les « sciences occultes », soutient l'argument *a posteriori*. Les métapsychistes ayant été convaincus de naïveté et de fraudes, il importe de protéger la vraie science, la science ouverte, de ces billevesées, et d'empêcher d'autres chercheurs d'aller s'y fourvoyer. Tout le problème est de savoir si la chose a bien été jugée, avec la sérénité et la persévérance qu'exige un problème de cette nature. Je tiens qu'il n'en est rien, que P. Debusschere ne fait que monter en épingle quelques cas particuliers et qu'il en faudrait plus pour

disqualifier un dossier de cette ampleur. Mais allons plus loin : quand bien même il y aurait plus de fraudes que P. Debusschere ne le pense, cela ne justifierait toujours pas la fin de non-recevoir massive qui est adressée à la question métapsychique dans son ensemble. L'argument selon lequel on ne peut laisser les chercheurs dépenser les fonds publics à la recherche de coquecigrues ne tient pas : même quand ils travaillent sur fonds privés, même quand ils ne demandent rien à l'institution, les parapsychologues font l'objet de violentes attaques.

G. Klein, lui réduit la question à sa plus simple expression : il n'y a ni chercheurs, ni objet. S'il n'y a pas d'objet, c'est qu'il n'y a pas de chercheurs capables de le constituer ; et s'il n'y a pas de chercheurs, c'est qu'il n'y a pas d'objet, l'étrange ne pouvant en constituer un. Avec de tels arguments, on pourrait aussi bien démontrer *a priori* l'impossibilité d'apprendre à nager : comme le pointait Bergson, pour ce faire, il faut déjà pouvoir s'étendre sur l'eau, et donc déjà savoir nager. C'est précisément l'argument que je développais dans mon article d'*Alliages* : des chercheurs, il y en a eu, de nombreux, d'importants, et toute la question est de savoir pourquoi il n'y en a plus. Dira-t-on que la chose a été jugée ? On retombe dans l'argument précédent. Dira-t-on encore que cette recherche a déçu ses adeptes, qu'il l'auraient abandonnée d'eux-mêmes ? On ne trouve nulle trace de cette déception dans leurs écrits, mais, bien au contraire, la conviction sans cesse réitérée de la richesse potentielle de leurs travaux. Il serait plus juste de dire que la rumeur selon laquelle la chose a été jugée, avec le temps, s'est solidifiée en vérité officielle, ce qui dispense les chercheurs de 1997 de revenir sur le dossier.

Quant à l'argument selon lequel l'étrange ne constitue pas un objet, il n'y a pas un parapsychologue qui n'y souscrirait, ou, plutôt, qui n'y aurait souscrit, car hélas, de ces choses, il faut désormais parler au passé, en France tout au moins. Les métapsychistes n'ont jamais étudié la catégorie floue de l'« étrange », mais des objets construits et nettement découpés.

Bertrand MÉHEUST, Mézilles

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. Retrouvez la *Tribune* sur l'Internet à <http://www.pourlascience.com> et envoyez-nous vos messages.

Science et intégrisme

CLAUDE TAÏEB

La science est-elle le terreau qui nourrit et sur lequel fleurit l'intégrisme ?

Nous avons en tête le conflit entre Galilée et l'Eglise catholique. L'affaire Galilée est la représentation symbolique de l'opposition entre la science rationnelle, fondée sur des faits observés et des déductions, et les lois religieuses imposées comme des dogmes. Galilée est le symbole d'une pensée libre dégagée des traditions et des idées reçues. L'éducation scientifique avait, croyait-on, la puissance et la gloire de former les esprits à la distinction entre foi et connaissance.

Le modèle, pour rationnel qu'il soit, n'est plus actuel. Faouzia Charfi, lauréate de la médaille Rammal*, et directrice de l'Institut Préparatoire à l'Enseignement Scientifique et Technique de Tunis, a noté, dans son discours prononcé lors de la remise du prix, que c'est dans les établissements d'enseignement scientifique que les extrémistes religieux sont les plus présents. Cette réalité paradoxale, constatée dans les années 1980 en Tunisie, a été confirmée depuis dans d'autres pays de langue arabe. Au grand étonnement des observateurs qui pensaient que l'enseignement scientifique, par définition rationnel, «devait vacciner les jeunes contre l'extrémisme.»

Si les résultats scientifiques sont établis et vérifiés par des méthodes rationnelles, l'enseignement des sciences est dogmatique, explique Faouzia Charfi.

«Les sciences humaines, la littérature, la philosophie permettent d'avoir une vue globale des problèmes, dans le temps, à travers l'histoire des idées et des événements, et dans l'espace, par l'étude comparative des différentes civilisations. Ces disciplines favorisent une certaine ouverture d'esprit. L'enseignement des disciplines scientifiques, même lorsqu'il est correctement mené, a ses limites. Il ne suffit pas pour transmettre le message de l'universalité des valeurs, universalité qui est pourtant dans l'essence même du discours scientifique.

De plus, la facilité avec laquelle on peut s'adapter à un monde où la techno-

logie est présente partout est trompeuse, car cette adaptation peut se faire sans une réelle appropriation de la science moderne tant que l'on est consommateur. D'où l'illusion, pour un observateur étranger, d'une adaptation à la modernité. Cet état d'esprit qui consiste à exploiter les produits du développement technique, sans admettre tous les fondements théoriques de la science, fruits des révolutions scientifiques occidentales, amène des contradictions.

Je peux citer, par exemple, des objections de certains de mes étudiants contestant la vitesse finie de la lumière et prétendant que la théorie d'Einstein était erronée. Ils ne s'attaquaient pourtant pas à la théorie de Maxwell et acceptaient le formidable développement des moyens de communication. Ils étaient ainsi amenés à adopter partiellement une théorie, ce qui la rend incohérente, mais cela leur permettait de préserver la vision qu'ils avaient du ciel.

Une démarche rationnelle consisterait à proposer une autre théorie qui soit cohérente, ce qui nécessiterait une analyse des principes sous-tendant les théories et de leurs relations, et non un simple rejet de certains d'entre eux. Pour un tel travail, il faut un esprit libre, délivré de toutes contraintes. C'est cet esprit que doivent avoir les futurs cadres de la Tunisie.»

LA SCIENCE : UNE PAROLE SACRÉE ?

Lourde évidence : l'enseignement scientifique apporte une parole sacrée que l'étudiant ne peut contredire par des expériences ou des théories autres. L'enseignement des sciences n'applique pas les préceptes de ses propres disciplines.

L'Institut tunisien a élargi son enseignement scientifique pour y englober réflexions et débats. Nombre de ceux-ci portaient sur les relations entre science et religion. Comment, par exemple, pouvait-on expliquer et concilier que les heures des prières soient tirées d'éphémérides issues de calculs scientifiques

alors que les dates de certaines grandes fêtes religieuses soient encore liées à l'observation visuelle de l'apparition du croissant lunaire.

Lors de ces «Mercredis culturels» ouverts au public, créateurs, artistes, hommes de théâtre, réalisateurs de films font part de leurs passions et de leurs convictions ; les conférenciers participent à la transmission du savoir et au développement de la réflexion.

«Certains problèmes de société ont été abordés lors de conférence sur l'avenir de la ville ou sur le statut de la femme, à l'occasion de la Journée mondiale de la femme. L'étude des *Mémoires d'Hadrien*, de Marguerite Yourcenar, fut le prétexte d'organiser une conférence sur «Hadrien et l'Afrique», présentée par deux chercheurs, l'un épigraphiste, le second spécialiste de l'histoire monétaire de l'Afrique antique. Les conférenciers ont retracé l'histoire prestigieuse de la Tunisie antique.

Le problème de l'identité, problème si sensible dans nos pays, a été abordé d'une manière très libre et parfois provocante dans le cadre d'une conférence sur «l'écriture de soi». Malgré ce caractère provocateur, le débat, qui était riche, a été calme et serein. Car la question de l'identité se pose dans notre pays de façon de moins en moins aiguë, dans la mesure où la Tunisie se réconcilie avec son histoire, qui a été successivement berbère, punique, romaine, vandale, byzantine, musulmane et arabe. Cette diversité traduit les multiples rapports que la Tunisie a toujours eus avec l'ensemble des peuples méditerranéens. Intégrer ces différentes composantes est pour le Tunisien un facteur d'ouverture sur autrui et une leçon d'universalité.»

Le Tunisien est-il si différent ? Les réflexions de Faouzia Charfi ne sont-elles pas adaptables à notre enseignement ? Les déviations sont, en France, plus technocratiques, mais tout aussi réelles. Où sont les réflexions sur l'intérêt et les valeurs de la science dans nos Universités ?

«La mission de notre institut, commente Faouzia Charfi, ne se limite pas à donner aux étudiants une bonne culture scientifique, mais aussi à leur offrir le droit à l'édification de leur personnalité et les aider à accéder par eux-mêmes à la maturité, de sorte qu'ils soient élevés dans les valeurs de la tolérance et de la modération.»

*La médaille Rammal a été créée par la Société française de physique et la Fondation de l'École normale supérieure afin d'honorer la mémoire du physicien libanais prématurément disparu, R. Rammal (1951-1991), qui fit en France ses études supérieures et la majeure partie de ses travaux de recherche.

Les inattendus du développement

ALAIN PROCHIANZ*

La compréhension du développement individuel éclaire les mécanismes de l'évolution et, ce faisant, ouvre des voies thérapeutiques.

La biologie du développement est en plein... développement : la découverte des gènes de développement a ouvert un nouveau champ à la théorie biologique.

La théorie de l'Évolution nous avait enseigné que nous avions un ancêtre commun avec des êtres très éloignés, comme la mouche et le vermineau. Les biologistes ont identifié les vecteurs de la transmission des formes, unifiant ainsi les théories de l'Évolution et du développement.

DE L'HOMONCULUS AUX GÈNES

Comment s'effectue le transfert d'individu à individu ? La théorie de l'homonculus, développée par Charles Bonnet au XVIII^e siècle, reprenait un principe alchimiste : le spermatozoïde, selon les spermistes, l'ovule, pour les ovistes, contenait, disait Bonnet, une figuration du corps. Ce corps, présent dans le spermatozoïde, avait lui-même des spermatozoïdes, qui contenaient eux-mêmes un petit corps, qui... etc.

Théorie séduisante que celle des emboîtements de l'homoncule ! Il suffisait de créer le monde une fois et puis la reproduction allait son « petit bonhomme » de chemin. Le développement était, en suivant cette métaphore, un développement au sens photographique, un agrandissement.

***Alain PROCHIANZ est professeur de biologie du développement à l'École normale supérieure. Ce texte, recueilli lors du débat enregistré, avec Émile Noël et Philippe Boulanger, au Palais de la Découverte a été mis en forme par la rédaction de Pour la Science. Ce débat sera diffusé sur France Culture, le 11 juin 1997 à 9h 05.**

Alain PROCHIANZ, *L'anatomie de la pensée : à quoi pensent les calamars ?* Éditions Odile Jacob, 1997.

Cette magnifique construction, théologiquement satisfaisante, a été pulvérisée par l'observation : le développement, tel qu'observé au microscope, n'est pas un agrandissement, mais une suite de duplications. Une cellule, deux cellules, quatre cellules, huit cellules, etc. Ces cellules avaient une vie propre, bougeaient, se différenciaient, mouraient. Aux oubliettes, l'homonculus. Et pourtant, notait Balbiani, un biologiste suisse du XIX^e siècle, d'un œuf de poule, il sort une poule, donc il y a « de » l'homonculus dans l'œuf. Parallèlement, la toute neuve théorie de l'Évolution invoquait la sélection de caractères, plus tard celle de mutations : quel était le support des mutations ?

À l'Université Columbia, Morgan, au début du XX^e siècle, accumule des mutations chez la drosophile, la mouche du vinaigre, qui devient objet de prédilection pour les généticiens, ce qui conduisit à observer des mutations qui transforment un organe en un autre. La mouche, au lieu d'avoir des antennes, avait des pattes supplémentaires ; au lieu d'un œil, il lui poussait une aile. Grâce à ces mutations, on put relier modification du génome et transformation morphologique. Ce sont ces gènes qui passent la forme de génération en génération.

Un inattendu est que tous ces gènes morphogénétiques se ressemblaient beaucoup ; on les a retrouvés chez les vertébrés, on les a trouvés chez *Homo sapiens*, on les a comparés aux gènes de mouche et on a établi les similitudes extraordinaires qui ont permis de repenser les arbres généalogiques : la preuve était patente, nous avons un ancêtre commun avec la mouche, qui vivait il y a 600 millions d'années.

Les gènes sont les avatars de l'homonculus : ils transmettent l'information lors de la duplication. Il en existe plusieurs types. Les gènes qui déterminent la forme du nez, la couleur des yeux, la texture des cheveux, frisés ou raides, n'ont qu'une portée génétique limitée. La deuxième

catégorie de gènes, les gènes de développement, sont plus fondamentaux : ils caractérisent et déterminent l'espèce.

Ces gènes diffèrent selon les espèces, plus par leur nombre sur un même chromosome que par leur structure. Le plan de développement des vertébrés comporte quatre complexes de gènes dits complexes *Hox*, l'arthropode un seul ; toutefois, si l'on prend un de ces gènes chez la souris et qu'on le substitue au gène équivalent chez l'embryon de mouche, la mouche se porte le plus souvent comme un charme. La fonctionnalité de ces gènes a perduré, quasi inchangée pendant des centaines de millions d'années : la transmission de l'information génétique est d'une étonnante fiabilité. Le mécanisme de cette immuabilité restait à préciser : ce sera l'accomplissement de la biologie moléculaire.

L'espèce est l'enveloppe générale où prend place un développement individuel. Nous sommes limités par l'appartenance à l'espèce : c'est l'inné. L'inné étant déterminé par les gènes, il y a autant d'individus différents qu'il y a d'histoires individuelles possibles. Cette diversité naît des différences d'expression des gènes, résultant de l'interaction de l'individu avec le milieu. Dans le phylum des vertébrés et donc chez l'homme, cette diversité est infinie, mais, pour infinie qu'elle soit, elle est néanmoins contenue par le fait qu'on soit un homme. *Homo sapiens*, c'est l'inné, ensuite vient l'acquis qui donne Dupont, Mozart, Marie Curie, Hitler, Prochiantz, Noël, Boulanger. Nous reviendrons sur ce point.

POURQUOI DARWIN ET PAS CLAUDE BERNARD ?

J'ai une grande sympathie pour Claude Bernard et je lui ai consacré un livre. Il est le promoteur d'une idée force que nous exploitons encore : l'animal n'est pas une machine thermodynamique isolée, mais un corps vivant, hors d'équilibre, qui interagit avec son environnement. Et pourtant il passe à côté de l'évolution et du développement.

Contemporain de Darwin, Claude Bernard lit *De l'origine des espèces*, mais les ailes du positivisme, par lui déployées, l'empêchent d'avancer. Claude Bernard élude la question parce qu'il ne peut expérimenter sur ce qui modifie la forme des organismes.

Replaçons-nous à son époque. Les naturalistes pensent alors qu'il y a deux règnes dans la nature : le règne végétal et le règne animal. Les végétaux, immobiles, s'alimentent et reconstituent leurs réserves à partir des minéraux. Les réactions chimiques nécessaires à l'organisation végétale sont déclenchées par la

lumière. Les animaux, prédateurs absolus parce qu'ils peuvent se mouvoir, se nourrissent de végétaux et d'autres animaux, mais, *in fine*, puisent l'énergie dans le végétal chargé de transformer le minéral en organique, en organisé.

Claude Bernard cherche chez l'animal, l'organe, la chaudière qui est alimentée par le sucre végétal. Pour cela, il injecte du sucre de canne dans des lapins, puis il mesure à quelle vitesse le sucre est brûlé dans la chaudière, le foie. Il fait deux mesures en sortie du foie. Lors de la première mesure, le sucre a disparu : le foie a donc consommé, brûlé, le sucre. Une seconde mesure, immédiatement après la première, confirme les chiffres et la théorie thermo-mécaniste.

Un soir, ne doit-ils pas accompagner à l'opéra son égérie, la belle Madame Raffalovitch ? Claude Bernard est en retard. Il abandonne le lapin sur la table de laboratoire. Le lendemain matin, Claude Bernard relève la concentration de sucre, qu'il trouve supérieure à la précédente, le foie a sécrété du sucre ! Tout à fait inattendu. De cette surprise allait naître la physiologie expérimentale.

Un moins grand génie se serait contenté de faire la moyenne. Claude Bernard répète l'expérience, et le résultat se confirme : un animal peut produire du sucre, comme le végétal canne à sucre. La seconde mesure a introduit le facteur temps. Entre la première et la seconde mesure quelque chose a changé.

Sur la base de cette expérience unique démontrant la fonction glycogénique du foie, Claude Bernard réexamine la constitution et les possibilités du milieu intérieur animal. Rayonnement de la pensée d'un génie qui respense le monde à la lueur d'une mesure incongrue. Émerveillé des conséquences de sa découverte, Claude Bernard s'interroge pendant le reste de sa vie sur les conditions de sa réussite. Il ne s'en remet jamais.



Le docteur Faust, et ses continueteurs, étudiant l'homonculus.



Nous sommes de la matière, mais de la matière vivante, qui se développe, qui se reproduit, qui se crée au fur à mesure qu'elle se détruit, explique Claude Bernard. Sa pensée ouvre une voie physiologique et... animale, non sans combat entre une anatomie vitaliste, celle de Bichat, pour qui la vie était l'ensemble des forces qui s'opposent à la mort, et un réductionnisme physico-chimique, illustré par von Helmholtz, pour qui n'existent que les lois de l'action et de la réaction. Claude Bernard s'inscrit en faux contre ce vitalisme et ce réductionnisme : la

vie, proclame-t-il, c'est autant une destruction qu'une création. Un organisme est plus qu'une machine thermodynamique transformant un carburant en matière. La vie a sa dynamique propre et ses lois spécifiques qui organisent la matière moléculaire. Il y a donc un plan.

Mais Claude Bernard ne peut, ni ne veut, aller plus loin. Il n'accorde à la théorie de l'Évolution d'autre crédit que poétique. En positiviste convaincu, il s'interdit les divertissements littéraires... des philosophies romantiques, des Darwin, Goethe, Geoffroy Saint-Hilaire.

Dans le grand débat à l'Académie des sciences qui oppose Cuvier et Geoffroy Saint-Hilaire en 1830, ce dernier défend l'idée qu'il y a un plan commun d'organisation entre les arthropodes et les vertébrés. Les segments de la carapace des arthropodes sont l'équivalent des vertèbres des vertébrés affirme Geoffroy Saint-Hilaire, qui poursuit ses analogies en identifiant le système nerveux ventral de la langouste à celui des vertébrés. Remarque culinaire : quand vous préparez un crabe mou, faites-le cuire sur le ventre : il meurt plus vite, il souffre moins, car le système nerveux est sur le ventre. Sur le dos, le système nerveux du crabe est moins vite détruit, et l'ani-



mal agite désespérément ses petites pattes pendant plus longtemps.

Il y a un plan d'organisation commun entre le système nerveux des vertébrés et des invertébrés, affirmait Geoffroy Saint-Hilaire. Cuvier rejetait péremptoirement ces vaticinations. Comme futur ministre de l'Intérieur, Cuvier avait peut-être déjà tendance à faire la police ; ses interdits, en tout cas, étaient écoutés.

La découverte des gènes de développement, identiques chez les invertébrés et chez les vertébrés, a donné raison à Saint-Hilaire. Cuvier, tout puissant qu'il était, ne pouvait étendre son pouvoir à l'intérieur du corps. Mais Claude Bernard résiste obstinément à ce qu'il pense une perversion, car il ne pouvait établir la preuve expérimentale de cette évolution. On ne le peut toujours pas, et on ne le pourra sans doute jamais. Toutefois, nous savons pourquoi nous en sommes incapables.

Il n'empêche : notre philosophie scientifique est le positivisme, et nous sommes troublés par l'imprévisibilité de l'évolution. Si l'on repassait le film de l'évolution à partir du début, on aurait probablement d'autres formes animales, d'autres formes végétales. La biologie nous permet seulement de comprendre les règles universelles qui élaborent l'imprédictible.

L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME NERVEUX

Revenons à nos deux règnes : le «système nerveux» des plantes, c'est la chlorophylle. Les animaux en sont dépourvus : ce sont des prédateurs qui se déplacent pour trouver leur nourriture. Tout ce qui va dans le sens du mouvement, va dans le sens du développement du système nerveux.

Bien entendu, ce système nerveux se perfectionne. Dans le système nerveux des mouches, il y a des ganglions, présents dans chaque métamère. Le ganglion a un gros désavantage : quand la taille du système nerveux augmente, la taille de la boule (le ganglion) croît, et la boule devient vite encombrante. De surcroît, le centre de la boule doit être irrigué. Le système ganglionnaire est le handicap des invertébrés.

Les vertébrés ont inventé une géométrie plane plus adéquate. Le système nerveux des vertébrés est un plan situé à la surface de l'embryon et qui s'invagine en un tube nerveux s'étendant de la moelle épinière au cortex. Vous pouvez plisser un plan et, ainsi, mettre une surface de plus en plus grande dans un volume restreint. De ce fait, vous augmentez la surface du système : le pli est une superbe invention de l'évolution, apparue avec les ver-

tébrés. Le cortex d'*Homo sapiens* a trois millimètres d'épaisseur et deux mètres carrés de surface. Chez la souris, l'épaisseur est de deux millimètres ; la différence est mince. La circonvolution cérébrale, c'est le pli, la façon de mettre de plus en plus de surface dans une boîte de taille limitée.

La surface totale n'est pas le seul paramètre évolutif. Chaque modalité sensorielle et cognitive accapare une place proportionnelle à son importance pour l'individu. Des fonctions nouvelles s'accompagnent d'un ancrage cérébral. Chez un mammifère très primitif, l'ornithorynque, le cerveau est essentiellement consacré au sensori-moteur. Les systèmes nerveux plus évolués ont complexifié l'arc réflexe : la montée au cerveau du signal permet de réfléchir avant d'agir. Et toujours pour bouger, récupérer de la nourriture, fuir un prédateur, se rapprocher de l'objet ou de l'individu désiré. À mesure que les gènes de développement responsables de la génération de ces neurones s'expriment plus longtemps, l'aire des surfaces spécialisées augmente. Au cours de l'évolution des mammifères, on note l'accroissement des zones de l'olfaction, de l'audition, de la vision, et les aires dites associatives, cognitives, qui permettent, par exemple, de se souvenir, de réfléchir avant d'agir.

Les aires du langage, qui sont apparues en dernier chez *Homo sapiens*, accroissent infiniment sa capacité d'interaction avec le monde et donc les possibilités d'acquisition. Ce qui est transmissible génétiquement d'homme à homme, c'est la possibilité accrue d'acquiescer. Une autre forme de mémoire est culturelle : elle survit à la mort de l'homme ou de la civilisation. Le langage nous a conféré un avantage déterminant pour la transmission de la culture. Le langage a sorti l'homme de la nature. La nature de l'homme, c'est de l'avoir surpassée.

CE SONT LES CORPS QUI PENSENT

On a travaillé sur la pensée avant de connaître les détails de l'organisation cérébrale. Philosophes, anthropologues, sociologues, psychanalystes ont travaillé sur les catégories de la pensée dans leur domaine, dans leur champ de savoir, tous aussi respectables que la biologie.

Qu'apporte la biologie ? Le biologiste examine les conditions biologiques nécessaires à telle ou telle forme de pensée. Pour le biologiste, la pensée est une adaptation au milieu. La pensée n'est pas déposée quelque part, elle est le rapport entre le corps vivant et son environnement.

Existe-t-il une pensée animale ? Le calamar pense-t-il ? Le calamar est un organisme tout à fait étonnant. Lorsqu'il rencontre une dame calamar, il rosit. Il trahit son émotion. Quand un calamar rencontre un prédateur, il lui crache de l'encre à la figure. Il fuit à toute vitesse, il se cache. Je doute cependant que le calamar ait conscience qu'il pense. Sa pensée est instinctive, elle est adaptée – les calmars qui en sont dépourvus meurent –, elle n'est pas réfléchie.

Au cours de l'évolution, d'autres formes de pensée apparaissent. Chez l'homme, il y a une pensée de ce type réflexe, bien sûr, mais en même temps, une pensée autre est liée à l'adaptation de l'individu ; des stratégies de développement lentes permettent que l'adaptation ne soit pas au niveau de l'espèce, au niveau de la formation de la sélection de clones, mais au niveau de l'individuation.

Changez de milieu un animal qui se reproduit très vite, par exemple un petit ver ou une petite mouche : presque tous les vers, la quasi-totalité des mouches vont périr, sauf quelques-uns qui sont génétiquement adaptés au nouveau milieu, et ceux-là vont se reproduire et envahir le biotope, par sélection clonale. Il n'y a pas d'individu au sens où, nous, nous parlons de l'individu. Il y a un tout petit peu d'individuation chez les invertébrés, mais, néanmoins, l'adaptation se fait par sélection de clones.

Au cours du développement, l'individu homme s'adapte parce que le temps de son développement cérébral est prolongé à l'infini. L'adaptation se fait par individuation, et c'est cela la pensée distincte. Nous sommes des individus sociaux extrêmes, puisque tout nous pousse à l'individuation, en particulier nos rapports sociaux. *Sapiens sapiens* est une forme extrême du processus d'individuation.

Pouvons-nous extrapoler et concevoir un extrême au-delà de cet extrême ? Un *Sapiens sapiens sapiens sapiens* je ne sais combien de fois ? Question intéressante, mais comment y répondre ? Je place *Homo sapiens* au sommet de l'échelle animale, à cause de l'invention du langage. Je ne crois pas, je ne pense pas (c'est une croyance et non un fait de science) que la sélection naturelle puisse avoir encore des effets sur l'évolution d'*Homo sapiens*. Imaginons que la Terre devienne plus chaude ou plus froide à cause des cycles climatiques ou de l'effet de serre. Il me semble que l'homme s'adaptera par ses inventions technologiques et pas par des mutations favorables. Le vêtement, l'air conditionné ou la fabrication de machines particulières seront une réponse beaucoup plus rapide et plus efficace à des défis de ce genre que la mort de 99

pour cent de l'humanité et la sélection génétique de un pour cent ou de un pour mille qui serait mieux adapté aux nouvelles conditions.

L'APOPTOSE INATTENDUE

Pour construire un organisme, on pense à une perpétuelle incrémentation, en termes d'ajouts successifs. Il n'en est pas ainsi. Le phénomène de mort de cellules est essentiel, en particulier dans la construction du système nerveux. Au cours des phases de développement, nous perdons, selon les régions du système nerveux, entre 20 et 80 pour cent des cellules. Le processus est l'apoptose : la mort cellulaire est une différenciation comme une autre, sauf qu'elle entraîne la mort de la cellule dans laquelle ces gènes de mort cellulaire sont, tout à coup, exprimés.

Chez un invertébré, les cellules sont programmées pour mourir. Chez un vertébré, elles mettent en route les programmes de mort en réponse à des signaux extérieurs. Les premiers gènes d'apoptose ont été découverts chez le nématode, un petit ver de 1 000 cellules, dont environ 300 neurones. On sait précisément quand une cellule va disparaître : tel neurone va mourir à tel moment, tel autre à tel moment, et cette fatalité est immuable. L'inattendu est qu'il n'y ait aucun inattendu.

Les biologistes ont identifié des gènes universels de l'apoptose, identiques chez les vertébrés et les invertébrés. Un d'entre eux est très intéressant, il s'appelle *bcl-2* chez les vertébrés et *ced-9* chez le nématode. Vous pouvez remplacer le gène *ced-9* du nématode par le gène *bcl-2* de l'homme sans aucun effet apparent. En revanche, la surexpression de *bcl-2* chez l'homme provoque des tumeurs, en particulier des tumeurs du système immunitaire.

Un organisme, on retrouve ici Claude Bernard, est un perpétuel contrôle de la croissance et de la mort des cellules. Une prolifération cellulaire est un dérèglement néfaste : des leucémies résultent d'hyperproliférations de cellules, d'autres sont dues au fait que certaines cellules «oublient» de mourir. Chez l'homme et le nématode, ce sont les mêmes gènes déviants qui oblitérent la mort cellulaire et mettent en péril la survie de l'individu. Cette identification ouvre des voies thérapeutiques : si l'on observe une pathologie intéressante chez le ver ou chez la mouche, on peut trouver les gènes humains correspondants qui sont responsables du même type de maladie.

D'où l'intérêt, immense et partiellement incompris, de la recherche fonda-



Claude Bernard (1844-1925), dans son laboratoire au Collège de France, en 1889.

mentale... sur le nématode ou d'autres organismes simples. Les malheureux biologistes qui travaillaient sur ces drosophiles ou sur ces vers – et dont certains se moquaient –, ont apporté beaucoup plus à la médecine que les grands programmes de recherche médicale. Le remède des maladies humaines passera souvent par l'étude du nématode ou de la mouche ou d'autres organismes simples comme la levure ou la bactérie, boîtes à outils du biologiste.

La médecine n'est pas assez à l'écoute de la biologie : nous vivons un lyssenkisme rampant. Le rythme de la science est par trop soumis à l'urgence des impératifs de santé, à une contrainte économique mal orientée.

Rappelons-nous Lyssenko. Le pouvoir soviétique accusait les généticiens de trop s'occuper des poils des mouches et pas assez des rendements du blé. Les généticiens qui n'acceptaient pas ce reproche étaient remis sur la bonne voie, vers la Sibérie. L'agriculture soviétique a payé cette façon de travailler dans l'urgence. Elle en pâtit encore.

N'est-il pas terriblement injuste d'accuser les scientifiques d'ignorer la demande sociale ? Qui ne voudrait découvrir le traitement du cancer ? Mais comment les scientifiques pourraient-ils satisfaire la demande technologique, ignorer les leçons de leur discipline ? Le chemin de la découverte n'est pas balisé, les grands programmes sont souvent une illusion volontariste permettant à des scientifiques de médiocre envergure d'assouvir leur soif de pouvoir. Il faut des programmes, bien entendu, mais la découverte scientifique n'est pas programmable, et son efficacité ne passe pas par un asservissement à la demande.

L'INATTENDU DANGEREUX

Comment, dans sa pratique, le scientifique traite-t-il l'inattendu ? Il est des inattendus qu'il hésite à divulguer dans la mesure où, incompréhensibles, ils sont peu crédibles. Vous me le demandez ! Oui, cela est arrivé dans mon laboratoire. Nous avons observé, il y a bientôt dix ans, qu'une protéine traversait les membranes cellulaires. Cette protéine, qui est un facteur de transcription, aurait dû rester dans le noyau. Je ne sais pas encore si cette particularité a un sens biologique ou physiologique, car nous n'avons pas encore mis le phénomène en évidence dans l'animal entier, seulement en culture. Mais, du coup, nous avons identifié certaines propriétés moléculaires nécessaires à la traversée d'une membrane, qualités importantes pour envoyer un principe actif à l'intérieur d'une cellule : nous avons fabriqué un outil utile. Cependant notre sentiment est que l'essentiel nous échappe encore : aussi ne puis-je me prononcer sur l'importance de l'observation.

La découverte naît de l'inattendu interprété. Si vous testez une hypothèse et que le phénomène reproduit exactement ce que vous supposiez, les résultats ont sans doute peu d'intérêt : ils étaient dans les prémisses. Quand l'inattendu arrive, vous pouvez le glisser sous le tapis et oublier ce qui ne colle pas, en le baptisant artefact ; 999 fois sur 1000, c'est un artefact. Une fois sur 1 000, il faut prendre le risque d'y consacrer du temps. C'est dangereux : vous y passez du temps, de l'argent, vous engagez des étudiants, vous risquez des carrières. Toutefois, si à chaque fois que vous observez quelque chose qui ne colle pas, vous l'oubliez, votre recherche ronronnera.

La malédiction du tyrannosaure

ERIC BUFFETAUT

Un chercheur de fossiles est en prison : ne voulait-il pas s'approprier le résultat de ses fouilles ?

Pour être un saint, il ne faut pas aspirer au martyre. Peter Larson est un martyr en prison. Mais ce n'est pas un saint : il recherchait l'objet, *Tyrannosaurus rex*, pour lequel il est emprisonné.

Tyrannosaurus rex compte parmi les plus célèbres des dinosaures. Ce très grand carnivore, qui atteignait une douzaine de mètres de longueur, vivait dans l'Ouest de l'Amérique du Nord il y a un peu plus de 65 millions d'années (il fut l'un des derniers dinosaures). Le premier spécimen fut découvert par le paléontologue américain Barnum Brown, dans le Montana, en 1902, et permit à Henry Fairfield Osborn, de l'*American Museum of Natural History*, à New York, de définir un nouveau dinosaure auquel il donna le nom impressionnant de *Tyrannosaurus rex*. Avec la découverte en 1908, toujours par Brown et toujours dans le Montana, d'un second squelette plus complet, les paléontologues reconstituèrent l'ensemble du squelette de l'animal et, en 1915, le premier squelette monté d'un tyrannosaure devint une des principales attractions de l'*American Museum*.

Tyrannosaurus rex est l'une des stars du monde des dinosaures : il est reconstitué (de façon plus ou moins convaincante) par d'innombrables artistes, figure dans tous les livres consacrés aux animaux disparus, et tient un rôle de choix dans plusieurs films, de *King Kong* à *Jurassic Park*.

Cette popularité, liée à la taille énorme et à la férocité probable de l'animal, ne doit pas faire oublier que l'on ne connaît qu'un nombre restreint (guère plus d'une douzaine) de squelettes de *Tyrannosaurus rex*, généralement incomplets. Cette combinaison de relative rareté et de grande popularité explique que la découverte d'un nouveau spécimen soit un événement.

Surtout dans l'ambiance de «dino-manie» qui règne depuis quelques années aux États-Unis – et ailleurs.

Depuis 1990, un squelette de *Tyrannosaurus rex* a l'honneur de la presse :

il est au centre d'un feuilleton, plus juridique que scientifique, qui a mis en émoi la communauté paléontologique, et qui amène à se poser bien des questions parfois délicates : à qui appartiennent les fossiles ? Qui doit être autorisé à les récolter ? Quelle doit être la destination des spécimens recueillis ? Comment assurer que les spécimens paléontologiques importants puisse faire l'objet d'une étude scientifique sérieuse ?

LA DÉCOUVERTE

L'histoire commence en août 1990, lorsque Sue Hendrickson découvre les ossements d'un tyrannosaure dans les *badlands*, les régions arides ravinées par l'érosion, du Dakota du Sud. Sue Hendrickson travaille pour le *Black Hills Institute of Geological Research*, basé à Hill City, Dakota du Sud. Le *Black Hills Institute* est un organisme privé, dirigé par les frères Peter et Neal Larson et Robert Farrar, leur associé.

L'Institut possède un musée de paléontologie, mais se consacre principalement au commerce des fossiles, activité qui peut être lucrative. Des amateurs plus ou moins fortunés jusqu'aux grands musées du monde entier, les acheteurs potentiels ne manquent pas, et le marché des fossiles, à l'échelle internationale, est florissant. Un squelette de tyrannosaure, tant du point de vue commercial que du point de vue scientifique, est une découverte remarquable.

L'extraction du spécimen trouvé par S. Hendrickson nécessite quelques préalables. À qui appartient le terrain ? Cette question est la source de toutes les péripéties à venir. Le fossile a été découvert sur les terres d'une réserve indienne, celle des Sioux de la *Cheyenne River*. Plus précisément, il se trouve sur le ranch d'un agriculteur, Maurice Williams. C'est avec lui que P. Larson traitera. Contre la somme de 5 000 dollars, il obtient l'autorisation de fouille et, après un mois de travail acharné, son équipe de six personnes extrait des sédiments de la fin

du Crétacé un magnifique squelette presque complet de *Tyrannosaurus rex*, apparemment le plus grand jamais découvert. Il est surnommé Sue en l'honneur de sa découvreuse. Le squelette est transporté au *Black Hills Institute*, où la longue et méticuleuse préparation des ossements, qu'il faut extraire délicatement de leur gangue, commence. Le but final, aux dires de P. Larson, est de présenter le squelette dans le musée du *Black Hills Institute*, dont il serait le fleuron.

Les difficultés commencent, pour P. Larson et ses associés, lorsque le Conseil tribal des Sioux, sur la réserve desquels le squelette a été trouvé, s'interroge sur la propriété du fossile. Découvert sur une réserve indienne, n'appartient-il pas aux Indiens ? M. Williams pouvait-il vraiment donner au *Black Hills Institute* l'autorisation de prélever le dinosaure ? La question est d'autant plus compliquée que M. Williams, pour des raisons de fiscalité, a confié la gestion de ses terres à l'état fédéral. Le Conseil tribal se retourne donc vers ce dernier pour tenter de faire valoir ses droits. Les Indiens allaient-ils remporter dans les *Collines noires*, une nouvelle victoire de *Little Big Horn* ? En 1992 commence une enquête criminelle. Objet du délit : le tyrannosaure *Sue*.

Le problème se complique encore lorsque M. Williams nie avoir vendu quoi que ce soit au *Black Hills Institute*. Les 5 000 dollars reçus correspondaient à l'autorisation de fouille, maintient M. Williams, pas à l'achat du spécimen. Cette interprétation est bien sûr vigoureusement contestée par P. Larson. L'enquête suit son cours, et le 14 mai 1992, 35 agents du FBI investissent le *Black Hills Institute* et saisissent le squelette du tyrannosaure, lequel, encore incomplètement dégagé, pèse quelque dix tonnes !

LIBÉREZ SUE !

Déterminé à récupérer le précieux fossile, le *Black Hills Institute* se lance alors dans une campagne de protestation publique avec pour mot d'ordre «Libérez Sue». Les manifestations contre les procureurs chargés de l'affaire se succèdent. P. Larson et ses associés peuvent tabler sur les sentiments hostiles au gouvernement fédéral de bon nombre d'Américains, et la controverse prend un tour acerbé.

La question de la propriété du tyrannosaure étant décidément complexe, les enquêteurs s'intéressent alors aux autres activités du *Black Hills Institute*. Un des points qui retiennent leur attention est la collecte de fossiles sur des terrains fédéraux. En effet, si la loi américaine laisse les propriétaires de terrains pri-



En août, Sue Hendrikson découvre un tyrannosaure fossile.

vés libres d'y extraire des fossiles pour les vendre (ou d'en donner la concession à des chercheurs commerciaux), elle est intransigeante en ce qui concerne les terres publiques appartenant à l'État fédéral. Des permis sont exigés pour pouvoir y collecter des fossiles, et ces autorisations ne sont accordées qu'à des institutions scientifiques reconnues.

Une polémique a d'ailleurs débuté depuis peu au sujet d'un projet d'«ouverture» de ces terrains fédéraux à tous, perspective qui fait frémir nombre de paléontologues professionnels. Ceux-ci savent par expérience que leurs moyens financiers ne leur permettent pas toujours de soutenir la concurrence des marchands de fossiles. Quoi qu'il en soit, pour l'instant, les terrains fédéraux sont fermés à la récolte commerciale des fossiles.

Lorsque les enquêteurs, en juillet 1993, se livrent à une perquisition au siège du *Black Hills Institute*, ils passent au peigne fin les notes de terrain de cette organisation, pour y rechercher des traces de fouilles illégales sur des terrains fédéraux, et retrouver la provenance de fossiles appartenant à l'institut. Ces investigations sont complétées ensuite par la recherche d'indices matériels sur le terrain.

Au terme de cette longue enquête, qui aurait coûté des millions de dollars au FBI, le *Black Hills Institute* est finalement accusé de divers délits en novembre 1993. Ironie du sort (saure ?), le tyrannosaure Sue, dont la découverte a lancé l'affaire, ne figure pas parmi les fossiles dont la possession est reprochée à P. Larson et ses associés. Ce qu'on leur reproche, finalement, relève surtout de la «délinquance en col blanc», fraude fiscale, infractions à la législation douanière, etc. Pour ce qui est des fossiles, on ne peut

guère reprocher aux frères Larson que le «vol» sur des terrains fédéraux de quelques spécimens d'une valeur ne dépassant pas 100 dollars. L'ensemble de ces charges suffit cependant, au terme d'un procès de sept semaines, à faire condamner P. Larson à deux ans de prison, alors que son frère n'écope que de prison avec sursis et que leur associé est acquitté. Après appel, certaines

des charges pesant sur eux sont abandonnées en 1995, mais pas toutes, et P. Larson est finalement emprisonné en 1996.



P. Larson achète, pense-t-il, à M. Williams les droits sur le fossile.

VALEUR DU FOSSILE : 5 MILLIONS DE FRANCS

Que devient le tyrannosaure dans cette affaire ? Le tribunal décide que le *Black Hills Institute* n'a aucun droit sur le spécimen. Ce n'est pas pour autant que les Sioux ont satisfaction et se voient remettre le squelette ! Il est jugé que Maurice Williams est le propriétaire légal de Sue, même si l'État fédéral est responsable de ses terres. M. Williams est plus sensible à la valeur pécuniaire du tyrannosaure qu'à son intérêt scientifique, et le Bureau des Affaires Indiennes lui donne finalement l'autorisation de vendre le fossile, qui devrait être mis aux enchères prochaine-

ment à New York par Sotheby's (après que la préparation du spécimen ait été achevée). Les estimations sur le prix que devrait atteindre Sue varient grandement, même si le chiffre d'un million de dollars (ou plus) est souvent avancé...

A l'exception de M. Williams, personne n'est satisfait, évidemment, de cette décision. P. Larson est en prison, les Sioux se sentent floués et les associations paléontologiques qui se sont attaquées pendant des années aux positions du *Black Hills Institute* et au commerce des fossiles en général s'aperçoivent aujourd'hui que le tyrannosaure risque d'échapper définitivement aux paléontologues professionnels américains. Il est en effet peu probable qu'une institution officielle (du moins aux États-Unis) trouve les fonds nécessaires à l'achat de Sue, même si Sotheby's se déclare prêt à accorder des facilités de paiement aux seules institutions américaines.

POURQUOI TANT DE YENS ?

De l'avis de beaucoup, le tyrannosaure risque fort de quitter les États-Unis, pour se retrouver dans une collection japonaise. Il est vrai que, depuis un certain nombre d'années, les Japonais s'intéressent aux dinosaures. L'archipel nippon est peu riche en terrains mésozoïques susceptibles de livrer des restes de ces animaux, même si un certain nombre de découvertes ont été réalisées ces dernières années. Aussi les squelettes qui ornent certains musées et collections privées japonais proviennent, pour la plupart, d'Amérique du Nord. Ils sont achetés très chers et ont contribué à l'envol du marché des fossiles. Toutefois le péril japonais brandi si volontiers par les «protecteurs» des fossiles n'est qu'un



M. Williams, propriétaire du terrain, conteste la vente...



Le FBI saisit le fossile de *Tyrannosaurus rex*. Une campagne de protestation est lancée par le Black Hill Institute : «Libérez Sue».

aspect du problème plus vaste posé par l'affaire Sue.

La véritable question est celle de l'exploitation des sites fossilifères par des collecteurs commerciaux, et il n'est pas propre aux États-Unis, même si les problèmes y sont actuellement particulièrement aigus (en partie à cause des lois américaines).

Bon nombre de paléontologues professionnels déclarent leur hostilité au commerce des fossiles : ils regrettent un peu naïvement que ces objets d'intérêt scientifique puissent avoir un prix ! Or le marché international des fossiles existe, soumis comme les autres aux lois de l'offre et de la demande, et il est aussi naïf qu'illusoire de déplorer son existence. Après tout, le marché des œuvres d'art, biens culturels par excellence, existe aussi, et aucun directeur de musée artistique n'a jamais demandé sa suppression.

De surcroît, les collections paléontologiques des grands musées d'histoire naturelle du monde entier se sont constituées, et continuent à s'enrichir, par des achats de fossiles. Durant la première moitié du ^{xx}e siècle, les grandes institutions paléontologiques américaines, canadiennes et européennes se sont fournies en squelettes de dinosaures et autres vertébrés fossiles auprès de collecteurs-commerçants expérimentés.

Les plus célèbres furent certainement Charles Sternberg et ses fils, une véritable dynastie de paléontologues commerciaux qui exploita de nombreux sites aux États-Unis et au Canada. Ces pratiques ne choquaient personne à l'époque,

et il a souvent été plus facile et moins coûteux d'acquérir un squelette spectaculaire découvert et préparé par la famille Sternberg que de monter soi-même une expédition sur de lointains gisements fossilifères et d'assurer ensuite la préparation des spécimens recueillis.

Les musées eux-mêmes ne se sont pas privés, à l'occasion, de mettre en vente des fossiles appartenant à leurs collections. Un bel exemple, et qui concerne déjà un tyrannosaure, remonte à 1941, lorsque l'*American Museum of Natural History* de New York vendit au *Carnegie Museum* de Pittsburgh le type (c'est-à-dire le spécimen original à partir duquel l'espèce avait été nommée) de *Tyrannosaurus rex* ! Un des prétextes invoqués était le danger d'un bombardement de New York par les Allemands, ce qui était surestimer les possibilités de la Luftwaffe, même si l'idée pouvait paraître attrayante à Hitler. En fait, l'*American Museum* disposait depuis 1908 d'un second squelette de *Tyrannosaurus rex* plus complet que le type et n'avait apparemment pas de scrupules à vendre ses doubles (dans ce cas particulier, il est vrai, à un autre musée).

Ce qui conduit nombre de paléontologues et d'amateurs de dinosaures américains à se lamenter aujourd'hui sur le sort de Sue, et à se lancer dans des combats à l'issue incertaine (avec entre autres une campagne auprès du Congrès), c'est, au fond, qu'un bon nombre de fossiles extraits à des fins commerciales, y compris le tyrannosaure en question, sont aujourd'hui proposés à des prix qui les met-

tent hors de portée des institutions officielles. Les attaques que l'on peut lire sur les méthodes de fouilles prétendument inadéquates des marchands de fossiles relèvent plutôt de la rhétorique. Il n'en reste pas moins que le problème est réel : des fossiles paléontologiquement importants échappent à toute étude scientifique, parce qu'ils disparaissent sans laisser de trace chez des collectionneurs privés peu soucieux de les mettre à la disposition des chercheurs.

La question ne se pose pas seulement aux États-Unis, bien sûr, même si elle se pose dans ce pays avec une acuité particulière, du fait des lois en vigueur et du développement du commerce des fossiles. Le grand problème, au départ, est celui de la propriété des fossiles, avant même qu'ils ne soient extraits du sol. Aux États-Unis, en dépit des projets d'«ouverture» des terrains fédéraux à tous, les fossiles trouvés sur ceux-ci demeurent protégés, puisqu'il faut des permis officiels pour les extraire. Sur les terrains privés, en revanche, le propriétaire est maître chez lui et peut fort bien donner la préférence à un marchand de fossiles moyennant une contrepartie financière.

LE PLÉSIOSAURE DE MILLAU

En France, une loi récente prévoit la protection des sites paléontologiques importants, mais dans la pratique, le problème de la propriété des fossiles se pose aussi. La première précaution que prend un paléontologue responsable désireux de fouiller un gisement de fossiles, c'est de trouver le propriétaire du terrain (au moyen du cadastre, si besoin est), et de lui demander l'autorisation de fouiller et de conserver les fossiles découverts (dans une institution reconnue). Ce propriétaire peut être une personne privée, une commune ou l'État. La réponse peut être négative. Cependant, l'exemple des activités de fouilles du Musée des dinosaures d'Espéras (Aude) depuis 1989 sur un bon nombre de sites du Languedoc et des Pyrénées, montre que les propriétaires sont le plus souvent coopératifs.

Il n'en reste pas moins que, sans pour l'instant aller jusqu'aux excès de l'affaire du *Black Hills Institute*, la question de la propriété des fossiles peut conduire en France devant le tribunal. En 1986, un squelette d'un reptile marin jurassique du groupe des plésiosaures trouvé près de Millau (Aveyron) fit l'objet d'un procès. Les premiers ossements de cet animal avaient été trouvés par un jeune garçon parti à la recherche de fossiles, qui avait

averti le Musée de Millau, lequel organisa l'extraction en bonne et due forme du reste du squelette. C'est alors que la famille du découvreur se lança dans une action en justice afin de récupérer la moitié du fossile, conformément à la loi française sur les trésors, auquel elle assimilait le plésiosaure.

Le tribunal jugea qu'il ne s'agissait pas d'un trésor (qui, selon la loi, doit être trouvé de façon fortuite, ce qui n'était pas le cas), mais ordonna que les os trouvés par le découvreur lui soient rendus (on peut se demander à quoi ils peuvent bien lui servir ; le musée, lui, peut aisément les remplacer par des moulages), le reste appartenant à la commune où le fossile avait été trouvé – et qui a décidé de le déposer au Musée de Millau. Ce jugement de Salomon illustre à merveille les difficultés juridiques qui peuvent s'élever en France au sujet de fossiles.

L'IRE DES PROFESSIONNELS EST-ELLE JUSTIFIÉE?

La solution passe-t-elle pour autant par des restrictions au droit de collecter des fossiles ? C'est ce que prônent certains paléontologues : ils souhaiteraient que seuls les chercheurs professionnels y soient autorisés. Ce point de vue est quelque peu simpliste. Il est normal que les sites de grande importance scientifique soient exploités selon des méthodes bien définies afin d'en tirer toute l'information possible, et soient «réservés» aux professionnels ; en revanche, sur de nombreux gisements fossilifères, le ramassage des fossiles par le

plus grand nombre possible de collectionneurs, qu'ils soient amateurs ou professionnels, est au contraire souhaitable. C'est le cas, par exemple, de falaises côtières soumises à une érosion intense, ou de carrières en exploitation. Dans de tels cas, la «durée de vie» d'un fossile après qu'il est mis au jour est très limitée, et comme il est matériellement impossible aux paléontologues professionnels d'exercer une surveillance constante sur de tels sites, l'action du plus grand nombre est souhaitable.

Reste ensuite à persuader les amateurs que la place la plus souhaitable pour un fossile intéressant n'est pas nécessairement la cheminée de leur salon, ou même les tiroirs de leur collection. Il peuvent être persuadés que leur activité se trouvera valorisée si leurs découvertes peuvent faire l'objet d'études scientifiques et être préservées pour la postérité dans une institution officielle.

Reste aussi aux paléontologues professionnels à ne pas considérer systématiquement les amateurs comme des pillards et des concurrents, et à établir avec eux des relations de confiance réciproque. L'expérience montre que la coopération est souvent possible.

Quel statut réserver aux professionnels qui s'adonnent au commerce des fossiles ? Grande est la tentation de condamner sans appel leurs pratiques. Les mesures restrictives préconisées imposent... une certaine mesure. Comme nous l'avons vu, beaucoup de musées, s'ils en ont les moyens, achètent des fossiles à des marchands, et il serait pour le moins hypocrite pour les chercheurs de ces institutions de fulminer contre un commerce qu'ils encouragent par leurs achats.

D'un point de vue purement scientifique, si un fossile intéressant se trouve sur le marché, il est certainement plus satisfaisant qu'il soit acheté par une institution reconnue, qui le mettra à la disposition des chercheurs, que par un collectionneur privé.

Il faut savoir aussi que dans certaines régions du monde, comme le Nord-Est du Brésil ou le Sud marocain, la récolte et la vente des fossiles constituent une activité économique non négligeable pour des populations dont les ressources sont maigres. Nombre de fossiles d'un très grand intérêt scientifique provenant de ces endroits ne sont accessibles aux spécialistes que par voie commerciale.

On peut le regretter, tonner contre, mais la diabolisation est-elle efficace ? Tant qu'il existera un marché pour les fossiles, leur commerce continuera. Et ce qui était valable au début du siècle peut l'être encore dans certains cas : il peut être plus simple, et même plus économique de se procurer certains fossiles auprès d'un commerçant sérieux et compétent que de monter soi-même une expédition lourde et difficile. Ce n'est pas pour autant, bien sûr, que les paléontologues doivent renoncer à aller eux-mêmes sur le terrain. Les commerçants peuvent dans certains cas jouer le rôle d'avant-garde, et attirer l'attention des professionnels sur de nouveaux gisements qui pourront ensuite faire l'objet de missions scientifiques.

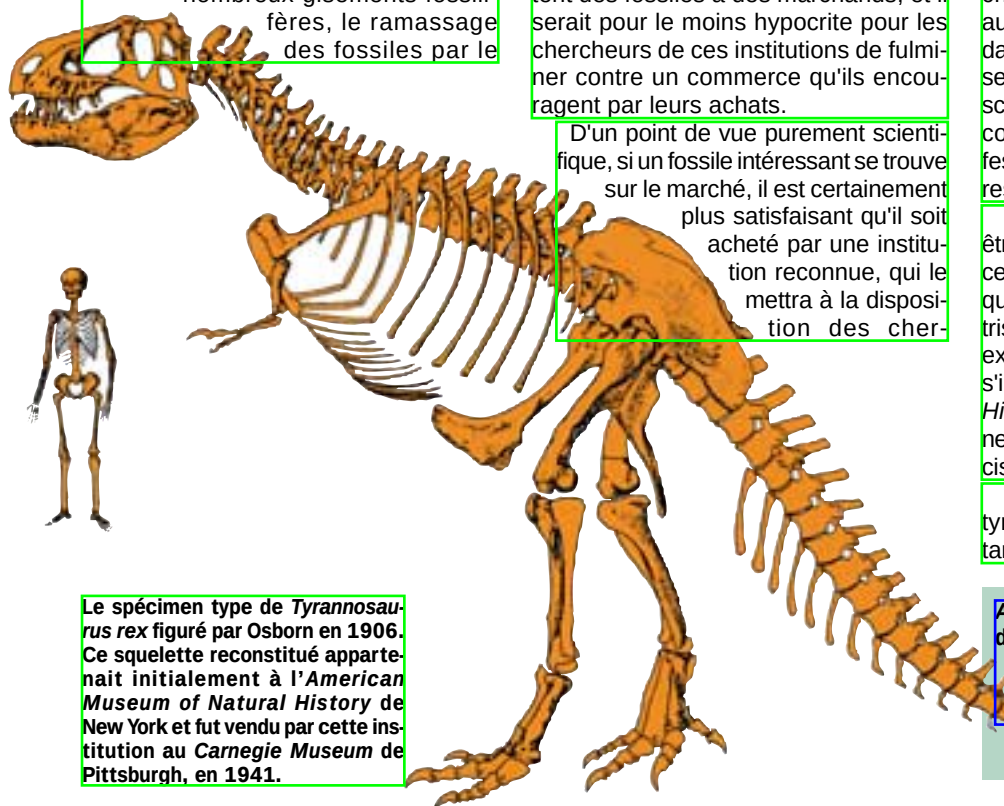
Une telle coopération est illustrée par l'exemple récent du plus ancien proboscideen connu, *Phosphatherium escuilliei*, cet «éléphant» primitif de la taille d'un chien provenant de gisements de phosphates marocains vieux de quelque 55 millions d'années, et dont le premier et le deuxième spécimens furent trouvés chez un marchand lors d'une bourse aux fossiles. Il ne s'agit pas de sombrer dans l'angélisme : certains marchands ne se préoccupent guère des progrès de la science, mais l'expérience montre que la coopération entre paléontologues professionnels et collectionneurs commerciaux responsables profite aux deux parties.

Les chercheurs officiels ne peuvent être partout, la Terre est vaste, et, lorsque cela est possible, la coopération ne peut qu'être préférable à la confrontation. La triste histoire du tyrannosaure Sue est un exemple de ce qu'il ne faut pas faire : s'il était resté entre les mains du *Black Hills Institute*, peut-être les professionnels auraient-ils aujourd'hui moins de soucis quant à son destin...

«Monsieur de Tyranno, vraiment nous tyrannise...» pressentait Edmond Rostand, il y a tout juste un siècle.

Archimède, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE présente l'histoire de *La malédiction du tyrannosaure* le mardi 3 juin à 20 heures.

Le spécimen type de *Tyrannosaurus rex* figuré par Osborn en 1906. Ce squelette reconstitué appartenait initialement à l'*American Museum of Natural History* de New York et fut vendu par cette institution au *Carnegie Museum* de Pittsburgh, en 1941.



Les flambées boursières...

CHRISTIAN WALTER

... sont parfois dues à des événements rares de l'économie réelle, aux fortes conséquences.

A lire la presse, «La finance flambe», «L'économie réelle disparaît sous la sphère financière», «La bulle financière devient dangereuse», «Une gigantesque bulle spéculative, éloignée des réalités économiques...» ; les commentaires alarmistes pleuvent lors des grandes variations boursières, qu'il s'agisse de ruptures, d'envolées brutales des cotations, d'amples mouvements de hausse ou de baisse apparemment incontrôlés. Le président de la Réserve fédérale américaine, Alan Greenspan, abonde dans ce sens lorsqu'il décrit «l'exubérance irrationnelle» des marchés boursiers, exubérance qui risque «d'affecter l'économie réelle». Comment analyser ces démesures apparentes ?

Démessure par rapport à quoi ? Une «bulle» est une différence entre un prix théorique, reflétant la valeur «fondamentale» du bien économique, et le prix de marché. Il y a bulle quand l'importance de l'écart incite à penser que l'évolution des prix du marché n'est pas justifiée par un changement des fondamentaux.

A l'opposé, de grandes variations peuvent résulter de chocs affectant l'économie «réelle» ou d'anticipations des

opérateurs sur les conséquences de ces chocs, même si ces chocs sont des événements très peu probables. Quand ils ne se produisent pas, la menace qu'ils représentaient est oubliée, et la spéculation apparaît sans cause.

LA RARETÉ CRÉE LES DÉRÈGLEMENTS

Ainsi peut-on réanalyser la crise financière célèbre, celle de la «folie des tulipes» (*tulipmania*) qui eut lieu en Hollande entre 1634 et 1637 ; le grand mouvement continu de hausse des cours qui a précédé la chute a longtemps été considéré comme l'archétype de la bulle spéculative. L'économiste et prix Nobel Samuelson n'évoquait-il pas en 1967 «l'autoréalisation d'un monde purement financier issu des rêves d'un groupe mal identifié». Or, l'analyse historique a montré depuis que la valeur fondamentale de la tulipe était affectée.

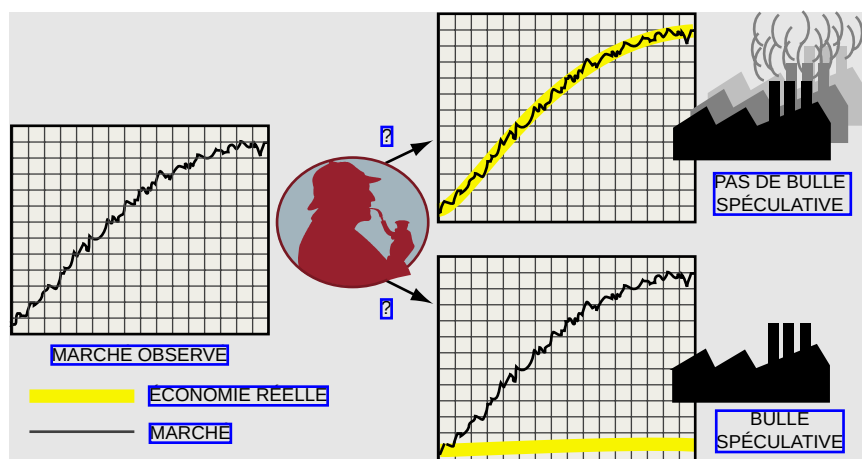
Un exemple plus proche est celui des grandes fluctuations du peso mexicain en 1976. Des opérateurs ont vendu massivement pour anticiper une dévaluation possible du peso, dont la probabilité était faible, mais qui aurait eu de fortes

conséquences. La dévaluation n'a pas eu lieu, ce qui est la règle pour les événements de faible probabilité. Toutefois, ces anticipations ont, par effet autoréalisateur, engendré de fortes variations de cours. Depuis, le «cas du peso» désigne des perturbations du marché résultant d'événements très peu probables, mais aux conséquences graves. Autres exemples, la fermeture du détroit d'Ormuz pendant la guerre Iran-Irak ou, plus récemment, des risques de catastrophes naturelles (tremblement de terre au Japon) ou artificielles à effets importants sur l'environnement (accident de centrale nucléaire ou naufrage de pétrolier géant, obligeant les assureurs à payer de fortes indemnités) ; dans ces situations, les intervenants sur le marché sont plus sensibles à l'événement de petite probabilité mais de grande conséquence, qu'aux autres possibilités de l'économie réelle. La «masse» de cet événement attire toutes les anticipations des opérateurs, conduisant alors à de fortes fluctuations. Chaque intervenant achète ou vend en fonction d'une valeur très différente de la valeur fondamentale initiale.

Si l'événement pressenti n'a pas eu lieu, on sera tenté de diagnostiquer, après-coup, l'existence d'une bulle spéculative, car les données de l'économie réelle ne justifieront pas *ex post* les évolutions financières. En fait, il y a bien eu modification probable de la valeur fondamentale du titre et il n'y a donc pas de bulle. Les intervenants n'ont fait que traduire dans les cours les changements possibles de valeur fondamentale. C'est la très petite probabilité d'une grande modification de la valeur fondamentale de l'objet économique réel qui produit les grandes fluctuations financières du marché.

Lorsqu'on observe de grandes fluctuations des marchés, les opérateurs s'interrogent : est-ce une déviation non justifiée du prix de la valeur fondamentale ou une agrégation dans les prix d'une modification des fondamentaux. C'est seulement dans la première situation qu'il sera possible de parler de bulle. Dans la seconde, une information nouvelle a été incorporée dans les cours, et le marché a bien fonctionné. Une bonne modélisation des fondamentaux, incluant les événements réels rares, est un travail préliminaire indispensable si l'on veut à raison qualifier de «bulle» une hausse (ou une baisse) apparemment incontrôlée des cours. Après avoir estimé la valeur fondamentale de l'objet économique réel, on sera en mesure de choisir entre un marché efficace ou une bulle financière.

Les grandes variations boursières ne seraient-elles que le reflet financier des événements rares de l'économie réelle ?



L'observateur qui constate une forte hausse des cours, s'interroge : y a-t-il modification des données de l'économie réelle ou mouvements spéculatifs ? Il y a emballement boursier sans bulle si la valeur fondamentale est affectée par un événement rare de l'économie réelle.

La téléolfaction

HERVÉ THIS

À quand cette nouvelle forme de télécommunication ?

Souvenons-nous de l'essor de la musique, il y a un peu plus d'un siècle quand tous ceux qui disposaient d'un téléphone purent apprécier les virtuosités des grands interprètes. À l'époque, la transmission d'images semblait utopique, mais moins de 20 ans s'écoulèrent avant que P. Nipkow, en Allemagne, parvienne à transmettre des sensations visuelles : cette fois, les bénéficiaires furent les adeptes de Polymnie, Terpsichore, Erato, Melpomène et Thalie.

Quels royaumes de la transmission restent à conquérir ? La transmission de sensations tactiles est en passe d'être maîtrisée, grâce à des gants munis de cristaux piézoélectriques qui enregistrent ou qui exercent des pressions. Mais les odeurs ? Les saveurs ? Le retard de la téléolfaction et de la télégustation navre les gourmands.

Les sensations olfactives ou gustatives naissent de la liaison de molécules aromatiques ou sapides à des cellules réceptrices du nez et de la bouche. Pour transmettre de telles sensations à distance, on imagine deux possibilités. Soit on analyse l'activité électrique du cerveau engendrée par ces sensations, on transmet ces analyses à distance, et l'on stimule le cerveau du receveur à l'aide d'électrodes : c'est ainsi qu'André Holley et Anne-Marie Mouly, à l'Université de Lyon, ont obtenu des conditionnements de rats en excitant leur bulbe olfactif.

Soit on analyse les mélanges de molécules odorantes ou sapides comme on le fait pour les couleurs, en les rapportant à des stimuli arbitraires de base ; puis, à la réception, on mélange les molécules de base pour reproduire les sensations initiales.

Les capteurs d'arômes, parfois surnommés « nez artificiels », pourraient être des composants utiles pour la mise au point, encore lointaine, de tels systèmes. Nés des besoins de l'industrie agro-alimentaire, ces capteurs assurent déjà, dans quelques usines, l'évaluation objective des composés volatils émanant des produits. Il en existe plusieurs types.

LES NEZ ARTIFICIELS

À la Station INRA de Theix, Jean-Louis Berdagué et ses collègues ont mis au point un système de spectrométrie de masse qui analyse l'ensemble des composés volatils des échantillons. Les échantillons sont décomposés thermiquement sur une cupule chauffante ; les molécules de la fumée, fragmentées et ionisées, passent dans un spectromètre de masse : des champs électriques ou magnétiques dévient ces fragments électriquement chargés d'une quantité proportionnelle à leur masse et à leur charge électrique. Dans leur analyseur, les chercheurs de Theix obtiennent une signature du produit testé. Les résultats sont significatifs : d'après les signatures, l'analyseur retrouve

l'origine d'une huître venant des côtes de France (quel gastronome parviendrait au même résultat ?).

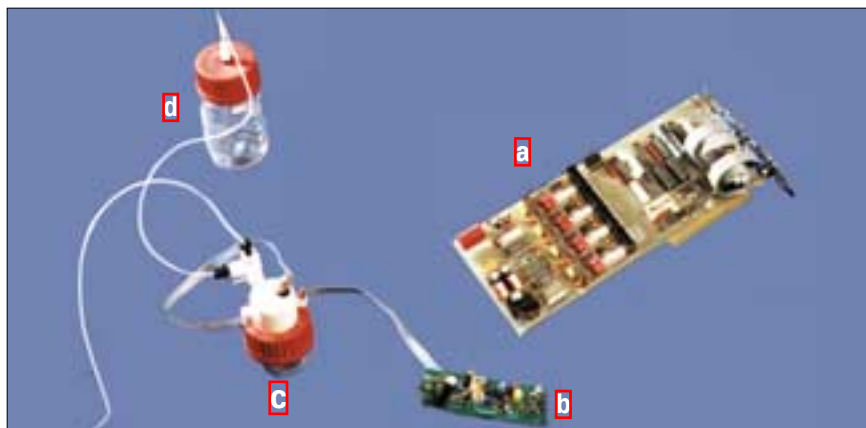
L'autre méthode est l'utilisation de semiconducteurs dopés sur lesquels viennent s'adsorber les composés volatils : la résistance électrique du semiconducteur dopé diminue avec l'adsorption momentanée et réversible des composés volatils. Comment utiliser de tels détecteurs ? Au Laboratoire INRA de Dijon, Patrick Mielle et ses collègues étudient des détecteurs composés d'un substrat céramique, chauffé par une résistance et sur lequel est déposé un semiconducteur, tel l'oxyde d'étain, dopé par des oxydes de zinc, de fer, de nickel ou de cobalt. Selon le dopage, les capteurs réagissent différemment aux molécules adsorbées : le passage d'un mélange de composés volatils sur ces réseaux de capteurs engendre une signature, qui est traitée informatiquement.

L'emploi de ces réseaux reste toutefois difficile. Tout d'abord, comme les signaux des divers capteurs évoluent lentement au cours du temps, les chercheurs dijonnais ont mis au point une cellule de transfert rapide des échantillons pour l'étalonnage et pour la caractérisation des capteurs, avant leur utilisation en réseau. D'autre part, on a observé que les capteurs réagissent très différemment selon la température : cette particularité, qui doit être maîtrisée lors des étalonnages, est un avantage, parce que des mesures effectuées à plusieurs températures permettent d'obtenir des réactions différentes d'un même capteur ; on multiplie ainsi, artificiellement, le nombre de capteurs utilisés.

Enfin, comme l'enregistrement des signaux et la reconnaissance des signatures des divers mélanges imposent un traitement numérique lourd, qui limite le nombre de capteurs à moins d'une dizaine, P. Mielle et ses collègues ont proposé d'enregistrer les signaux à divers instants après l'injection des échantillons dans la cellule de mesure : le nombre de points expérimentaux est multiplié d'autant.

Aujourd'hui les cellules de mesure récupèrent 80 pour cent des molécules en phase gazeuse, et les réseaux testés, composés de six capteurs, qui font des mesures à quatre températures, caractérisent des mélanges de composés volatils en une dizaine de secondes : les performances du nez humain ne sont plus inaccessibles.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 1^{er} juillet 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



L'ensemble du matériel pour une analyse automatique des odeurs : une carte électronique d'acquisition des données (a), une carte qui porte les capteurs (b), une cellule de mesure (c) et une cellule à échantillon (d).

Le champion du monde battu par l'ordinateur

Pour les informaticiens, c'est un triomphe ; pour les joueurs d'échecs, le succès est contestable.

Le 11 mai 1997 à 16h 30mn, à l'Equitable Center de New York, Garry Kasparov, champion du monde d'échecs, abandonne dans la sixième et dernière partie du match qui l'oppose au super ordinateur conçu par IBM, DEEPER BLUE. Cette défaite consacre la victoire de la machine sur l'homme par le score de 3,5 points à 2,5. Les programmeurs et leurs puces ont-ils définitivement pris le pas sur les meilleurs joueurs d'échecs du monde ? On peut en douter pour au moins trois raisons.

1- Il est incontestable que G. Kasparov est le meilleur joueur du monde quand il joue contre d'autres humains. En revanche, il est probable que nombre d'autres joueurs auraient réalisé une meilleure prestation contre DEEPER BLUE grâce à leur connaissance supérieure des faiblesses – relatives – de la machine.

2- Dans aucune des six parties, Kasparov n'a joué de manière naturelle. Joueur d'attaque redoutable lorsqu'il affronte Karpov, Anand ou Kramnik, ses principaux rivaux, il a été sans arrêt sur la défensive contre l'ordinateur, ce qui ne convient pas à son style. Mal conseillé par ses seconds – le Grand-Maître russe Dokhoian et l'homme d'affaires allemand Fridel, qui ne connaissent pas

grand-chose au jeu des ordinateurs – il a été attentiste, espérant perturber le jeu de la machine et profiter ainsi de ses fautes éventuelles.

3- Kasparov a perdu rapidement la guerre psychologique contre son adversaire inhumain en lui supposant des qualités qu'il n'avait pas : l'infailibilité dans les calculs tactiques. Cette illusion lui fit abandonner la deuxième partie dans une position nulle (voir le diagramme 1).

DEEPER BLUE vient de jouer sa Tour de A8 en A6 au 45^e coup. Pratiquement sans réfléchir, Kasparov abandonne, estimant l'échange des Dames inévitable, après quoi la partie est effectivement gagnée pour les Blancs 45...Dxc6 46.dxc6 Tc8 47.Ta7+ etc., car les Noirs vont perdre le pion b5.

Il n'a pas pris le temps de calculer qu'après 45... Dé3! la machine gagne certes une pièce par 46.Dxd6, mais ne peut éviter un échec perpétuel après 46...Té8! Ce coup soustrait la Tour à l'attaque de la Dame blanche ; après quoi le Roi blanc ne pourra éviter les échecs de la Dame noire. Comment le champion a-t-il pu abandonner dans une position nulle, une première dans l'histoire des échecs ?

Simplement parce qu'il a « fait confiance à la machine » avec le syllogisme « s'il existait une ressource d'échec perpétuel pour les Noirs, DEEPER BLUE l'aurait forcément vue. Si DEEPER BLUE l'avait vue, il aurait joué un autre coup auparavant pour qu'une telle situation ne se produise pas. Donc il ne peut pas y avoir d'échec perpétuel, ce n'est pas la peine que je perde mon temps à calculer, la machine infailible l'a déjà fait, j'abandonne une position sans espoir ».

En fait on sait désormais que la machine avait une évaluation d'environ +1,5 – c'est-à-dire qu'elle pensait avoir un avantage d'un pion et demi – après avoir joué son 45^e coup Ta6. Elle n'avait donc pas vu l'échec perpétuel, ce qui démontrait à l'évidence qu'elle était capable de se tromper même dans l'évaluation de positions tactiques.

G. Kasparov qui a généralement un ascendant psychologique contre presque tous les joueurs humains craque nerveusement contre cet adversaire sans émotions. Après la 5^e partie, quand le score est égal 2,5 - 2,5, il déclare : « Je n'ai pas peur de dire que j'ai peur ». C'est la crainte au ventre que le cham-

GARRY KASPAROV, né le 13 avril 1963 à Bakou (Azerbaïdjan) – Grand-Maître à 17 ans et demi –, devient champion du monde en 1985 en battant son compatriote Anatoli Karpov. Il est le treizième champion du monde de l'ère moderne et le plus jeune à se parer de la couronne (22 ans et demi). Depuis il a défendu son titre quatre fois contre Karpov, une fois contre l'Anglais N. Short et l'Indien V. Anand.

G. Kasparov a un classement international (ELO) de 2820, ce qui est un record dans l'histoire du jeu de ces 26 dernières années. Il a prouvé que sa place de leader était incontestable en remportant récemment les tournois de Las Palmas et Linares (Espagne) devant tous les meilleurs joueurs mondiaux.

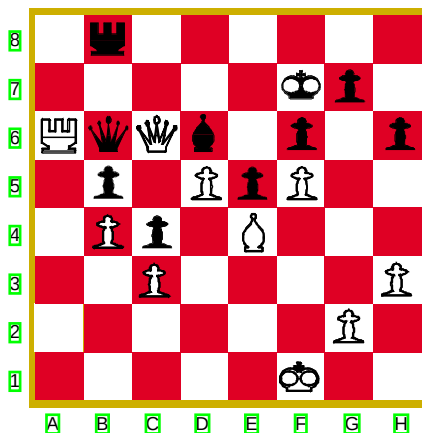
pion dispute la 6^e partie (avec les Noirs) qui aboutit à la plus cuisante défaite de sa carrière.

1. é4 c6 Kasparov n'a plus pratiqué ce coup en compétition depuis 12 ans ; il joue de manière non naturelle. Mais cette défense a la réputation d'être très solide.

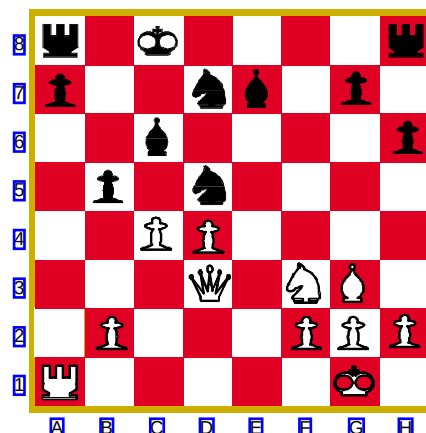
2. d4 d5 3. Cc3 dxé4 4. Cxé4 Cd7 le coup préféré de Karpov, le grand rival humain de Kasparov.

5. Cg5 Cf6 6. Fd3 é6 7. C1f3 h6? ! ce coup est très douteux. Sur les 16 dernières parties dans lesquelles il a été joué depuis 10 ans les Blancs en ont gagné 14 et les Noirs seulement 2.

8. Cxé6 ce sacrifice de pièce n'a pas été calculé par l'ordinateur, mais simplement lu dans sa mémoire. 8...Dé7 : Karpov a écrit dans un livre que 8...fxe6 est plus fort que Dé7 joué par Kasparov.



1. Kasparov abandonne



2. Kasparov (Noirs) abandonne après 19 coups

BRÈVES

Grenouille... vole!

Soumise à un champ magnétique de 16 teslas – près de 300 000 fois le champ magnétique terrestre – une grenouille s'est élevée de quelques centimètres dans les airs. Ce tour de force, réalisé sans refroidissement de l'animal, par les chercheurs de l'Université de Nijmegen, au Pays-Bas, est une application du magnétisme moléculaire : tous les atomes sont diamagnétiques, et ils repoussent les champs magnétiques qui leurs sont appliqués. Lorsque le champ magnétique est suffisamment intense pour contrebalancer la gravité de l'objet, ce dernier lévite. On pourrait soulever des humains, mais le coût d'un aimant suffisamment puissant, plusieurs centaines de millions de francs, est rédhibitoire.



SPZ

Crachat mortel

Quand une chenille chemine sur une feuille de maïs et la dévore, la plante libère, pour se protéger, des vapeurs chimiques qui attirent un parasite de la chenille. Le parasite dépose ses œufs dans la chenille, qui meurt. Des chimistes américains viennent de découvrir que la volicitine contenue dans la bave de la chenille déclenche la production de la bouffée mortelle qui attire les prédateurs du prédateur. Ce nouveau pesticide «naturel» potentiel s'ajoute à ceux que les chimistes recherchent pour réduire l'usage des pesticides chimiques polluants et qui n'agissent plus sur les insectes devenus résistants.

Le régime d'Ötzi

Ötzi, l'homme de 5 000 ans retrouvé momifié dans les Alpes, mangeait de la viande et des légumes tout comme ses descendants de la fin du XX^e siècle. Des biologistes ont analysé des prélèvements de son tube digestif : les bactéries détectées ressemblent à celles de la flore intestinale des Européens d'aujourd'hui. En revanche, il avait bu de l'eau contaminée : on a trouvé une bactérie, proche du micro-organisme qui transmet le choléra et qui est véhiculée par l'eau.



LENTIVICINTE/LEPSO

Suite page 24

DEEPER BLUE est né en 1989, mais s'appelait **DEEP THOUGHT** jusqu'en 1995 puis **DEEP BLUE** jusqu'à 1997. C'est un projet développé par les laboratoires de recherche d'IBM, situés à 60 kilomètres de New York.

Les deux principaux concepteurs de la machine sont Feng Hsiung Hsu et Murray Campbell, anciens étudiants de l'Université Carnegie Mellon de Pittsburgh auxquels se sont joints récemment Chung Jen Tan, Joseph Hoane, Terry Brody et surtout le Grand-Maître américain Joël Benjamin, ex-champion d'échecs des États-Unis, qui a servi de partenaire d'entraînement à la machine et donné de très utiles conseils aux programmeurs depuis sept mois.

Le hardware utilisé par **DEEPER BLUE** utilise le RS/6000 SP (*Scalable Powerparallel System*), système parallèle qui peut être équipé de 2 à 512 nœuds. Chaque nœud est un RS/6000 complet avec son processeur, sa mémoire et ses disques. Tous les nœuds sont interconnectés à un point de contrôle unique – la station de contrôle RS/6000 SP qui est là pour faciliter l'installation et la gestion du système.

DEEPER BLUE utilise 256 processeurs fonctionnant en parallèle, chacun étant capable de calculer environ trois millions de coups par seconde. Certains calculs se recoupant, les ingénieurs de **DEEPER BLUE** estiment qu'il calculait environ 200 millions de coups par seconde, soit environ 1 000 fois plus que les meilleurs logiciels du commerce tournant sur les plus rapides micro-ordinateurs.

Le programme et les mémoires

C'est sur ce second point que les progrès les plus importants ont été réalisés depuis le premier modèle il y a 15 mois. En 1996, **DEEP BLUE** était un supercalculateur qui avait une connaissance assez sommaire du jeu. **DEEPER BLUE** calcule deux fois plus vite que **DEEP BLUE**, ce qui n'améliore pas beaucoup le jeu à ce niveau, mais **DEEPER BLUE** joue nettement mieux aux échecs. Sa fonction d'évaluation, qui lui permet de mesurer les valeurs relatives des pièces, la sécurité du Roi, la mobilité des pièces, la structure des pions, le contrôle de l'espace, a très spectaculairement progressé puisque dans aucune des six parties il n'a vraiment très mal joué – même dans la première qu'il a perdue – alors que le modèle de 1996 avait mal joué la cinquième partie et surtout été grotesque dans la sixième et dernière partie. Les millions de parties qui figurent dans sa mémoire impressionnent le profane, mais ne sont pas d'une très grande utilité, car il ne sert à rien d'avoir une partie dans sa bibliothèque si l'on ne connaît le coup décisif. C'est sur le logiciel (le programme) que d'importants progrès peuvent encore être réalisés dans les années à venir. Une capacité de calcul encore plus puissante avec un nombre plus grand de processeurs en parallèle n'augmenterait guère le niveau de la machine.

9. 0-0 fxé6 10. Fg6+ Rd8 11. Ff4 b5
ce coup est une nouveauté, il n'a jamais
été joué auparavant par les champions.
12. a4 Fb7 13. Té1 Cd5 14. Fg3 Rc8
15. axb5 cxb5 16. Dd3 Fc6 17. Ff5 éxf5
18. Txé7 Fxé7 19. ç4 (*diagramme 2*).

Kasparov abandonne, l'attaque
blanche étant impossible à parer 19...
bxç4 20. Dxç4 Cb4 21. Té1 Té8 22. Fd6
Fxd6 23. Txé8+ Rb7 24. Txa8 Rxa8
25. Dg8+ Rb7 26. Dxd7 Rc7 27. Dxd6 et
les Blancs gagnent.

Kasparov n'avait, de sa vie, jamais
perdu une partie en moins de 23 coups.
C'est une humiliation que de s'avouer
vaincu au 19^e coup, ce que l'on appelle
une «miniature», caractérisée générale-
ment par une grosse faute du perdant.

Et maintenant?

Ayant gagné par 4 à 2 son match
contre **DEEP BLUE** en février 1996 et perdu
2,5-3,5 contre **DEEPER BLUE**, Kasparov
est en droit de réclamer une «belle», ce
qu'il n'a pas manqué de faire lors de la
conférence de presse d'après match où
il est apparu furieux... et mauvais perdant
«Je vous jure que la prochaine fois je

taillerai la machine en pièces... elle a beau-
coup de faiblesses, etc.».

Mais Kasparov qui clame depuis
plusieurs années qu'il est le dernier et le
seul rempart contre le sacre d'une
machine championne du monde aux
échecs, n'est plus très crédible après un
match où il a été méconnaissable. Ajour-
d'hui le monde des échecs attend de
voir ce que seraient capables de faire
d'autres joueurs prestigieux et même
quelques Grands-Maîtres moins forts,
mais réputés pour leurs grandes connais-
sances du jeu des ordinateurs comme
l'Américain Seirawan ou le Hollandais
Van der Wiel. Si Kasparov veut qu'on lui
donne une nouvelle chance, il faut qu'il
jure de jouer vraiment aux échecs comme
il sait si bien le faire, et non pas prati-
quer un anti-jeu indigne d'un champion.

Il n'empêche, la victoire est de taille,
comparable, selon certains informaticiens
enthousiastes, aux premiers pas de
l'Homme sur la Lune. Même si l'ordina-
teur ne joue pas comme l'homme, il bat
la plupart des joueurs humains...

Pierre NOLOT

Le Cabernet Sauvignon

En comparant l'ADN des raisins de Cabernet Sauvignon à celle de raisins d'autres cépages, John Bowers et Carole Meredith, de l'Université Davis, ont montré que cette variété serait apparue au XVII^e siècle dans le Bordelais, à la suite d'une pollinisation croisée entre deux cépages : le cabernet franc (un cépage rouge du Sud-Ouest et des pays de Loire) et le sauvignon blanc. À cette époque, la technique de pollinisation croisée artificielle n'était pas pratiquée, aussi le vent a-t-il produit ce miracle œnologique sur deux cultures voisines.

Des bactéries dans les puces

Les circuits intégrés renaissent au laboratoire Oak Ridge : Mike Simpson a mis au point un circuit intégré hybride constitué de détecteurs vivants implantés sur un substrat de silicium. Les détecteurs sont des bactéries sensibles à des substances spécifiques. Par exemple, en présence de polluants ou d'explosifs, ces bactéries émettent de la lumière visible qui peut être traitée électroniquement. Petites et peu onéreuses, ces puces vivantes pourraient être utilisées dans la surveillance de sites contaminés.



La Pythie et le volcan

Selon la légende, la prêtresse d'Apollon Pythien, à Delphes, était assise sur un trépied au-dessus d'une crevasse d'où s'échappaient des vapeurs. Inspirée par les effluves divines provenant des entrailles de la Terre, elle énonçait ses prophéties. Les archéologues qui avaient mis au jour le temple de Delphes n'avaient trouvé aucune trace d'activité volcanique. Pourtant, de récentes excavations ont mis à nu une faille géologique active à l'Est et une autre à l'Ouest du temple. Le géologue Jelle de Boer, de l'Université de Middletown, en a détecté une autre qui passe juste sous le temple. Une autre faille, aujourd'hui refermée par des tremblements de terre, devait relier les failles Est et Ouest et passer aussi sous le temple. Le mythe est peut-être réalité : la Pythie respirait les gaz qui s'échappaient des failles et qui déclenchaient ses visions divinatoires.



Suite page 26

Changement pour l'un, différence pour l'autre ?

Des slogans semblent remplacer les idées.

Comment choisissons-nous un Président de la République ou un député ? Nous fondons-nous sur les propositions, sur les réalisations passées ou sur l'image que nous donnent les candidats ? La plupart des hommes politiques semblent retenir la dernière hypothèse. Leurs discours mettent en avant des mots abstraits et porteur d'espoirs : à force de répétition, ils pensent ainsi construire une image.

Lors de la campagne pour les élections présidentielles de 1995, Jacques Chirac, choisit de se démarquer du Premier Ministre Édouard Balladur en incarnant le *changement*, et en développant des thèmes traditionnellement « de gauche ». Lionel Jospin, son concurrent socialiste, privé d'espace, tente de se démarquer en affirmant sa *différence*. Leurs interventions lors du face-à-face télévisé du 3 mai 1995 sont révélatrices : elles martèlent des slogans plus qu'elles n'expriment des idées.

Maurice Tournier, du laboratoire Lexicométrie et textes politiques (CNRS - Institut national de la langue française), a compté le nombre d'utilisations de chaque mot lors du débat. C'est J. Chirac qui utilise le plus *changement* : huit fois, sur un total de 9 391 mots, contre cinq fois chez son rival (pour 10 991 mots). L'équilibre est parfait pour *changer* : six contre six. Lionel Jospin tente en effet de brouiller la marque de J. Chirac en la reprenant à son compte. Celui-ci réagit en ajoutant un adjectif : *changement* devient véritable *change-*

ment, dans une intervention dont c'est manifestement le seul but : « Ce dont on a besoin aujourd'hui, c'est d'un changement. Lorsqu'on est sur le terrain, effectivement, on perçoit bien que les Français veulent un changement, et moi, c'est ça que je veux apporter, c'est un véritable changement. »

De façon beaucoup plus évidente, L. Jospin affirme sa *différence*, complétée par *différentes*. Des mots relais s'y ajoutent, en particulier *autre* et *contraire*, et une simple conjonction de coordination qui marque l'opposition, *mais*, est nettement plus employée par L. Jospin : 70 fois contre 37 par J. Chirac.

Jacques Chirac tente de brouiller l'image de son adversaire. L. Jospin martèle : « Eh bien ! je le marque comme une différence ! » ; « Nous pourrions revenir sur quelques points qui représentent des différences entre l'approche de Jacques Chirac et la mienne. Premier élément, je suis contre la reprise des essais nucléaires ? Voilà un motif de différence et de choix » ; « Je pense que c'est une différence fondamentale » ; « Deuxième élément de différence... » ; « C'est une conception, c'est une différence fondamentale dans l'état d'esprit... »

J. Chirac répond systématiquement par la négation des *différences* invoquées par L. Jospin : « C'est tout à fait mon sentiment » ; « Moi aussi, avec cette différence que... » ; « M. Jospin, permettez-moi de vous dire que je n'ai jamais rien dit d'autre... » « Sur ce point, nous disons la même chose » ; « On sera obligé de faire la même chose. »

Les candidats ne confrontent pas des idées distinctes sur la société ou la gestion des affaires publiques. Chacun tente de donner aux électeurs-télespectateurs une image dynamique, et de brouiller celle de l'adversaire. La publicité politique peut-elle remplacer le débat démocratique ?

CHANGEMENT



DIFFÉRENCE



Pendant la campagne pour l'élection présidentielle de 1995, Jacques Chirac se réclamait du *changement* et Lionel Jospin de la *différence*. La répétition de ces termes, inutile pour leurs argumentations respectives, avait pour but de faciliter l'identification des candidats et de leurs discours par les électeurs.

Enzyme et cancer

Le dysfonctionnement d'un système enzymatique participerait au déclenchement de certains cancers.

Allure d'haltère, poids et taille respectables, cette molécule est dispersée en milliers d'exemplaires dans chaque cellule. Son nom : le protéasome. Sa fonction : la décomposition des protéines cellulaires. Parce qu'elle semble ralentir ou accélérer la destruction de ces protéines, elle participerait à l'emballage de la multiplication cellulaire et, par conséquent, aux mécanismes de cancérisation.

La molécule, découverte au début des années 1980, est une protéase, une enzyme qui dégrade la plupart des protéines de la cellule, celles qui ont une courte durée de vie, et celles qui sont anormales ou endommagées. De ce complexe ressortent des fragments de protéines, décomposés eux-mêmes par d'autres enzymes en acides aminés (les constituants des protéines), lesquels sont ensuite réinjectés dans le circuit producteur de protéines.

Le protéasome sélectionne ses proies grâce à d'autres enzymes qui fixent sur les protéines cibles des étiquettes «À détruire», constituées d'un assemblage de petites molécules d'ubiquitine. Grâce à ce marquage, les protéines

sont reconnues par le protéasome, qui les dégrade. En contrôlant la durée de vie et d'action de nombreuses protéines, le système protéasome-ubiquitine commande le devenir des cellules. En effet, le cycle cellulaire, qui détermine le rythme de division des cellules, est réglé comme une horloge de précision par des protéines régulatrices. Si l'une d'elles est produite en trop grande quantité, en quantité insuffisante, ou encore à des périodes du cycle inadéquates, l'horloge fonctionne mal. C'est l'une des fonctions du système protéasome-ubiquitine de veiller à l'expression correcte des protéines régulatrices. Ses dérèglements risquent d'avoir des conséquences désastreuses, la cancérisation par exemple.

De telles perturbations surviennent lorsqu'un gène codant l'un des constituants du système subit des mutations ou des délétions. Toutefois, des mécanismes non génétiques peuvent aussi opérer. Par exemple, dans le cancer du col de l'utérus, dont 90 pour cent des cas sont causés par des papillomavirus, une protéine virale facilite la fixation d'ubiquitine sur la protéine p53, ce qui en accélère la dégradation. Or p53 est une protéine suppresseur de tumeur, qui inhibe les mécanismes tumoraux. De même, il y a quelques mois, une équipe américaine a montré que la concentration cellulaire d'un autre suppresseur de tumeur potentiel, la protéine p27, est réduite dans des cellules de certaines tumeurs colorectales ; le protéasome semble la reconnaître trop bien.

Une autre protéine, tre-2, présente dans diverses tumeurs humaines, en est un autre exemple. En 1993, une équipe américaine a montré que cette protéine est une version inactive d'une enzyme qui retire les étiquettes ubiquitine des protéines cibles du protéasome, juste avant leur dégradation. Ainsi, le protéasome dégrade sans relâche des protéines dont les étiquettes «À détruire» ne sont pas retirées. Enfin, dans certains cancers, on retrouve des concentrations élevées des protéines fos et jun, qui semblent échapper au système protéasome-ubiquitine.

Les anomalies du système protéasome-ubiquitine n'expliquent pas tous les phénomènes aboutissant à un cancer. Sylvie Beaudenon, de l'Université Rutgers, constate que l'inactivation de la protéine p53 observée dans plus de 50 pour cent des cancers

humains résulte de mutations de cette protéine, mais pas d'un dérèglement de la voie protéasome-ubiquitine. De plus, le système ubiquitine-protéasome n'est pas le seul à incriminer. Selon Marc Piechaczyk, de l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier, de nombreuses autres protéases sont synthétisées dans les cellules, et certaines pourraient aussi être indispensables au bon déroulement du cycle cellulaire.

Par ailleurs, le système protéasome-ubiquitine a d'autres fonctions. D'après Olivier Coux, à l'Université de Harvard, il joue un rôle dans l'immunité antivirale, parce qu'il produit les antigènes viraux activant les acteurs du système immunitaire ; il intervient aussi dans la fonte musculaire qui survient lors de certaines infections et au cours des cancers, et dans l'inflammation des tissus.

Que de fonctions pour un système enzymatique à peine connu voilà dix ans !
Jean-Jacques PERRIER

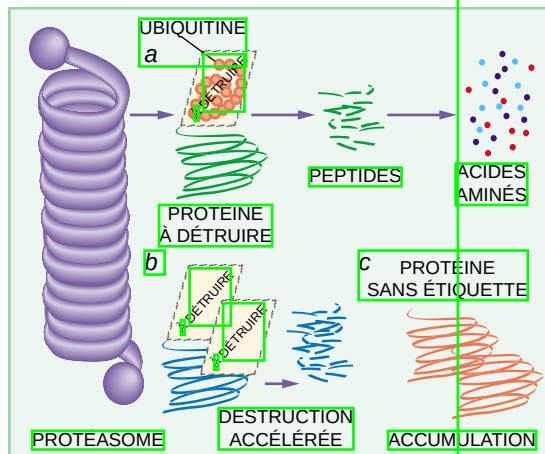
Meurtres sexistes dans la fourmilière

Les ouvrières tuent spécifiquement les larves mâles

Tout n'est pas pour le mieux dans le monde des fourmis. L'activité laborieuse de la fourmilière masque un conflit latent entre la reine et les ouvrières : ces dernières, responsables de l'élevage du couvain, favorisent les larves femelles en éliminant la majorité des mâles. Bien qu'en apparence, toutes les larves se ressemblent, Luc Passera et Serge Aron, du laboratoire d'éthologie et de psychologie animale du CNRS, à Toulouse, ont montré que les ouvrières sacrifient spécifiquement les mâles. Comment peuvent-elles les distinguer ?

Chez les abeilles, les guêpes ou les fourmis, chaque individu remplit une fonction précise au sein de la colonie : à côté des reines fertiles qui assurent la reproduction, les ouvrières, généralement stériles, récoltent la nourriture, défendent le territoire, entretiennent le nid et élèvent les larves. Les mâles, peu nombreux, ont une vie éphémère et disparaissent après l'accouplement.

Chez ces insectes sociaux, les œufs fécondés qui ont deux jeux de chromosomes, l'un provenant du père, l'autre de la mère, donnent des femelles qui deviendront soit des reines, soit des ouvrières. Toutes les filles d'une reine,



Le système protéasome-ubiquitine détruit les protéines qui portent une «étiquette» À détruire, constituée de molécules d'ubiquitine. Il fabrique des peptides qui sont eux-mêmes décomposés en acides aminés, lesquels sont réinjectés dans le circuit de fabrication des protéines (a). Quand une protéine porte trop d'étiquettes, elle est rapidement détruite (b). S'il s'agit d'une protéine suppresseur de tumeur, un cancer risque d'apparaître. Enfin, quand une protéine sans étiquette n'est pas reconnue par le protéasome, elle s'accumule (c), ce qui peut aussi perturber le rythme de division des cellules.

Un laser dans l'œil

L'ordinateur portable de demain n'aura pas d'écran, mais un système de laser qui formera directement l'image sur la rétine. La Société *Microvision* a mis au point un tel appareil constitué de lasers de très faible puissance. Son utilisateur voit une image flotter à un mètre de lui.

Le pénis manquant

Jadis les mâles de toutes les espèces d'oiseaux avaient un pénis. Pourquoi trois pour cent seulement des oiseaux mâles ont-ils conservé leur attribut? Pour des raisons d'économie.

Les mâles pénis déposent leur sperme à l'ouverture génitale de la femelle, qui choisit de faire ou non entrer le sperme dans des tubules de stockage où il subsiste jusqu'à la ponte d'un œuf.

Chez les espèces dont les œufs sont gros par rapport au corps, les femelles doivent être sélectives. Aussi, plutôt que de se débarrasser des œufs dus aux mâles munis de pénis, les femelles préfèrent s'accoupler avec les mâles sans pénis, car elles contrôlent alors l'insertion du sperme dans les tubules et la fécondation de l'œuf. La disparition de l'organe est un avantage adaptatif pour les mâles : ils sont plus souvent acceptés par les femelles.

Chez les espèces les plus grosses, telles les autruches, les femelles acceptent mieux le pénis (les œufs sont moins précieux), et les mâles ont pu, au cours de l'Évolution, garder leur organe.

Mort aux gorilles

La guerre civile au Zaïre fait d'innombrables victimes. Les singes payent aussi un lourd tribut aux malversations humaines. Peut-on s'en préoccuper alors que des dizaines de milliers de réfugiés sont dans la détresse? À chacun de répondre. Toujours est-il que mines, déforestations, fusillades et maladies font une hécatombe parmi les gorilles et les chimpanzés.

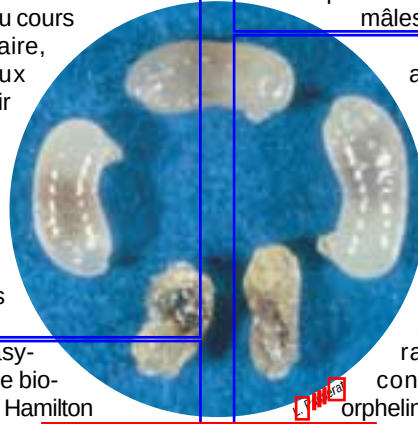


Courir sous la pluie

Pour être le moins mouillé possible par la pluie, doit-on courir ou marcher d'un pas stoïque? T. Peterson et T. Wallis ont calculé la quantité d'eau qui frappe le promeneur : un marcheur dont la vitesse est de 1,5 m/s est 23 pour cent plus mouillé qu'un coureur dont la vitesse de course est de 4 m/s.

fruits d'un même accouplement, ont 75 pour cent des gènes en commun : chacune hérite de l'unique jeu de chromosomes paternels (soit 50 pour cent de son propre génome) et de la moitié des chromosomes maternels (soit 25 pour cent de son propre génome). Contrairement aux mâles, les femelles ont deux jeux de chromosomes qui se recombinent au cours de la division cellulaire, de sorte que deux sœurs peuvent n'avoir aucun gène commun ou les avoir tous. De même, on calcule qu'elles ne partagent que 25 pour cent de tous leurs gènes avec leurs frères.

Partant de ces asymétries génétiques, le biologiste anglais William Hamilton a proposé l'hypothèse de la sélection de parentèle, pour expliquer l'origine du comportement social des hyménoptères : les ouvrières auraient avantage à promouvoir le développement des individus qui ont le plus grand patrimoine génétique en commun avec elles pour favoriser l'expression de leurs propres gènes dans les générations futures. Cela justifierait pourquoi les ouvrières, génétiquement plus proches



Deux larves mâles ont été détruites (en bas), tandis que les trois autres sont intactes.

de leurs sœurs (75 pour cent) que de leurs propres descendants (50 pour cent) sont stériles. Comme elles sont également plus proches de leurs sœurs que de leurs frères (25 pour cent), elles n'hésitent pas à les tuer, voire à les dévorer. Au contraire, la reine, qui transmet la moitié de ses gènes tant à ses filles qu'à ses fils, pond autant de mâles que de femelles.

L'équipe de Toulouse a vérifié que les ouvrières favorisent la survie des femelles : ces biologistes ont prélevé des œufs et des larves d'âges différents d'un couvain de fourmis d'Argentine qui prolifèrent sur le littoral méditerranéen. Ils les ont confiés à des sociétés orphelines, c'est-à-dire privées de reine, et ils ont observé que les ouvrières font le tri entre les mâles et les femelles dès l'éclosion des œufs, juste au moment où apparaît la larve. À ce stade l'observateur humain ne fait aucune distinction entre un mâle et une femelle. Les ouvrières opéreraient cette sélection grâce à une molécule odorante, une phéromone, spécifique du sexe de la larve.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Un accident stimulant

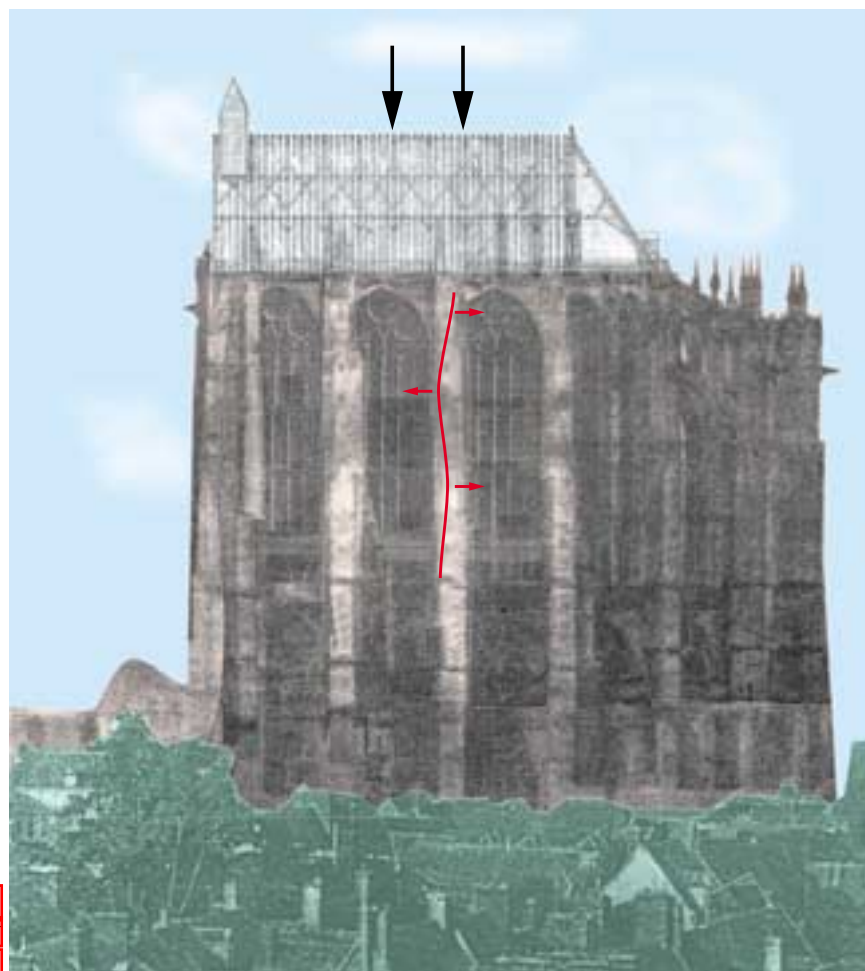
En 1284, l'écroulement partiel de la cathédrale de Beauvais a fait évoluer l'architecture.

La cathédrale de Beauvais, dont la construction a commencé en 1227, n'a jamais été achevée. Son histoire mouvementée est légendaire : la témérité de ses constructeurs, qui projetaient le plus haut édifice de leur temps, aurait été sanctionnée par des écroulements. Celui d'une partie de la voûte qui arrêta temporairement les travaux du chœur en 1284 n'a toutefois pas l'ampleur décrite par la tradition. En outre, les architectes en ont très vite tiré les leçons et ont inventé de nouvelles structures plus sûres.

Avec Patrick Hoffsummer, de l'Université de Liège, nous avons daté, par dendrochronologie (l'étude des cernes de croissance des arbres) la charpente du chœur de la cathédrale, qui s'étend de 48 à 65 mètres au-dessus du sol. Son

squelette qui couvre, sans discontinuité, les trois quarts de la longueur du vaisseau est constitué de bois coupés durant l'hiver 1257-1258 et vraisemblablement assemblés dans leur position actuelle en 1258 ou 1259. Cette date se situe 25 ans avant l'écroulement de 1284. L'examen des pièces montre qu'elles n'ont pas chuté de 50 mètres de haut. Elles n'ont pas non plus été démontées puis remontées. Elles appartiennent donc à la charpente originelle dont elles sont toujours le noyau.

L'écroulement de 1284 n'est toutefois pas imaginaire. Stephen Murray, de l'Université Columbia, a étudié attentivement les ouvrages de maçonnerie et situé l'avarie dans un espace restreint, à cheval entre la deuxième et la troisième travée du chœur. Cette hypothèse est confirmée par deux anomalies visibles dans la charpente au voisinage immédiat de cette zone. Au rang 6 de la charpente, un bois postérieur de quelques années a été placé en renfort sous un assemblage disloqué. À la cime de la charpente, un poinçon, pièce verticale



En 1284, une partie de la charpente du chœur de la cathédrale de Beauvais, seule partie achevée, s'est écroulée. Sur cette reconstitution, la zone qui s'est écroulée est située entre les flèches noires) ; l'écroulement a été provoqué par l'oscillation résonante d'un pilier (en rouge) sous les rafales de vent.

servant à suspendre la partie médiane des grandes poutres transversales, rompu comme sous un choc violent, a été minutieusement réparé par de longues bandes de fer.

Quelle est l'origine de l'accident ? Dans les années 1960 à 1980, des tirants de fer anciens ont été enlevés. Ils reliaient les palées d'arcs-boutants et de piles constituant le dispositif de contrebutement en pierre de la partie orientale du chœur. Depuis, on voit mieux comment cette forêt de piliers est mise en résonance par les turbulences que produit le vent circulant entre ces structures. La chronique, qui mentionne l'effondrement de « piliers extérieurs » au soir du 29 novembre 1284, incite à penser que ce phénomène de mise en résonance, amplifié jusqu'au seuil d'instabilité élastique, a été le moteur des dégâts : il a déterminé la chute d'un pilier extérieur intermédiaire.

Après cet accident, qui a révélé la fragilité de cette charpente sous les chocs, la conception des charpentes des

cathédrales a été modifiée. À Beauvais même, la réparation du poinçon brisé a été complétée ensuite par une modification du dispositif de contreventement longitudinal, ensemble de X destinés à empêcher que la structure se penche dans le sens de la longueur ; ce dispositif parcourait la charpente de bout en bout. Très rigide à l'origine, il a été modifié de manière que l'action des éléments obliques participant individuellement à ce contreventement opère par l'intermédiaire de pièces horizontales élastiques.

En outre, la dendrochronologie révèle que la cathédrale d'Amiens, à 60 kilomètres de Beauvais, a été entreprise immédiatement après l'accident de Beauvais : le désastre de Beauvais aurait stimulé la créativité des bâtisseurs d'Amiens. Avec succès : l'aspect de la charpente est si moderne que l'on a longtemps cru qu'elle avait été construite au XVI^e siècle.

Jean-Louis TAUPIN, Architecte en chef des Monuments historiques

Les bébés étoiles ont le hoquet

Détection d'une éruption de rayons X provenant d'une étoile en formation.

Les astronomes pensaient que les étoiles en formation émettent un rayonnement X, mais ils n'avaient aucune certitude. La détection d'une éruption X en provenance d'une proto-étoile a confirmé cette idée : Nicolas Grosso et Thierry Montmerle, du Service d'astrophysique du CEA, ont observé un fort sursaut qui provenait d'une étoile en formation enfouie dans un nuage de gaz et de poussières.

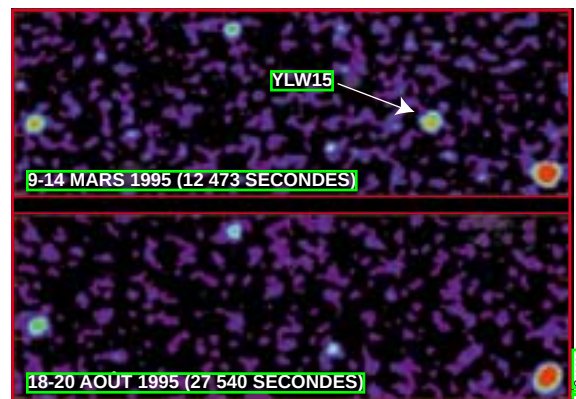
La formation des étoiles est inobservable dans le visible car les cocons de gaz et de poussières qui l'entourent sont opaques à ces longueurs d'onde. En revanche, l'infrarouge les traverse : aussi savait-on que les étoiles en formation sont entourées d'un disque d'accrétion de diamètre compris entre 10 et 100 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne de la

Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres).

A l'aide du détecteur à haute résolution du satellite ROSAT, les astronomes ont obtenu une image d'une région dense du nuage rho-Ophiuci situé dans la constellation du Serpentaire, lieu où l'on sait que des étoiles se forment. L'image a révélé plusieurs sources X mais l'une d'entre elles, particulièrement intense, a été attribuée à la source infrarouge YLW15. Cette protoétoile, âgée de 100 000 ans environ, est pourvue d'un disque d'accrétion, et un puissant jet de matière s'en échappe.

Cette brève émission a duré vraisemblablement moins de 24 heures et si elle n'avait pas été aussi intense, elle aurait échappé aux détecteurs. Les astrophysiciens ont estimé que la puissance rayonnée par la source dans la gamme des rayons X était cent millions de fois celle des émissions X des étoiles «adultes», comme le Soleil.

Quel phénomène a pu engendrer, de manière transitoire, une telle débauche d'énergie ? Dans le Soleil et dans les



Région de formation d'étoiles de la constellation du Serpentaire. L'éruption X de la source YLW15 est visible sur l'image prise en mars 1995 (en haut). Quelques mois plus tard, elle a disparu (en bas).

autres étoiles «adultes», on pense que l'émission des éruptions X résulte d'un réarrangement local des lignes de champ magnétique. Une partie de l'énergie libérée chauffe alors le gaz à des millions de degrés : en se refroidissant, le gaz émet des rayons X.

Si toutes les étoiles en formation ont émis ces hoquets de rayons X, le Soleil naissant aussi. Les astronomes devront en tenir compte pour écrire l'histoire du Soleil et du disque planétaire, il y a 4,5 milliards d'années

Un granite producteur d'électricité ?

Évolution de la géothermie Roches chaudes sèches.

La géothermie *Roches chaudes sèches (RCS)*, lancée lors de la première crise pétrolière, diffère de la géothermie classique en ce que l'on crée une circulation artificielle d'eau entre deux forages : on injecte de l'eau froide sous pression dans le premier et l'on récupère l'eau réchauffée dans le second.

Dans les années 1980, les premières expériences peu concluantes menées aux États-Unis, en Angleterre et au Japon, ont démontré que la réalisation d'un dispositif RCS nécessite une bonne connaissance du milieu rocheux, en particulier des fractures, car ce sont elles qui déterminent les caractéristiques de l'échangeur entre les puits. Une bonne production des puits ne peut être obtenue qu'en tirant avantage des discontinuités naturelles du milieu : il est plus rentable de s'appuyer sur les structures préexistantes

que de créer de toute pièce un réseau artificiel dans le bâti rocheux.

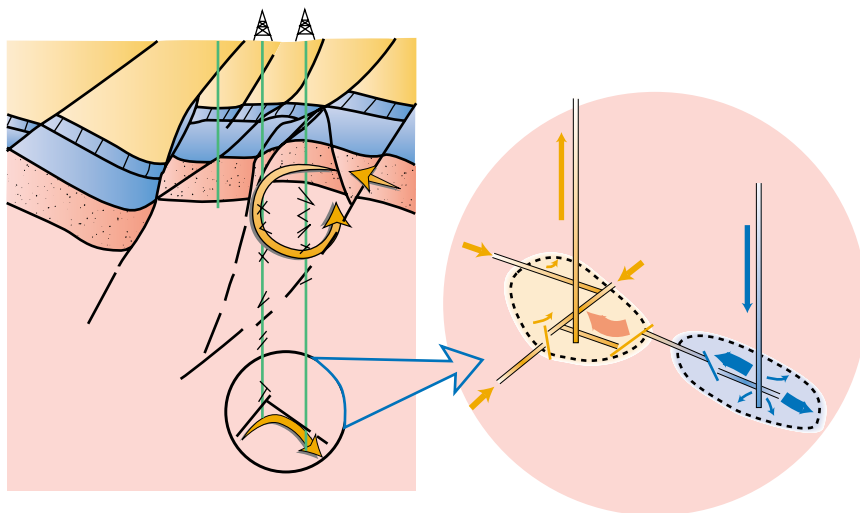
Le dernier espoir de la géothermie européenne *Roches chaudes sèches* est celui de Soultz-sous-Forêts, petite bourgade du Nord de l'Alsace, choisie en raison d'une anomalie thermique de surface résultant de circulations d'eau en profondeur. Trois forages ont été réalisés de 1987 à 1994, à des profondeurs respectives de 2 200 mètres, 3 600 mètres et 3 900 mètres.

Au-delà de 1 400 mètres, sous la couverture sédimentaire, les forages pénètrent le granite à mégacristaux de feldspath roses qui constitue, en Alsace du Nord, le soubassement profond du Fossé rhénan, des Vosges à la Forêt Noire. Entre 1 800 et 3 900 mètres, les forages ont recoupé des fractures. Les plus importantes ont plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Les minéralogies de ces niveaux témoignent d'une succession de phases d'altération du granite. Au cœur de ces fractures, dans les fissures ouvertes, percolent des fluides, trois fois plus salés que l'eau de mer. Ils sont issus des niveaux sédimentaires gréseux du Trias et ont été créés lors de la formation du Fossé rhénan, il y a plus de 25 millions

d'années. L'étude chimique de ces fluides montre qu'ils ont ensuite subi une évolution au contact du grès et du granite, à une température voisine de 230 °C. La partie profonde du Fossé rhénan constitue une zone découplée de la surface, où les circulations correspondent à de lentes boucles de convection. Certaines d'entre elles se situent entre le granite et l'aquifère sédimentaire, d'autres se déroulent entièrement dans le granite, jusqu'à une profondeur de 2,5 à 5 kilomètres au moins.

En 1993, des tests d'injection massive d'eau sous forte pression ont été effectués dans le premier puits profond pour déterminer comment réagissait le milieu cristallin à la stimulation hydraulique et pour augmenter la perméabilité au voisinage du puits. Durant toute l'injection, des sondes accélérométriques ont enregistré tous les événements microsismiques liés à la propagation de l'onde de pression engendrée par l'injection. Le nuage de points liés à la microsismique dessine une forme allongée dont la direction déterminée par les géologues est celle des fractures majeures. L'eau que l'on a forcée à pénétrer dans le massif a emprunté les anciens chemins de faiblesse de la roche.



Dispositif géothermique profond de Soultz-sous-Forêts. Dans la partie sédimentaire, les structures sont bien connues du fait d'un grand nombre de puits pétroliers et de profils de géophysique. Dans le granite, seuls les forages indiquent la localisation des grandes failles. Au cœur de ces zones, des fluides salés circulent lentement dans la partie profonde du Fossé rhénan (flèches jaunes) depuis des millions d'années. Dans le dispositif géothermique, l'eau est injectée dans le premier puits. Elle circule au sein du milieu fracturé qui constitue un échangeur de chaleur. Elle remonte ensuite dans le second puits, vers la surface, où elle sera à nouveau injectée. À Soultz, le réseau diffus de fractures assure la connexion entre les deux puits : le temps de transit est long, l'échange important, la participation des fluides naturels est prépondérante.

À la suite de l'injection, le puits a été remis en production, et on a constaté que les injections massives ont augmenté très nettement la productivité naturelle du granite, qui est passée de 0,5 à 8 litres par seconde dans des conditions de pression équivalentes. Les échantillonnages et les analyses ont montré que les eaux injectées se sont mélangées aux fluides salés du granite. Très vite, au cours de la production, le pourcentage de fluide issu du granite a augmenté, indiquant par là que le système de failles du granite constitue un véritable réservoir.

Contrairement aux autres sites RCS, l'implantation du second puits de l'échangeur a été décidée à partir des résultats de l'étude du premier puits, en tenant compte des directions des failles majeures. La distance record entre les deux puits est de 450 mètres. Durant l'été 1995 les deux puits ont été connectés et les expériences ont été menées en circulation bouclée : on a injecté ce qui sortait du puits producteur dans le puits d'injection. On a constaté que la variation du débit d'injection influait sur le débit de production, qui pouvait être maintenu à plus de 20 litres par seconde.

La démonstration était patente : la communication entre les deux puits s'est établie au travers d'un réseau de fractures complexes dont le volume est suffisamment grand pour que le temps de cheminement y soit important. Ce

volume peut être estimé à un minimum de 15 000 mètres cubes et la taille de la surface d'échange est d'environ plusieurs kilomètres carrés. Ces chiffres sont de très loin supérieurs à ceux obtenus dans les autres sites RCS.

Le projet de recherches en géothermie profonde de Soultz a donc permis de réaliser le plus grand échangeur géothermique mondial. La température est encore trop faible (160 °C) à la profondeur de 3 500 mètres pour assurer une production rentable d'électricité. Toutefois, la taille de l'échangeur permettra, en optimisant les paramètres du dispositif, d'assurer la viabilité du système.

Pourquoi le site de Soultz semble-t-il plus prometteur que les autres ? La différence principale tient au fait que la circulation ne se fait pas dans un milieu compact et homogène, comme celui des roches volcaniques, mais dans un système préfracturé. La présence d'un important réseau de fractures constitue des drains actifs favorisant le développement d'un échangeur de grande taille. La valorisation de ce réseau au cours de l'implantation des puits a pris plusieurs années, mais les résultats sont convaincants. Toutes les bases sont ainsi jetées et, d'ici quelques années, un nouveau concept de production d'électricité à partir de la chaleur du granite situé à quelques kilomètres de profondeur pourrait être validé à Soultz.

Equipe de projet Soultz, BRGM

ENHANCING THE
TRADE BANK'S
HMS
TRADES, ENLARGING
TRADE BANK, M. MEINORD

Sur les traces de Lavoisier

La création de la chimie moderne par Lavoisier était-elle une recherche suffisamment fondamentale pour le CNRS d'aujourd'hui? Certainement. Et ses études du salpêtre, de la poudre à canon ou du tabac? Là, nous hésitons, considérant que l'industrie est davantage concernée. Pourtant les correspondances du père de la chimie moderne démontrent que ce dernier ne séparait pas la recherche fondamentale du transfert de connaissances vers l'industrie. De même, Pasteur oscilla entre la science fondamentale et la science appliquée, entre la microbiologie, la médecine et les études du vin, du ver à soie...

Pourquoi le CNRS tout entier ne suivrait-il pas l'exemple de ses grands anciens? Pourquoi le transfert immédiat de résultats, convertis en produits industriels, ne côtoierait-il pas l'accroissement des connaissances? Les unités mixtes de recherche, fondées entre le CNRS et les industriels, sont un moyen d'aider le pays à valoriser économiquement sa recherche. Ce n'en est toutefois que la forme la plus poussée... qui ne doit pas faire oublier les autres possibilités.

Les plus élémentaires formes de collaboration sont la consultance à titre personnel ou le contrat de recherche, qui engage généralement un chercheur ou une équipe. Il y a dix ans seulement, on imaginait que la recherche pouvait être «pure» et l'on prétendait que les collaborations de la recherche et de l'industrie étaient contre nature. Toutefois, après les Assises de la recherche, en 1981, il fallut moins de cinq ans pour que les chercheurs admettent que leurs travaux puissent être valorisés et pour que les entreprises comprennent l'intérêt de la collaboration : de 350 par an, le nombre de contrats des unités du CNRS est passé à plus de 3 000. Les blocages idéologiques étant ainsi tombés, il fallut organiser les relations afin de satisfaire les deux parties.

Les grands accords de collaboration entre le CNRS et les entreprises s'ajoutèrent alors au tout petit arsenal déjà en place. Dans ce cadre, les deux parties développent en commun des programmes cofinancés ; toutefois, pour mettre en œuvre ces programmes, il fallait restruc-

turer les structures d'interface. Ainsi naquirent la Direction de la valorisation, la Mission des relations avec les entreprises, le Délégué aux affaires industrielles et le Conseil du partenariat avec les entreprises.

Puis le monde scientifique et technique sentit le besoin de programmes communs, tel *Bioavenir*, qui fut défini, avec le CEA, l'INSERM, l'Institut Pasteur, des université et un industriel, le Groupe Rhône-Poulenc. Ce programme, qui couvrirait ainsi les domaines santé, biochimie, agrochimie et méthodologie, déboucha sur la découverte de tests simples pour le criblage des principes actifs de médicaments, la mise au point de nouvelles formes galéniques, des résultats sur la résistance végétale aux herbicides et la production d'acides gras spécifiques. Au total, plus de 350 publications et communications, ainsi que 150 brevets!

D'autres programmes de ce type naîtront en 1998, car la Direction du CNRS n'a pas le sentiment qu'elle doit se contenter d'entretenir les laboratoires ; un rôle d'animation scientifique lui est dévolu. Pourquoi de tels programmes, plutôt qu'un ensemble de contrats ponctuels? Parce que la durabilité des collaborations et l'engagement d'une partie notable de l'institution imposent des réflexions : notamment, une collaboration qui se pérennise ne doit pas verser dans la prestation de services, et les laboratoires du CNRS ne doivent pas devenir des centres techniques et se substituer à ceux qui existent. Les objectifs de la recherche doivent être partagés, et c'est un atout pour notre pays si des actions concertées de recherche profitent aux entreprises nationales.

DES THÈMES MOBILISATEURS

Avec les unités mixtes de recherche, c'est à nouveau la définition d'un thème mobilisateur, pour une période assez longue, qui engendre les contrats de collaboration. Ayant identifié des besoins spécifiques, en personnels de recherche ou en équipements, l'industriel et le CNRS s'accordent sur les modalités de l'unité ; souvent l'entreprise identifie des règles de confidentialité, tandis que le CNRS



Guy Aubert, directeur général du CNRS.

impose ses règles de conduite de la recherche : présence d'un conseil scientifique, etc.

Le choix du site est important, car un laboratoire mixte est souvent une vitrine. Selon les cas, le laboratoire mixte est installé chez l'entreprise partenaire ou dans un centre de recherche publique, en France ou à l'étranger. Comme dans beaucoup d'autres laboratoires, deux endroits sont stratégiques : le coin revues des bibliothèques, où se fait la veille scientifique, et la cafétéria, où naissent de nombreuses idées, lors de réunions informelles.

Faut-il généraliser les laboratoires mixtes? Remarquons tout d'abord que ce type de structure est dans l'air du temps et s'inscrit dans une évolution d'ensemble de l'organisation de la recherche. L'évolution a commencé en physique, où le coût des gros instruments a nécessité le regroupement de dizaines, voire de centaines de chercheurs. La chimie a connu ce type d'évolution, et la biologie y vient, tandis que les sciences de l'homme et de la société voient également le rassemblement de chercheurs naguère dispersés.

Aujourd'hui, 17 unités mixtes sont actives, et huit ont été fermées, après la fin de leur mission, à la satisfaction des deux partenaires. Généralement les décisions de création ont été rapides et, une fois les équipes au travail, les transferts scientifiques et techniques se sont faits comme pour les unités propres ou associées : les brevets, par exemple, ont valorisé les résultats quand ceux-ci s'y prêtaient et quand les entreprises avaient la volonté de protéger ainsi les travaux.

Les textes qui suivent montrent les résultats obtenus dans quelques unités mixtes de recherche ; on le verra clairement, la collaboration est souvent la garantie d'une recherche de qualité : comme le disait Antoine de Saint-Exupéry, «il n'est de fertile que la grande collaboration de l'un à travers l'autre.» ■

Guy AUBERT

À la recherche de la RMN de l'or

Des études à la limite du possible pour affiner la compréhension des molécules et perfectionner les appareils de RMN.

Les unités mixtes CNRS-entreprises associent généralement deux partenaires de même poids. Toutefois, dans le cas de l'association entre la Société Bruker et le CNRS, la problématique était différente, car l'industriel est une entreprise de 400 personnes : comment la marier à une institution, le CNRS, qui compte plus de 11 500 chercheurs ? Pis encore, comment formaliser une collaboration effective depuis longtemps, alors que l'un des deux partenaires n'avait pas les moyens de subvenir à l'entretien d'un nouveau laboratoire ?

La réponse tient tout entière dans la spécificité de la Société Bruker, qui possède un « marché de niche » : ses appareils d'analyse par résonance magnétique nucléaire (RMN) sont si stratégiques, en recherche, que la collaboration est plus qu'une affaire d'argent ; c'est un dialogue permanent. Les chercheurs CNRS du Laboratoire mixte de Strasbourg n'obtiendraient pas leurs résultats sans les matériels et le soutien technique de la Société Bruker et, cette dernière, ne conserverait pas son avance technique sans les compétences des chercheurs qui utilisent leurs appareils.

L'EFFET CAFÉTÉRIA

Plus qu'un accord de programme, c'est un accord d'hommes qui a été conclu. Pierre Granger, qui dirige aujourd'hui l'unité mixte à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, connaissait la Société Bruker depuis sa création. Celle-ci commença par la construction d'électro-aimants dans un garage, à Karlsruhe. La fusion de Bruker avec la Société suisse *Spectrospin*, de Zurich, conduisit, à la fin des années 1960, à l'aventure

de la RMN. En 1971 fut créé un nouveau centre, en France, à Wissembourg, sous l'impulsion et la direction de M. Reithler, qui avait été un collègue de P. Granger à l'Université de Nancy.

En 1973, Christian Brevard, qui avait effectué sa thèse chez Jean-Marie Lehn, à Strasbourg, revint d'un séjour post-doctoral au Canada et entra chez Bruker. Avec P. Granger, il se passionna pour des analyses RMN complexes du xénon, démontrant du même coup que la RMN s'appliquait à d'autres noyaux atomiques que ceux d'hydrogène ou de carbone 13.

Comment développer cette collaboration, alors que l'un des partenaires était professeur d'université et l'autre industriel ? C'est au siège du CNRS, quai Anatole France, et, plus précisément, à sa cafétéria, que Ch. Brevard et la Direction chimie du CNRS imaginèrent une solution : la création d'une structure conceptuellement unique, mais géographiquement divisée entre l'Université Louis Pasteur et le

Laboratoire d'applications de la Société Bruker, à Wissembourg ; le CNRS apporterait les compétences de ses chercheurs, et la Société Bruker ses appareils et des ingénieurs pour les perfectionner en permanence, en fonction des besoins des scientifiques utilisateurs.

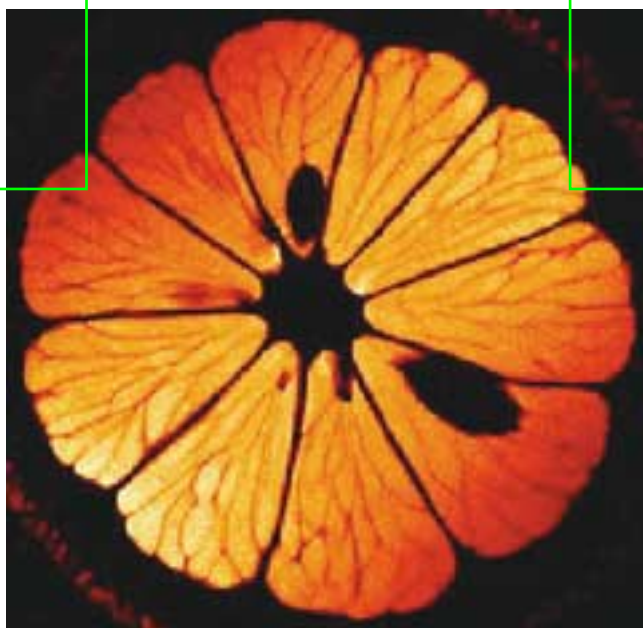
Ainsi était dégagé un objectif capable de motiver des chercheurs du CNRS et des ingénieurs de recherche privée : faire progresser la RMN des noyaux exotiques en phase liquide ou solide, tout en imaginant des équipements pour spectromètres RMN. Lorsque l'Unité mixte fut inaugurée, en 1988, par le ministre de la Recherche Hubert Curien, Ch. Brevard, qui était entre-temps devenu le président du directoire de Bruker, lui demanda expressément de préserver coûte que coûte la cafétéria du CNRS. N'était-ce pas là qu'on avait trouvé le moyen de formaliser une ancienne amitié ?

LES FRUITS DE LA RECHERCHE

Dans le nouveau laboratoire, que fait-on ? On pousse la RMN à ses limites. La méthode consiste à placer un échantillon dans un champ magnétique, afin d'orienter le spin des noyaux atomiques (qui possèdent un moment magnétique, équivalant à un petit barreau aimanté, qui s'aligne avec le champ magnétique), puis à faire absorber des ondes radio, qui écartent temporairement ces spins de leur orientation d'équilibre. La réaction des noyaux en fonction de la fréquence des ondes radio renseigne sur l'environnement des atomes et, notam-

ment, sur la nature chimique des noyaux voisins : un atome de carbone 13 lié à un atome d'oxygène réagit différemment d'un atome de carbone 13 lié à un atome d'hydrogène.

Ce principe, bien connu pour les échantillons dissous dans un solvant, est plus difficile à mettre en œuvre pour les échantillons solides, parce que les signaux RMN de nombreux noyaux ne sont notables que si l'on utilise des champs magnétiques intenses et stables. Pour obtenir ces champs magnétiques, on injecte du courant électrique dans des bobines supraconductrices, où il circule sans pertes. L'enregistrement des spectres RMN peut durer plusieurs jours, ce qui suppose que le champ magnétique reste parfaitement stable. Pour évi-



1. Image 2D d'une tranche d'orange observée sur un spectromètre Bruker RMN AVANCE 300 SWB.

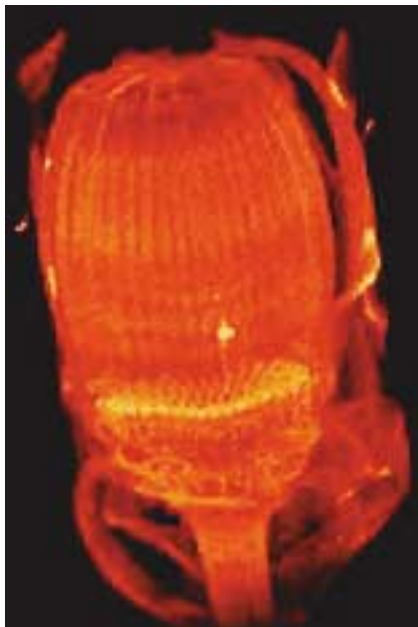
ter les dérives lentes, inévitables, qui nuisent aux mesures, on utilise, pour les solutions, la résonance du deutérium du solvant afin de maintenir les conditions optimales d'observation. Mais comment pallier ces dérives, quand on étudie des solides, qui nécessitent des analyses très longues? Le problème fut résolu à Wissembourg : on introduit dans la sonde de détection, à côté de l'échantillon, une petite ampoule qui contient le deutérium sur lequel on peut caler l'électronique : un œuf de Colomb moderne, employé aujourd'hui sur les appareils fabriqués en série.

Ce type de travail est exemplaire : les chercheurs de Strasbourg se sont spécialisés dans les analyses difficiles, et les ingénieurs de Wissembourg dans la résolution des problèmes techniques dégagés lors de ces recherches. L'Unité mixte est ainsi comme une écurie de *Formule 1* : les chercheurs et les ingénieurs sont comme des pilotes de course, et il est vrai que les spectromètres RMN sont des machines au moins aussi perfectionnées que les bolides à quatre roues.

LA RMN DES NOYAUX EXOTIQUES

Dans cet esprit, l'Unité mixte de Strasbourg s'est surtout intéressée à la RMN multinoyaux. De quoi s'agit-il? On enseigne classiquement la RMN pour l'hydrogène, le carbone, le fluor ou le phosphore, en laissant entendre que d'autres atomes sont accessibles à l'analyse, mais les chercheurs de Strasbourg démontrent quotidiennement que la plupart des éléments de la Classification périodique sont également observables par RMN si l'on dispose d'un matériel et d'une méthodologie appropriés. Les deux exemples suivants montrent comment des applications industrielles surgissent parfois quand les chimistes font des études fondamentales

A l'Institut Le Bel, de Strasbourg, M. Braunstein et ses collègues étudiaient les propriétés catalytiques d'agrégats complexes, contenant du cobalt, du fer ou du ruthénium, liés à une partie organique, c'est-à-dire composée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et de quelques atomes tels que le phosphore. Le Laboratoire mixte pouvait-il les aider, grâce à la RMN multinoyaux, à accéder à des connaissances approfondies sur leurs molécules? Après de longs mois de travail, le Laboratoire mixte parvint à interpréter les spectres de ces agrégats, et les chimistes voulurent remplacer des atomes de phosphore par des atomes d'azote dans la partie organique. Toutefois ils ne parvenaient pas à démon-



2. Image 3D d'une dent-de-lion fermée observée sur un spectromètre Bruker RMN AVANCE 300 WB.

trer que la réaction avait eu lieu. Le Laboratoire mixte proposa alors de faire directement cette expérience dans un spectromètre RMN. On vit alors que des signaux apparaissaient, subsistaient une dizaine de minutes avant de disparaître : c'était la preuve que le composé cherché était formé, mais instable. Utilisant cette information, les chimistes modifièrent leurs méthodes et obtinrent des composés stables. Simultanément l'analyse des spectres du phosphore conduisait à la compréhension d'un certain type de spectres restés inexpliqués.

Toute cette recherche aurait été impossible sans l'utilisation d'ondes radio de fortes puissances (de l'ordre du kilowatt). Naguère ces ondes étaient produites par des amplificateurs à lampes, mais, vu le développement de la RMN du solide, les ingénieurs de Wissembourg ont mis au point des émetteurs transistorisés.

D'autre part, comme la bande de fréquences à couvrir pour observer un noyau était très grande, il fallait employer des impulsions radio très brèves, qui faisaient initialement claquer les bobines d'émission et de réception des ondes radio. Le problème, ramené à Wissembourg, a conduit à la mise au point de sondes adaptées à ces puissances élevées.

Le Laboratoire a également été sollicité pour étudier le fonctionnement des électrodes des batteries au lithium, aujourd'hui présentes dans nombre d'équipements électroniques ou, même, dans les véhicules électriques. La RMN du lithium solide permettrait-elle de com-

prendre le comportement des matériaux des électrodes (du pentaoxyde de vanadium V_2O_5) où vient s'introduire le lithium?

Après un travail de thèse, l'analyse RMN donna un éclairage nouveau à la compréhension de ces phénomènes. Il a été montré que, contrairement à l'analyse aux rayons X sur des cristaux purs, le matériau utilisé était en fait un mélange de plusieurs phases présentant des atomes de lithium dans des sites n'ayant pas les mêmes propriétés.

Cette étude s'est prolongée par l'analyse des électrodes au lithium avec des matériaux magnétiques. L'analyse par RMN de tels matériaux est contre nature, à la température ambiante : ces matériaux contiennent des atomes magnétiques, tel le nickel, où les atomes de lithium interagissent avec les électrons non appariés. Toutefois les expériences à température ambiante ont permis de trouver de trouver le nombre d'atomes de nickel voisins des atomes de cobalt. Il fut notamment montré que le nickel et le cobalt ne sont pas mélangés de façon homogène. Les chimistes ont repris leurs méthodes de fabrication.

Pour toutes ces études, les appareillages sont mis à rude épreuve. Dans certains cas, pour obtenir des signaux mieux identifiables, on fait tourner les échantillons jusqu'à 20 000 tours par seconde : les appareils doivent résister à des forces centrifuges atteignant plusieurs tonnes par centimètre carré, d'où des ruptures accidentelles qu'il faut réparer. Souvent, également, quand les puissances appliquées sont excessives, les sondes fondent. L'assistance des ingénieurs de Wissembourg est indispensable. Et pour certains matériaux semi-conducteurs, tels le tellure de cadmium ou le tellure de zinc, on ignorait comment régler les sondes et adapter la bobine de détection à l'échantillon. Les améliorations des mesures ont suscité de nouveaux progrès et débouché sur des perfectionnements des appareils.

Avec ces instruments sans cesse modifiés, l'équipe alsacienne est à la quête d'un Graal : la RMN de l'or, encore jamais effectuée. Un physicien américain semble avoir obtenu un signal RMN qui correspondrait à des noyaux de ce métal. Il faudra, sans aucun doute, de nombreux aller-retour entre Strasbourg et Wissembourg pour découvrir le signal RMN de l'or. ■



Bulles et neurones

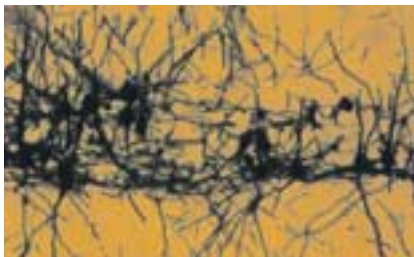
Six laboratoires pour explorer de grands problèmes de chimie, de biologie végétale, de neurobiologie et de thérapie génique.

« On est plus souvent dupe par la défiance que par la confiance », disait le cardinal de Retz. C'est la raison pour laquelle le Groupe Rhône-Poulenc a toujours collaboré avec les laboratoires du CNRS sous la forme de contrats... jusqu'à ce que naisse le cadre d'unité mixte CNRS-entreprises. Le Groupe Rhône-Poulenc fonda alors le Laboratoire de précurseurs organométalliques de matériaux, dirigé par Robert Corriu, puis cinq autres unités mixtes. Dans tous ces laboratoires, la confiance est totale : les chercheurs publient librement parce que la publication de leurs résultats, d'une grande qualité, est aussi une publicité pour le Groupe. Mieux encore, confiant dans ses forces, le Groupe n'a pas hésité à implanter ses unités mixtes dans des sites aussi remarquables que les hôpitaux, les grands centres de recherche ou à proximité des universités américaines les plus prestigieuses.

Le Laboratoire des Fluides complexes, par exemple, a été inauguré en mars 1996, dans un Centre Rhône-Poulenc... tout près de Princeton. Dirigé par Paul-Joël Derian, il réunit une vingtaine de chercheurs qui se préoccupent de physico-chimie de la formulation. Audacieuse recherche ! Il s'agit de transformer ce qui était un art d'ingénieur, la formulation des produits industriels, en une science.

Le travail est complémentaire de celui qui se fait dans l'unité mixte du CEA et de Rhône-Poulenc, à Aubervilliers, où Bernard Cabane et ses collègues étudient les systèmes dispersés : suspensions, émulsions, colloïdes. Le point commun ? Les molécules tensioactives, qui ont une partie soluble dans l'eau (hydrophile) et une partie insoluble (hydrophobe). Selon leur concentration, ces molécules forment des microstructures variées, telles des couches, en surface, ou bien des micelles, sorte de sphères où les têtes hydrophiles sont au contact de l'eau, tandis que les queues hydrophobes se regroupent, au centre.

Dans les produits cosmétiques ou agroalimentaires, dans les encres et dans les lessives, les tensioactifs interagissent souvent avec des polymères employés comme émulsifiants, stabilisants, épaississants...



Neurones colonisés par des adénovirus génétiquement modifiés.

Dans les shampoings, par exemple, les tensioactifs sont combinés avec des polymères : les premiers détachent les salissures grasses pour les disperser dans l'eau de lavage, tandis que les seconds modifient la surface des cheveux et améliorent le coiffage. Pour optimiser ces propriétés et pour réduire les concentrations en tensioactifs (l'environnement est un souci constant !), les chercheurs étudient des molécules tensioactives d'une nouvelle génération, en forme de peignes à trois ou quatre dents : quand le manche est hydrophile et les dents hydrophobes, ces molécules s'assemblent en structures en forme de vers, qui conservent leurs propriétés quand leur concentration est divisée par dix. Combien de dents réunir ? Sur des manches de quels types ?

LA BIOLOGIE DES PLANTES

Selon les cas, selon les équipes, selon les affinités, selon les compétences, les unités mixtes peuvent être de grosses ou de petites équipes. Le Laboratoire de physiologie cellulaire végétale, dirigé par Roland Douce, au Centre de recherche agrochimiques de La Dargoire, à Lyon, est un exemple de petite structure mobile et active. Composée d'une dizaine de chercheurs, elle étudie les caractéristiques biochimiques d'enzymes importantes du métabolisme de la cellule végétale : synthèse des acides aminés essentiels et des vitamines, et cibles potentielles d'herbicides.

Obtenue grâce aux outils les plus puissants de la biochimie, de la biologie moléculaire et de la physique, la connaissance précise de la structure tridimen-

sionnelle des enzymes permettra de créer de nouvelles molécules qui interagiront avec les sites actifs de ces enzymes et se comporteront comme des herbicides efficaces, sans risques pour les hommes et pour les animaux. Le laboratoire étudie également les toutes premières étapes de la germination des graines, afin d'améliorer leurs qualités germinatives et d'homogénéiser les lots de semence (équipe de Dominique Job).

LE SYSTÈME NERVEUX

Le Laboratoire Système nerveux et régulation génétique, à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière de Paris, est beaucoup plus gros (il comporte quelque 40 chercheurs) ; il est aussi très pluridisciplinaire, puisqu'il mêle à la fois des médecins, des neurobiologistes et des chercheurs du Groupe Rhône-Poulenc.

Cette équipe, dirigée par Jacques Mallet, étudie la régulation de gènes de synthèse des neuromédiateurs, ces molécules qui, libérées par les cellules nommées neurones, transmettent l'influx nerveux dans le cerveau. L'un de ces neuromédiateurs, la dopamine, disparaît lors de la dégénérescence des neurones qui constitue la maladie de Parkinson. Peut-on traiter les malades contre la raréfaction de la dopamine ? Daniel Scherman et ses collègues de l'unité mixte installée dans le Centre de recherches de Vitry-Alfortville étudient des méthodes de transfert de gènes à l'aide de vecteurs non viraux. L'équipe de la Pitié teste des méthodes complémentaires de thérapie génique : l'utilisation de virus rendus inoffensifs pour introduire des gènes thérapeutiques dans les cellules nerveuses.

Et c'est ainsi qu'ils ont montré, par des études sur des rats, que les adénovirus peuvent être des vecteurs de gènes dans les cellules gliales et dans les neurones, quand ils sont injectés directement dans le cerveau. Par exemple, les neurobiologistes ont réussi à faire produire le GDNF par les neurones infectés par les adénovirus : ce dernier compense la perte en dopamine en faisant produire le neuromédiateur, et il prévient la dégénérescence.

Le laboratoire se développe aujourd'hui avec des études des maladies mentales, dont il recherche des gènes caractéristiques en se fondant sur la cartographie du génome humain. Preuve que du fondamental à l'appliqué, il y a sans doute moins qu'on ne le croyait naguère. ■

Céramiques sur orbite

Le laboratoire mixte CNRS-sep, à Bordeaux, met au point des matériaux composites originaux.

Quel matériau utiliser pour réaliser les tuyères de fusées, portées à des températures atteignant 3 000 degrés ? Les métaux fondent à ces températures, et ils ont l'inconvénient d'être lourds. Seuls résistent les céramiques, les graphites et les composites carbone-carbone, que l'on obtient en faisant passer du méthane entre des fibres de carbone, dans un four : la décomposition du gaz, dans les porosités, dépose du carbone qui forme une matrice où sont alors noyées les fibres.

La Société Européenne de Propulsion (sep) étudiait ces questions depuis longtemps, souvent en collaboration avec des équipes du CNRS. Toutefois la découverte fortuite de céramiques d'un type nouveau bouleversa tant le secteur des matériaux, qu'il fallut renforcer ces collaborations. C'est ainsi qu'est née l'Unité mixte de Bordeaux.

L'idée fondatrice date de plus de 20 ans : des ingénieurs de la sep et le Laboratoire CNRS de chimie du solide, à Bordeaux, proposèrent d'améliorer les composites carbone-carbone en y introduisant des céramiques. Le remplacement du méthane par un gaz plus complexe, contenant du silicium, permit de déposer du carbure de silicium... et d'observer un comportement mécanique étrange : les nouveaux composites ne cassaient pas net et se fissuraient sans casser. Le concept de composites à matrice céramique fut breveté.

A cette époque, un industriel japonais présenta une nouvelle fibre de carbure de silicium, la *Nicalon*, assez fine pour être mise en forme facilement. Aussitôt, les chimistes de Bordeaux et les ingénieurs de la sep réalisèrent des céramiques de carbure de silicium dans une matrice de carbure de silicium. Alors que les céramiques sont réputées pour leur quasi-indéformabilité, les ingénieurs et chercheurs bordelais mesurèrent des déformations atteignant un pour cent ! La nouvelle famille de céramiques avait une tenue mécanique tout à fait remarquable et imprévue.

Que faire d'un tel matériau ? *Snecma*, maison mère de la sep, imagina de les employer pour les volets de sortie des moteurs M88 du *Rafale*. Puis, pour le programme *Hermès* d'avion spatial, les ingénieurs de la Société Dassault avaient besoin de protections thermiques, galbées, durables, minces. La sep proposa les composites céramique-céramique, de sorte que, quand on refit l'avant-projet avec ces nouveaux matériaux, la masse de l'engin avait diminué de 15 pour cent ; les épaisseurs étaient réduites, et les formes étaient affinées. Le programme *Hermès* accéléra la mise au point du matériau : moins de dix ans s'écoulèrent entre le premier centimètre cube obtenu en laboratoire et la première grande pièce produite dans des conditions industrielles.

La sep paria sur l'avenir industriel du matériau sur le marché mondial et confia aux équipes de Bordeaux la mission de conforter les bases scientifiques, afin de faciliter la production. C'est alors que la direction générale de la sep rencontra le CNRS, afin de proposer une collaboration à long terme. Le concept d'unité mixte de recherche, juste sorti de la fonderie administrative, convenait parfaitement. Le laboratoire fut fondé, et Roger Naslain et Pierre Lamicq, directeur de la recherche de la sep, furent chargés de préparer un démarrage en septembre 1987. Nous fêtons l'anniversaire de cette création.

HARMONIE ET TRAVAIL

Après ses débuts enthousiastes, le laboratoire de Bordeaux rencontra des conditions difficiles : une des propriétés espérées des composites céramique-céramique, la longévité, se révéla moins satisfaisante qu'on l'avait espéré. En outre, le programme *Hermès* fut arrêté, supprimant l'utilisation la plus prestigieuse.

En revanche, on découvrit que les composites carbone-carbone, que l'on utilisait classiquement dans les moteurs fusées et les freins d'avion, avaient de nouveaux atouts, principalement pour les



La déviation des fissures le long des fibres d'un composite céramique-céramique (en haut) multiplie les obstacles et défragilise le matériau (en bas).

freins de trains ou d'automobiles. Cependant ils devaient être améliorés. Pourrait-on les pousser à des limites inégalées ?

Les méthodes d'observation et d'essais mises au point pour les composites céramique-céramique s'appliquaient : elles furent immédiatement adaptées. La recherche obtint des résultats importants ; le laboratoire mixte se reconvertit partiellement sur les composites carbone-carbone. Avec ses 45 chercheurs, dont 15 permanents du CNRS, de l'Université de Bordeaux I et de la sep, le laboratoire mixte CNRS-sep poursuit ces études. La mission est claire : il s'agit de créer et de comprendre des matériaux composites à base de carbone et de céramiques résistant bien à la chaleur.

Plusieurs dispositions assurent le transfert continu des connaissances (d'abord à la sep) : chaque thèse est suivie par un ingénieur, et les travaux sont périodiquement discutés. Comme le développement des composites serait ralenti par la mise sous cloche des équipes de recherche, P. Lamicq et R. Naslain se sont accordés sur une politique très ouverte, avec une large publication des résultats, l'invitation de chercheurs étrangers, qui apportent de nouvelles stimulations. Cette attitude ouverte donne confiance aux hommes du laboratoire et se révèle positive pour la sep, au total. Tout le système est fondé sur la réactivité de la structure. ■



De la structure imaginée au produit industriel

La compréhension de mécanismes universels à partir d'un problème posé par l'industrie ouvre la voie aux perfectionnements.

Les acteurs de la recherche scientifique et industrielle renouent le dialogue entre Aristote et Platon. Faut-il, comme le chercheur aristotélicien, rechercher la nouveauté dans l'observation de formations naturelles? Doit-on se fonder, s'interroge le chercheur platonicien, sur les conceptions idéales qu'élabore notre cerveau, pour imaginer des structures novatrices? Pour ce qui est des matières plastiques, les inventions résultent plus aujourd'hui des réflexions platoniciennes. La demande industrielle est aristotélicienne : elle est fondée sur les propriétés souhaitées de la matière. La conception, dans l'Unité mixte CNRS-Elf Atochem, est d'essence platonicienne.

Après tout, les matières plastiques modernes, inspirées de la nature, ont été confectionnées par l'homme ; depuis la découverte de la première matière plastique entièrement synthétique, la bakélite, par Baekeland en 1910, les nouveaux produits plastiques ont été le fruit de l'imagination humaine.

Ce succès se prolonge aujourd'hui, à la fois dans les quantités de matière

produites et dans les types de structures élaborées. À ces deux points de vue, les polymères sont un secteur porteur de l'industrie, où la Société Elf Atochem est un des principaux acteurs mondiaux. Elf Atochem est le premier fabricant européen de polymères, le quatrième producteur de substances adhésives polymériques.

Dans cette discipline, les chercheurs français ont joué et jouent encore un rôle de tout premier plan ; la tradition s'est perpétuée, des initiateurs de la chimie et de la physico-chimie des polymères, aux travaux de Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique en 1991, sur la compréhension fine des enchevêtrements polymériques.

Car les vœux des industriels ne sont pas tous exaucés, les limites possibles ne sont pas toutes atteintes : l'industrie recherche des polymères tenant à de plus hautes températures, des gels plus absorbants, des fibres mécaniques entièrement cristallisées ayant les propriétés de l'acier pour une densité bien inférieure, des papiers plus résistants, des colles plus efficaces.

L'Unité de recherche CNRS-Elf Atochem, dirigée par Ludwik Leibler, poursuit les recherches sur les polymères en modélisant des ordonnancements structuraux hétérogènes. La compréhension fine de l'organisation macromoléculaire permet d'aller plus loin dans la spécification des propriétés et les qualités des structures. En parallèle, les recherches effectuées expliquent la physique des phénomènes observés et ouvrent la voie aux perfectionnements.

L'ORGANISATION DES COPOLYMÈRES

On sait depuis plusieurs siècles que les alliages métalliques sont des mélanges hétérogènes où l'on spécifie à façon des qualités requises. Les mélanges de polymères sont adaptés dans un même esprit, mais offrent plus de diversité, car on y contrôle à la fois les monomères constitutifs, leur répartition dans la chaîne et la longueur des chaînes polymériques.

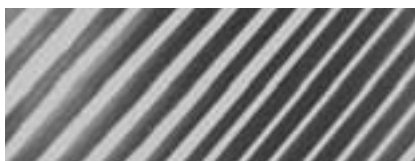
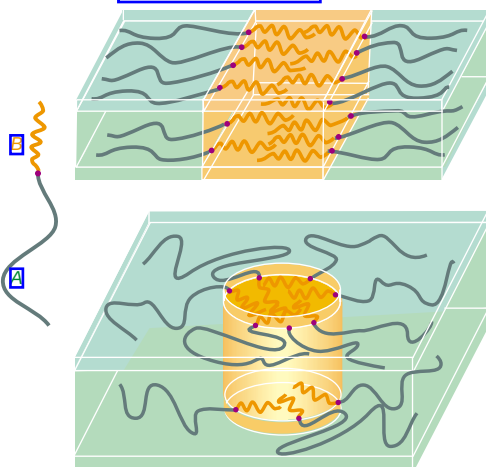
L'agitation thermique tend à mélanger les polymères, mais les forces d'interaction chimiques peuvent favoriser la ségrégation. Dans le cas de deux polymères A et B dont les propriétés chimiques des monomères constitutifs sont différentes, la température de transition entre mélange homogène et phases séparées est d'autant plus élevée que les chaînes polymériques sont longues.

Les architectures sont plus facilement ajustées avec des copolymères où les chaînes polymériques sont constituées de deux ou trois types de polymères de natures différentes soudés par des liaisons chimiques. Les structures macroscopiques dépendent de la taille et de la flexibilité des chaînes polymériques. Depuis une vingtaine d'années, on observe, grâce aux moyens d'analyse perfectionnés, des configurations de copolymères en lamelles, en cylindres ou en sphères.

Un enjeu toujours d'actualité est de trouver des applications des matériaux ayant ces structurations originales.

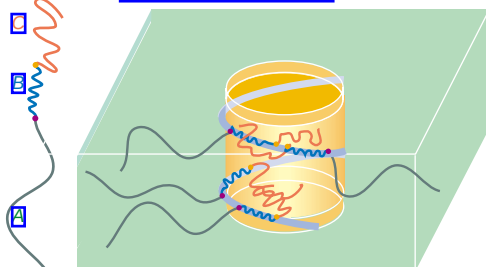


POLYMERES DIBLOCS



1000 Å

POLYMERES TRIBLOCS



1000 Å

Structurations en lamelles et en cylindres de copolymères diblocs (en haut). Les copolymères triblocs donnent une structure originale (en bas). À droite les structures observées.

Les copolymères diblocs polybutadiène-polyméthylmétaacrylate illustrent des structures possibles. Dans ces copolymères, les chaînes de polymères d'un même type s'attirent et tendent à s'agglutiner, mais la structuration résultante impose un étirement des chaînes. Quand les polymères A et B du copolymère ont des caractéristiques trop différentes (longueur, affinité), on sait créer, par exemple, des structures en cylindres où se rassemblent les chaînes du polymère A dans une matrice constituée par les chaînes du polymère B. Les configurations obtenues dépendent de la nature des constituants qui déterminent l'attraction entre les chaînes, des tailles respectives des chaînes, de la température, etc. Ces structures sont, de plus, organisées : les espacements des lamelles ou des cylindres sont réguliers, constituant un macrocristal. Quand l'asymétrie des concentrations de A et de B augmente encore, il apparaît des sphères de polymère, noyées dans une matrice de polymère B. Les recherches actuelles de l'Unité mixte portent aussi sur les polymères triblocs, où le paramètre ajouté, le bloc supplémentaire accroît considérablement la variété des formes possibles. Avec les poly-

mères triblocs, de nouvelles structures ont été découvertes dans le laboratoire de l'Unité mixte.

Les théories thermodynamiques élaborées prévoient les paramètres associés à ces configurations et permettent une conception de polymères à façon, en fonction des propriétés désirées du matériau final. Elles donnent aussi des guides précieux pour prédire le comportement élastique ou plastique du matériau obtenu et les qualités d'adhésion des différentes phases, facteur crucial pour la qualité du produit industriel.

Les hétérogénéités sont aussi fonction du degré de cristallisation, et les industriels en tirent profit pour diminuer la fragilité du matériau polymérique : la fissure développée dans une zone cristalline s'arrête dans une zone caoutchouteuse. Les physico-chimistes s'emploient à répartir ces zones absorbantes de façon optimale pour préserver la rigidité des zones cristallines et la résistance aux chocs conférée par les zones amorphes.

Mais on sait aussi structurer le matériau de manière encore plus subtile par la répartition des comonomères greffés le long de la chaîne afin d'obtenir, par exemple, des propriétés de mouillage et d'adhésion remarquables.

LES MATÉRIAUX STRUCTURÉS

Ces effets d'organisation créent des structururations à des échelles mésoscopiques (jusqu'à un micromètre typiquement). Il est possible de créer des arrangements macroscopiques à plus grande échelle par des conditions de mise en œuvre particulières, par exemple lors de la coextrusion.

Dans la bouteille de jus d'orange Joker, six couches de matériaux plastiques sont extrudées ensemble pour former le récipient. Certaines couches sont imperméables à l'eau, d'autres à l'oxygène, d'autres confèrent la résistance mécanique convenable. Dans une bouteille en verre, il y a, en poids, 46 pour cent de verre et 50 pour cent de liquide ; dans une bouteille plastique, 93 pour cent de liquide et 7 pour cent de plastique. La conclusion est écologique : le contenant est minimisé par rapport au contenu.

Le contrôle de l'extrusion et de la coextrusion est un problème délicat : il importe notamment d'assurer la régularité des couches déposées et leur adhésion. Les instabilités indésirables dans l'extrusion sont étudiées dans des systèmes plus simples à manipuler, comme les solutions. Les zones instables de l'écoulement sont détectées et étudiées par biréfringence optique.

Le papier est un autre matériau structuré à l'échelle macroscopique. Dans ce matériau composite, les fibres de cellulose forment un réseau enchevêtré, et l'on y ajoute différents additifs minéraux et polymères qui apportent de l'opacité, de la couleur et une bonne tenue mécanique. L'amélioration de la résistance au déchirement du papier humide est importante dans de nombreux secteurs de l'industrie : augmentation des cadences de l'imprimerie, fabrication de papier de spécialité (papier monnaie, papier peint, papier absorbant). L'analyse physico-chimique a autorisé la mise au point d'un nouvel additif augmentant la tenue du papier chargé d'eau.

Selon Pierre Avenas, directeur des recherches d'Elf Atochem, la coopération dans l'Unité mixte est fondée sur un dialogue exemplaire et fructueux, où les nécessités industrielles sont un moteur de réflexion pour le chercheur. ■

elf atochem
ATO

Les premiers exodes

IAN TATTERSALL

L'Afrique est le berceau de l'humanité, mais combien d'espèces humaines y ont-elles évolué ? Et quand l'ont-elles quittée ?

Tout paraissait très simple : la lignée humaine avait évolué en Afrique, et c'est relativement récemment que les premiers hommes, les *Homo erectus*, avaient quitté leur continent d'origine et avaient atteint l'Asie il y a un million d'années ; tous les types humains ultérieurs descendaient de cette espèce et avaient finalement formé notre propre espèce, l'*Homo sapiens*. Quand certains de ces hominidés différaient trop de nous, on les classait parmi les «*Homo sapiens* archaïques», tout en les considérant comme des membres de notre propre espèce.

Cette séduisante simplicité était hélas trop belle pour durer : les recherches paléontologiques récentes ont montré que les dernières étapes de l'évolution de l'homme furent beaucoup plus mouvementées qu'on ne le croyait. On n'a aujourd'hui aucune raison de penser que le genre humain est apparu ailleurs qu'en Afrique, car aucun fossile d'hominidé (le groupe de tous les primates bipèdes) n'a été trouvé en dehors de ce continent pendant la première moitié de l'histoire des hominidés. En revanche, des fossiles récemment découverts indiqueraient que les premiers émigrants d'Afrique n'étaient pas nécessairement des *Homo erectus* et que les pérégrinations des hominidés ont commencé plus tôt qu'on ne le supposait.

1. CE SQUELETTE EST CELUI DE LUCY, qui appartenait à l'espèce d'hominidés ou de précurseurs de l'homme la mieux connue, l'*Australopithecus afarensis*, souvent surnommé le «chimpanzé bipède». Ce squelette, âgé de 3,18 millions d'années, provient de la région du Hadar, en Éthiopie.

Une histoire primitive confuse

Des fossiles trouvés au Kenya et attribués à l'espèce *Australopithecus anamensis* ont fait reculer l'âge des premiers hominidés bipèdes jusqu'à environ 4,2 à 3,9 millions d'années. Des spécimens plus incertains, d'une espèce *Ardipithecus ramidus*, découverts en Éthiopie, pourraient faire reculer cet âge jusqu'à 4,4 millions d'années. Les fossiles d'*Australopithecus anamensis* ressemblent beaucoup à l'espèce plus tardive et beaucoup mieux connue d'*Australopithecus afarensis*, trouvée en Éthiopie et en Tanzanie, et datant de 3,9 à 3 millions d'années (le représentant le plus célèbre d'*Australopithecus afarensis* est Lucy, un squelette découvert dans la région du Hadar, en Éthiopie).

D'après la structure du bassin et des genoux, Lucy et ceux de son espèce étaient bipèdes, mais ils conservaient de nombreux caractères ancestraux, notamment les proportions des membres, ainsi que les mains et les pieds, qui faisaient d'eux d'habiles grimpeurs. Ces particularités, leur cerveau gros comme celui des singes et leur face prognathe les ont fait surnommer «chimpanzés bipèdes», dénomination également justifiée par leur mode de vie adapté aux habitats boisés. De toute évidence, ces primates avaient un mode de vie bien adapté, car, bien qu'ils fussent moins bons grimpeurs que les grands singes de la même époque et moins bons bipèdes que les hominidés qui leur succédèrent, ils subsistèrent pendant plus de deux millions



d'années, alors même qu'apparaissaient et disparaissaient des espèces appartenant à ce même grand genre.

On ignore comment les modes de vie ont été modifiés par l'invention des outils de pierre, il y a 2,5 millions d'années. Aucun fossile humain n'a hélas été trouvé avec les premiers outils de pierre, lesquels proviennent du Kenya et d'Éthiopie. En outre, les plus anciens fossiles associés à des outils de pierre et à des ossements de mammifères consommés proviennent de plusieurs types d'hominidés différents. Tous vivaient il y a deux millions d'années en Tanzanie, dans les gorges d'Olduvai et à l'Est du lac Turkana, au Kenya. Certains des premiers hominidés ayant fabriqué des outils de pierre dans ces régions étaient à peine plus grands et plus évolués que Lucy ; d'autres étaient plus grands, avaient un cerveau plus développé et une constitution corporelle plus moderne. Combien d'espèces d'hominidés vivaient là ? Lesquels fabriquaient des outils ? Comment marchaient-ils ? Voilà de grandes énigmes de l'évolution humaine.

Puis, il y a 1,9 million d'années, une espèce qui nous ressemble apparaît au Nord du Kenya. On connaît notamment cette espèce par l'«Adolescent du Turkana», un étonnant squelette complet âgé de 1,6 million d'années découvert en 1984. Ces hommes possédaient une constitution corporelle essentiellement moderne indiquant qu'ils avaient une démarche d'homme moderne, des crânes à face moyennement large et un cerveau deux fois plus gros que celui des grands singes (mais deux fois moins volumineux que celui de l'homme moderne). Si l'Adolescent avait atteint l'âge adulte, il aurait mesuré 1,80 mètre ; ses membres étaient longs et minces, comme ceux des habitants des régions chaudes et arides d'Afrique, mais cette adaptation commune ne détermine aucune relation particulière entre eux. Cette fois, il s'agit d'hominidés ayant clairement élu domicile dans la savane.

Une tradition paléanthropologique ancienne cherche à minimiser le nombre d'espèces de fossiles humains et à tracer une généalogie linéaire entre les rares espèces reconnues. Conformément à cette pratique, l'Adolescent du Turkana et ses congénères ont initialement été classés comme des *Homo erectus*, espèce décrite pour la première fois il y a un siècle, à partir d'une calotte crânienne et d'un fémur trouvés à Java.

Ultérieurement, on avait inclus dans ce groupe les fossiles découverts en Chine (notamment l'Homme de Beijing, âgé de 500 000 ans, malheureusement perdu durant la Seconde Guerre mondiale) et en d'autres sites de Java, si bien que, finalement, l'espèce *Homo erectus* comprenait des hominidés variés, tels ceux dont provenait la boîte crânienne massive, trouvée dans les gorges d'Olduvai référencée sous le code OH9. Cette pièce, qui a été finalement datée d'environ 1,4 million d'années, semblait initialement beaucoup plus jeune. Tous ces hominidés possédaient des cerveaux relativement petits (environ 900 à 1 200 centimètres cubes contre 1 400 centimètres cubes pour l'homme moderne moyen et 400 centimètres cubes pour les grands singes), logés dans des crânes allongés, à voûte basse, présentant un occiput anguleux et de fortes arcades sourcilières. Les rares os de membres trouvés étaient d'une grande robustesse, mais essentiellement semblables aux nôtres.

On s'est longtemps demandé si l'*Homo erectus* avait occupé l'Europe ou si les plus anciens fossiles humains de cette région (qu'on datait de 500 000 ans) étaient des représentants d'*Homo sapiens* archaïque. Comme les fossiles de Java dataient de 700 000 à un million d'années et que l'âge des plus anciens fossiles chinois était estimé à un million d'années au plus, la conclusion s'imposait : l'espèce *Homo erectus* (telle que caractérisée par le fossile OH9, l'Adolescent du Turkana et d'autres fossiles associés, un peu plus âgés) avait évolué en Afrique, puis avait quitté ce continent il y a un peu moins d'un million d'années, pour atteindre rapidement l'Extrême-Orient et pour engendrer tous les groupes humains ultérieurs, y compris ceux d'Europe.

Puis l'étude approfondie des spécimens du Kenya montra que la boîte crânienne était nettement différente de celle des *Homo erectus* classiques, d'Asie orientale. En particulier, certaines zones anatomiques qui portent des caractères dérivés spécialisés chez l'*Homo erectus* asiatique sont dans un état primitif chez les fossiles africains du même âge. Par conséquent, deux groupes devaient être distingués.

2. L'ADOLESCENT DU TURKANA, de l'espèce *Homo ergaster*, date d'environ 1,6 million d'années. Il est un représentant des premiers hominidés dont la silhouette rappelle celle de l'homme moderne.



Ainsi, aujourd'hui, la forme kenyane, plus ancienne, semble être représentative de l'*Homo ergaster*, qui pourrait être l'ancêtre commun à tous les humains ultérieurs, tandis que les spécialisations crâniennes d'*Homo erectus* indiquent que ce dernier, si longtemps considéré comme l'hominidé central pour la période située entre 1 et 0,5 million d'années, était en fait une évolution locale d'Extrême-Orient.

L'Extrême-Orient, un cul-de-sac évolutif

Le mystère s'est épaissi au début 1994, lorsque Carl Swisher et ses collègues du Centre de géochronologie de Berkeley appliquèrent une nouvelle méthode de datation à l'argon à des échantillons de roches volcaniques prélevés sur deux sites où l'on avait trouvé des hominidés, à Java. L'âge évalué, entre 1,81 et 1,66 million d'années, est beaucoup plus

ancien qu'on ne s'y attendait, même si la borne supérieure correspond à une datation antérieure. Malheureusement, les deux fossiles provenant de ces deux sites n'apportent que des informations fragmentaires : le premier est un crâne d'enfant (les fossiles d'enfant ne présentent pas les caractéristiques adultes sur lesquelles reposent la définition de l'espèce) et le second est un crâne écrasé et déformé, qui n'a jamais pu être reconstitué de façon satisfaisante. Par commodité, les paléontologues ont considéré que ces deux spécimens provenaient d'*Homo erectus*, se demandant parfois si les fossiles de Java appartenaient à une ou à plusieurs espèces d'hominidés primitifs. Depuis peu, on doute que l'échantillon le plus ancien provienne du même site que le crâne de l'enfant. Les datations corroborent toutefois d'autres informations en faveur d'une présence d'hominidés en Asie orientale bien plus tôt qu'on ne le pensait.

D'autres fossiles corroborent cette idée. Par exemple, sur le site de Dmanisi, en Géorgie, on découvrit, en 1991, une mandibule d'un hominidé décrit comme étant un *Homo erectus*. Trois méthodes de datation différentes indiquèrent un âge de 1,8 million d'années ; n'était-ce pas la preuve d'un exode inattendu d'hominidés primitifs hors d'Afrique ? Si l'on veut limiter le nombre d'hypothèses pour interpréter les découvertes, on doit admettre que ces pionniers auraient été des *Homo ergaster* ou une espèce très proche.

Une émigration très ancienne d'Afrique expliquerait ce qui semblait être une anomalie des données archéologiques : les outils de pierre trouvés dans les sédiments du même âge que le plus ancien *Homo ergaster* (un peu moins de deux millions d'années) sont identiques à ceux des premiers hommes qui ont fabriqué des outils de pierre des centaines de milliers d'an-



R. Campbell et M. Leakey

3. ESPECE NOUVELLEMENT DECOUVERTE, l'*Australopithecus anamensis* est le premier hominidé dont on a trouvé une série de fossiles. Cette mandibule de Kanapoi, au Kenya, apparaît ici telle qu'elle fut découverte sur le terrain ; elle date d'il y a environ quatre millions d'années. La dentition de l'*Australopithecus anamensis* ressemble beaucoup à celle de l'*Australopithecus afarensis*, et un fragment de tibia indique qu'il marchait debout.



C. Oakes



C. Oakes

4. L'HOMME DE BEIJING est connu par ce crâne d'*Homo erectus* masculin, retrouvé à Zhoukoudian, près de Beijing. Le crâne a été reconstitué à partir de fragments de plusieurs individus qui ont tous vécu il y a 500 000 ans.

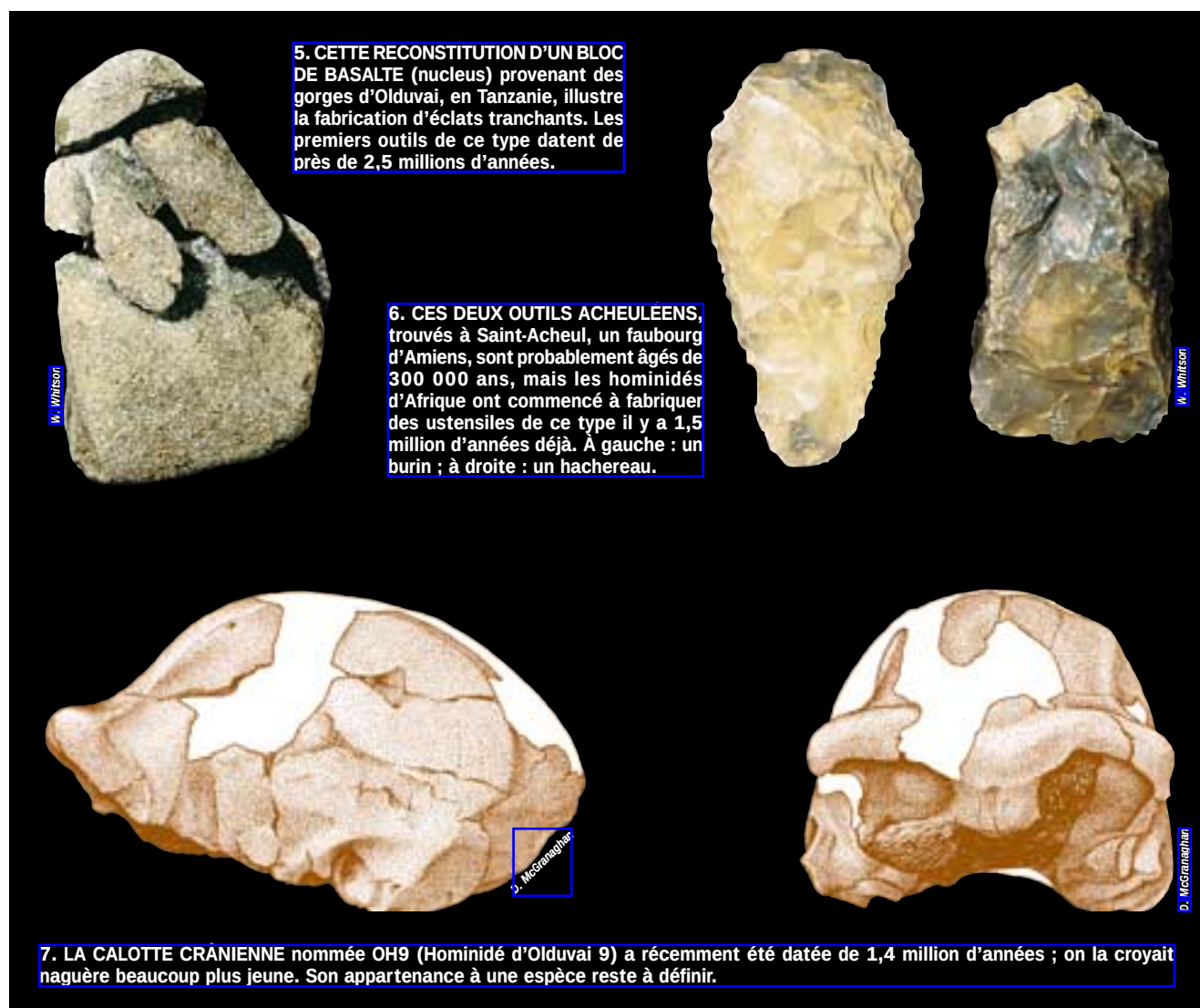
nées plus tôt. Ces outils rudimentaires étaient principalement des éclats tranchants débités à l'aide de galets. Bien qu'ils soient efficaces (des paléontologues ont montré qu'ils permettaient de découper des éléphants), ces outils n'étaient pas normalisés ; on les taillait seulement de façon à obtenir un bord coupant. Cependant, il y a 1,5 million d'années, des outils de pierre normalisés apparurent en Afrique, analogues aux bifaces et hachereaux de l'industrie acheuléenne (de Saint-Acheul, premier site de découverte de ces outils, au milieu du XIX^e siècle, dans un faubourg d'Amiens). Ils s'agissait de grands outils en forme d'amande, soigneusement retouchés des deux côtés. Pourquoi n'avait-on pas trouvé de tels ustensiles en Asie orientale ? Pourquoi ces migrants venus d'Afrique n'avaient-ils pas apporté les techniques de taille de ces objets avec eux, si leurs ancêtres la pratiquaient déjà depuis

500 000 ans ? Les nouvelles datations suggèrent que les premiers émigrants quittèrent l'Afrique avant l'invention de la technique acheuléenne, auquel cas il est normal de ne pas la retrouver en Extrême-Orient. Voici quelques années, l'archéologue Robin Dennell fit sensation en découvrant des outils de pierre très grossiers datant de plus de 1,6 million d'années à Riwat, au Pakistan. Aujourd'hui, leur ancienneté n'est plus tenue pour anormale.

Pourquoi les hominidés ont-ils quitté l'Afrique pour l'Extrême-Orient ? La plupart des paléontologues avaient admis que cette migration a commencé en même temps que le progrès technique qui permettait aux hominidés de quitter les lisières des forêts qu'ils habitaient. Toutefois, si les émigrants avaient une technique trop rudimentaire, l'explication est douteuse. Comme cette migration a suivi de près l'apparition d'une silhouette moderne, il semble logique

de supposer plutôt que les hominidés ont migré quand ils ont été capables de le faire parce que, physiquement, ils n'étaient plus inféodés aux forêts. L'adaptation de l'Adolescent du Turkana et de ses congénères à des environnements chauds et secs, comme le montrent les proportions de ses membres, n'explique en rien pourquoi l'*Homo ergaster* se répandit rapidement dans les régions tempérées, moins chaudes, au-delà de la Méditerranée. Néanmoins, il semble que cette forme corporelle leur a conféré une résistance remarquable dans les habitats découverts, ce qui représente un avantage adaptatif certain.

Le fait que l'acheuléen n'ait jamais réussi à diffuser jusqu'en Extrême-Orient renforce l'idée, corroborée par les spécialisations crâniennes de l'*Homo erectus*, que cette partie du monde constituait un de cul-de-sac évolutif pour l'homme. Dans cette région, les



populations humaines anciennes ont évolué indépendamment du reste du monde. Des datations complémentaires tendent à confirmer cette idée. Ainsi, récemment, C. Swisher et ses collègues ont mesuré que le site de fossiles d'*Homo erectus* de Ngandong, à Java, ne datait que de 40 000 ans. Cette datation a suscité un grand scepticisme, mais, si elle était confirmée, elle aurait des implications considérables sur le schéma général de l'évolution humaine. L'*Homo erectus*, qui a persisté si longtemps, pourrait avoir subi le même sort que l'homme de Neanderthal, en Europe : une extinction au profit du successeur ultime, l'*Homo sapiens*. L'image de l'évolution humaine qui se dégage est celle d'une différenciation indépendante des espèces dans plusieurs régions, en l'occurrence aux deux extrémités du continent eurasien, puis d'un remplacement par d'autres lignées d'hominidés qui ont évolué ailleurs.

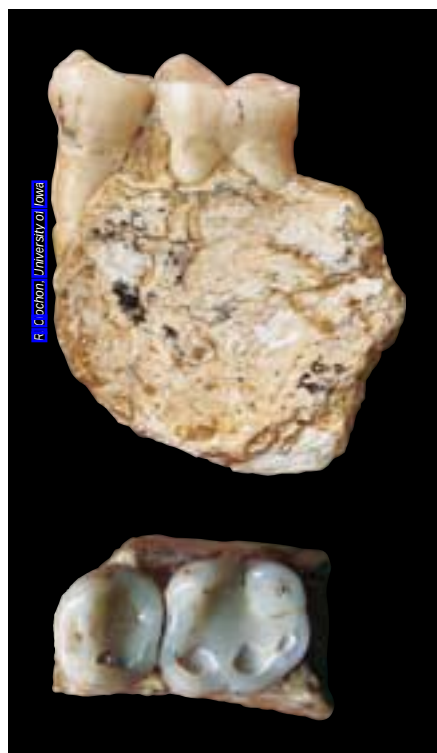
Quand l'occupation de l'Extrême-Orient a-t-elle commencé? Une équipe internationale dirigée par Huang Wanpo, de l'Académie Sinica de Beijing, a mesuré en 1996 un âge très ancien

pour la grotte Longgupo, dans la province chinoise du Sichuan. Ce site avait précédemment fourni une incisive et un petit fragment de mandibule avec deux dents, initialement attribués à

un *Homo erectus*, ainsi que quelques outils de pierre très rudimentaires. La datation montra que les fossiles et les outils pouvaient avoir 1,9 million d'années, et une seconde analyse des fos-



8. DES VAGUES SUCCESSIVES d'hommes primitifs ont quitté l'Afrique vers toutes les parties de l'ancien monde. Les preuves de ces migrations sont incomplètes, mais leur histoire est bien plus longue et plus complexe qu'on ne l'avait pensé.



9. DES FOSSILES DE LONGGUPO, comme le fragment de mandibule (à gauche), associés à des outils de pierre rudimentaires (à droite), pourraient indiquer la présence d'hominidés en Chine il y a 1,9 million d'années.

siles fit apparaître qu'ils ressemblaient davantage aux plus anciennes espèces africaines qu'à l'*Homo erectus*.

Avec mon collègue Jeffrey Schwartz, de l'Université de Pittsburgh, nous

avons montré que les dents du fragment de mandibule se rapprochent de l'*Homo* africain par leurs traits primitifs, plutôt que par leurs caractères spécialisés. En outre, elles ressemblent

beaucoup aux dents d'un hominoïde proche de l'orang-outang, découvert sur un site beaucoup plus récent au Viêt Nam. Bien que l'incisive semble avoir été celle d'un hominidé, elle ne possède aucune spécificité qui permette de l'attribuer à une espèce humaine particulière. La découverte de nouveaux fossiles à Longgupo éclairera peut-être la situation, mais, en attendant, on doit se contenter d'admettre que l'incisive et les outils indiquent la présence d'humains en Chine à une époque reculée. Ces Asiatiques primitifs étaient les descendants des premiers émigrants venus d'Afrique et, quelle que soit l'espèce à laquelle les hominidés de Longgupo se révéleront appartenir, il y a de fortes chances que Huang W. et ses collègues aient raison en supposant qu'ils seraient des précurseurs de l'*Homo erectus* plutôt que des membres de cette espèce.

Malgré l'enchaînement des faits, une anomalie subsiste : si l'*Homo erectus* s'est développé en Extrême-Orient à partir de migrants africains, le crâne OH9 appartient-il à cette espèce ? Si tel est le cas, l'*Homo erectus* aurait évolué en Extrême-Orient à une époque relativement ancienne (souvenons-nous que OH9 semble dater de presque 1,4 million d'années), et l'une des branches de cette espèce serait retournée en Afrique, à Olduvai. Cependant, si les nouvelles dates asiatiques sont confirmées, nous devrons probablement



R. C. Schenck, University of Texas



10. CETTE MANDIBULE de Dmanisi, en Géorgie, pourrait être âgée de 1,8 million d'années. D'abord attribué à l'*Homo erectus*, son espèce d'appartenance reste en fait non identifiée.



J. Trueba. Madrid Scientific Films

11. LA GROTTE DE GRAN DOLINA, dans les monts Atapuerca, au Nord de l'Espagne, a produit les plus anciens fossiles humains trouvés à ce jour en Europe. Datant de 780 000 ans environ et initialement attribués à l'*Homo heidelbergensis*, ils pourraient appartenir à une forme différente. Le fragment frontal et la mandibule d'un crâne d'enfant (à droite) font partie des fossiles de Gran Dolina. Le crâne adulte (ci-dessous) provient de Sima de los Huesos, situé à environ un kilomètre de Gran Dolina, où fut découvert un vaste dépôt de fossiles humains, la plupart fragmentaires, mais remarquablement conservés, datés d'il y a environ 300 000 ans.



J. Trueba et J.-L. Arsuaga



J. Trueba. Madrid Scientific Films

admettre que le fossile OH9 appartient à une espèce d'hominidés totalement différente.

L'autre extrémité du continent eurasiatique était isolée du courant principal d'évolution de l'homme. Comme nous l'avons vu, les humains semblaient être arrivés en Europe assez tardivement. Dans cette région, les premiers sites archéologiques convaincants, avec des outils plutôt rudimentaires, dataient de 800 000 ans environ (tandis qu'au Proche-Orient, à quelques pas seulement de l'Afrique, le site d'Ubeidiya a fourni des outils acheuléens vieux de 1,4 million d'années, à peu près de la même époque que d'autres découverts dans le Sud). Le problème était qu'on n'y avait pas trouvé l'artisan de ces outils.

Cette lacune se comble notamment par les découvertes d'Eudald Carbonell et de ses collègues de l'Université de Tarragone, qui ont fouillé la grotte de Gran Dolina, dans les monts Atapuerca, au Nord de l'Espagne. En 1994, ils ont mis au jour de nombreux outils assez simples, ainsi que maints fragments de fossiles humains, dont le plus complet est une partie supérieure d'un crâne d'enfant. Tous ces fossiles provenaient d'un niveau qui a été daté de plus de 780 000 ans. Ils n'ont trouvé aucune trace d'outils acheuléens et ont observé sur les fossiles des traits primitifs qu'ils ont provisoirement attribué à l'*Homo heidelbergensis*. C'est dans cette espèce que l'on classe de plus en plus souvent les spécimens précédemment considérés comme des *Homo sapiens* archaïques. E. Carbonell et ses collègues pensent que leurs fossiles constituent le point de départ d'une lignée indigène européenne qui aurait progressivement évolué vers l'Homme de Neandertal. Cet hominidé, dont le cerveau est très développé, n'est connu qu'en Europe et au Proche-Orient, où il a prospéré entre 200 000 et 30 000 ans, jusqu'à son extinction due à l'«invasion» par l'*Homo sapiens*.

D'autres possibilités demeurent. Il se pourrait que les fossiles espagnols appartiennent à des hominidés qui auraient fait une première incursion en Europe à partir de l'Afrique, sans parvenir à s'y établir pour longtemps. En effet, des représentants de l'*Homo heidelbergensis* sont également connus en Afrique, dès 600 000 ans, et il est très probable que cette espèce ait recolonisé l'Europe par la suite. Là, elle aurait engendré l'Homme de Neandertal, tandis qu'une autre population africaine (au contraire

des Asiatiques) fondait la lignée aboutissant finalement à l'*Homo sapiens*.

À un kilomètre de Gran Dolina, Juan-Luis Arsuaga et ses collègues de l'Université Complutense de Madrid ont découvert un important dépôt de fossiles humains, remarquablement conservés, âgés d'environ 300 000 ans. Ils semblent être des ancêtres des Néandertaliens à certains égards, mais ne sont en aucun cas de vrais Hommes de Neandertal. Bien que les paléontologues soulignent que les Néandertaliens (et peut-être même d'autres espèces apparentées) constituaient un développement indigène européen, ces fossiles de Sima de los Huesos («La Fosse aux Ossements») ne permettent d'établir aucun lien antérieur avec leurs voisins de Gran Dolina.

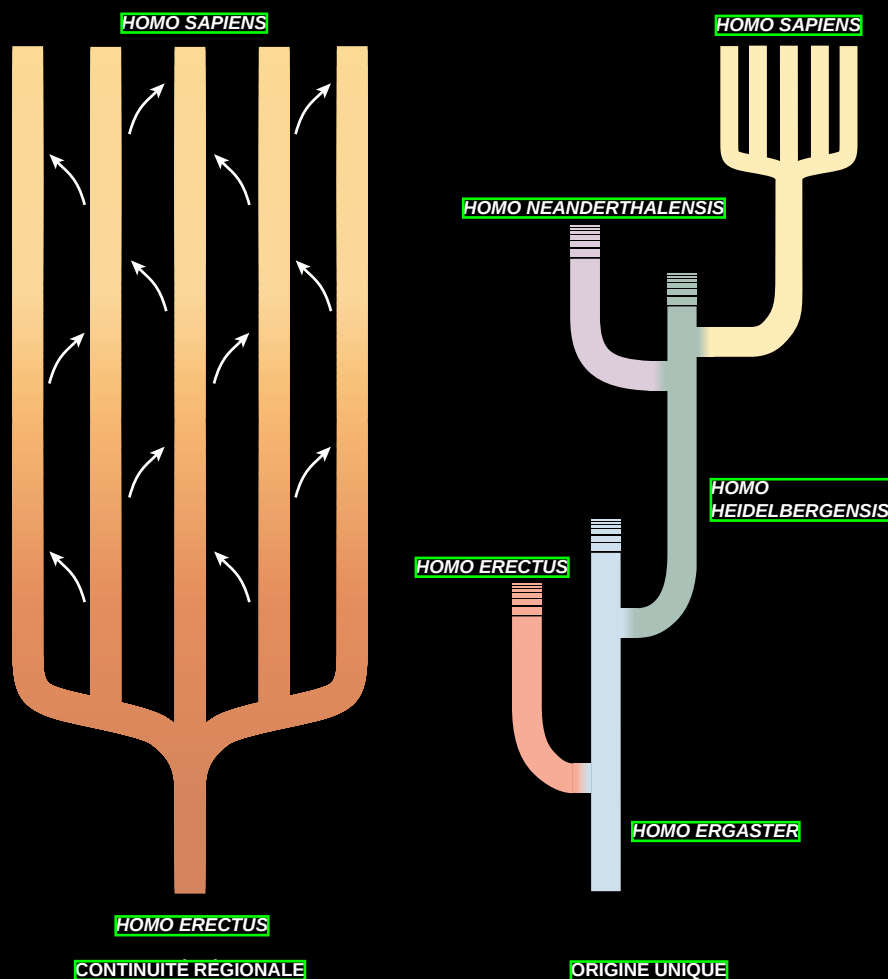
Nés en Afrique

Depuis longtemps, deux modèles d'émergence de l'homme s'opposent : celui de la «continuité régionale» et celui de l'«ancêtre africain unique» (voir *L'Afrique, berceau récent de l'Homme moderne* et *L'évolution multirégionale de l'Homme*, *Pour la Science*, juin 1992). Selon le premier modèle, les *Homo erectus* archaïques (y compris l'*Homo ergaster*) ne sont autres que des variantes anciennes de l'*Homo sapiens* et, pendant les deux derniers millions d'années, l'histoire de notre lignée est celle de tout un ensemble de populations appartenant à ces espèces, qui ont évolué dans toutes les régions de l'ancien monde en fonction des conditions locales, mais dont l'unicité a cependant été maintenue par les échanges de gènes. Les variantes géographiques que l'on observe aujourd'hui parmi les principales populations humaines ne seraient alors que le résultat des dernières permutations de gènes.

Le second modèle, qui coïncide bien mieux avec ce que l'on connaît du mécanisme général de l'évolution, propose que toutes les populations humaines modernes descendent d'une seule population ancestrale, apparue en un lieu unique, il y a 150 000 à 100 000 ans. Les fossiles, bien que ne constituant que de minces preuves, suggèrent que cette origine unique soit l'Afrique (ou peut-être le Proche-Orient). Les partisans de ce scénario se fondent en outre sur les arguments que fournissent des études comparatives de biologie moléculaire.

L'observation du rôle périphérique des populations d'hominidés en Asie

12. LES DEUX PRINCIPALES THEORIES sur l'origine de l'homme moderne sont schématisées ci-contre. Selon la notion de «continuité régionale», toutes les populations humaines modernes descendent de l'*Homo erectus*, mais chaque population régionale a suivi sa propre évolution, tout en échangeant suffisamment de gènes avec les populations voisines (les flèches indiquent les échanges de gènes) pour maintenir son appartenance à une même espèce ; elles finirent toutes par évoluer vers l'*Homo sapiens*. La théorie de l'«origine unique» soutient que l'*Homo sapiens* descend d'une seule population ancestrale qui aurait émergé en un lieu unique, probablement en Afrique.



et en Europe me fait penser que l'origine africaine et récente de l'*Homo sapiens* est la plus plausible. L'émergence de l'homme moderne est un événement récent, qui a connu une longue et complexe diversification évolutive des hominidés ; les fossiles montrent que, dès les tout premiers temps, l'Afrique était le centre d'où ont émergé de nouvelles lignées d'hominidés. D'intéressants développements évolutifs ont eu lieu à la fois en Europe et en Extrême-Orient, mais ils concernaient des populations qui, non seulement avaient été engendrées, mais qui avaient également fini par être supplantées par des émigrants venus d'Afrique. Notre lignée est née en Afrique et, depuis que les hominidés se sont émancipés de leur habitat en lisière de forêts, ce continent n'a cessé de produire des vagues successives d'émigrants vers toutes les régions de l'ancien monde.

Les datations de fossiles orientaux indiquent que la mobilité des populations humaines remonte au

début des hominidés dont la silhouette est résolument moderne. D'autre part, les fossiles récemment trouvés en Europe montrent que, même si différentes variantes régionales y ont évolué, l'histoire de l'occupation de cette région n'est pas simple. Les nouvelles données sur le passé lointain de l'homme ont surtout servi à souli-

gner la complexité des événements qui ont jalonné notre évolution. Nous ne pouvons qu'espérer que l'étude toujours plus précise de fossiles fera ressortir les détails de ce qui fut manifestement un lent processus de spécialisation des hominidés et de mouvements de populations, au cours des deux derniers millions d'années.

Ian TATTERSALL dirige le département d'anthropologie du Musée d'histoire naturelle de New York.

J.-L. ARSUAGA et al., *Three New Human Skulls from the Sima de los Huesos Middle Pleistocene Site in Sierra de Atapuerca, Spain*, in *Nature*, vol. 362, n° 6420, pp. 534-537, 8 avril 1993.

C.C. SWISHER III et al., *Age of the Earliest Known Hominids in Java, Indonesia*, in *Science*, vol. 263, n° 5150, pp. 1118-1121, 25 février 1994.

L. GABUNIA et A. VEKUA, *A Plio-Pleistocene Hominid from Dmanisi, East Georgia, Caucasus*, in *Nature*, vol. 373, n° 6514, pp. 509-512, 9 février 1995.

E. CARBONELL et al., *Lower Pleistocene Hominids and Artifacts from Atapuerca-TD6 (Spain)*, in *Science*, vol. 269, n° 5225, pp. 826-830, 11 août 1995.

HUANG W. et al., *Early Homo and Associated Artefacts from Asia*, in *Nature*, vol. 378, n° 6554, pp. 275-278, 16 novembre 1995.

J.H. SCHWARTZ et I. TATTERSALL, *Whose Teeth?*, in *Nature*, vol. 381, n° 6579, pp. 201-202, 16 mai 1996.

C.C. SWISHER III et al., *Latest Homo erectus of Java : Potential Contemporaneity with Homo sapiens in Southeast Asia*, in *Science*, vol. 274, n° 5294, pp. 1870-1874, 13 décembre 1996.

Comment notre cerveau calcule-t-il ?

STANISLAS DEHAENE

L'observation de notre cerveau en activité révèle quelles régions cérébrales sont spécialisées dans le traitement arithmétique (comparaison, soustraction et multiplication) et comment leurs actions sont coordonnées.

En 1945, le mathématicien Jacques Hadamard publie un essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique. Il y résume sa longue enquête sur la représentation mentale des objets mathématiques, glanant des indices dans les biographies de ses prédécesseurs, dans les témoignages de ses contemporains les plus prestigieux et dans son expérience personnelle. Il en déduit d'intéressantes hypothèses sur les conditions psychologiques de la découverte mathématique.

Pourtant, son brillant mémoire s'achève sur une interrogation. Mentionnant les théories de Franz Joseph Gall, qui postulait un organe cérébral dédié au «sens des rapports des nombres», il conclut : «Des idées plus ou moins analogues à celles de Gall vaudraient la peine d'être suivies. Mais comment?... Arrivera-t-il jamais que des mathématiciens en sachant assez au sujet de la physiologie du cerveau et que des neurophysiologistes soient suffisamment au courant de la découverte mathématique pour qu'une coopération efficace soit possible?»

Le vœu d'Hadamard est en voie d'être exaucé : nous étudions aujourd'hui scientifiquement les bases cérébrales des mathématiques élémentaires. Avec des méthodes issues de la psychologie cognitive, de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale, nous découvrons les zones cérébrales actives lors des opérations arithmétiques. Mes propres recherches se sont concentrées sur les plus

simples, mais aussi les plus fondamentaux des objets mathématiques : les nombres entiers.

L'analyse du temps que nous mettons à comparer deux nombres indique que notre cerveau examine les mots ou les chiffres arabes, expressions symboliques, selon une représentation interne des quantités numériques analogue à une ligne le long de laquelle les nombres se succéderaient dans l'ordre croissant. Cette représentation et la manipulation des nombres utilisent de façon prépondérante une aire cérébrale, la région pariétale inférieure. Toutefois, selon l'opération arithmétique que nous effectuons, comparaison, soustraction ou multiplication, cette région s'active dans l'un ou l'autre hémisphère et coordonne son activité avec plusieurs autres aires spécialisées et réparties dans le cerveau, notamment celles qui contrôlent la production du langage.

Comparons deux nombres

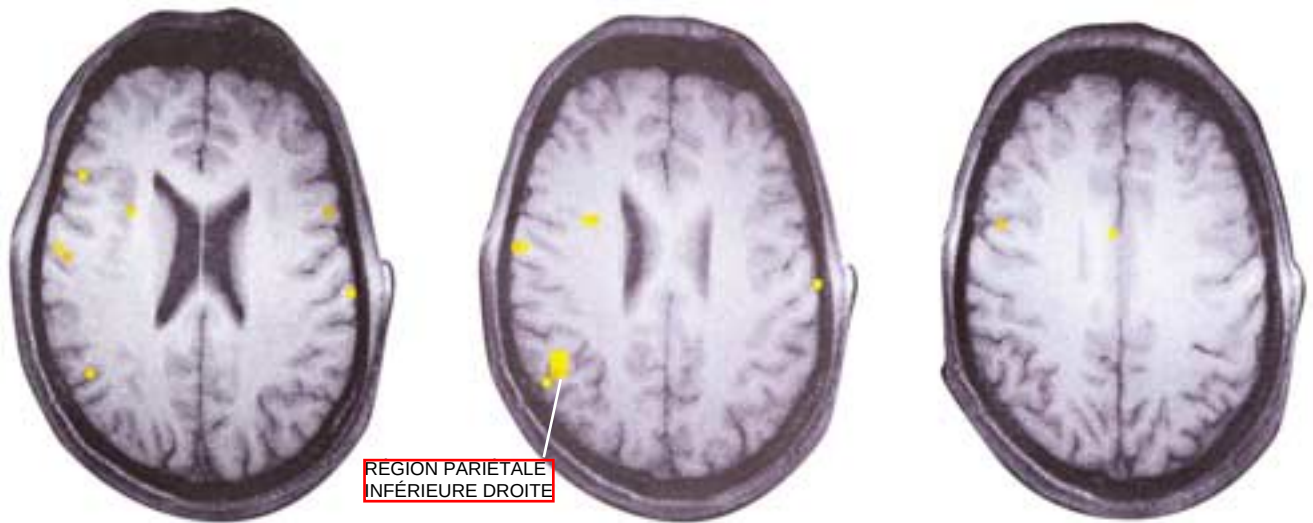
Supposons que vous ayez quelques francs en poche et que vous envisagiez d'acheter différents articles. Combien de temps vous faudra-t-il pour juger si leur prix dépasse ou non vos faibles moyens ? En 1967, Robert Moyer et Thomas Landauer, de l'Université Stanford, ont remarqué que le temps de comparaison de deux nombres est d'autant plus long que ceux-ci sont proches : nous comparons plus rapidement 8 avec 2 que 5 avec 6.

Avec Emmanuel Dupoux et Jacques Mehler, du Laboratoire de sciences

cognitives et psycholinguistiques de l'EHESS et du CNRS, nous avons observé le même «effet de distance» pour la comparaison de nombres à deux chiffres. Dans l'une de nos expériences, nous avons étudié la comparaison à une référence fixe de 65. L'affichage d'un nombre de deux chiffres sur un écran d'ordinateur déclenchait un chronomètre qui s'arrêtait dès que la personne testée répondait «plus grand» ou «plus petit» en appuyant sur un bouton. Les résultats sont d'une grande régularité. À mesure que le nombre comparé se rapproche de 65, le temps de réponse augmente (voir la figure 2) ; les erreurs suivent une courbe semblable.

Lorsque l'on reconstruit cette courbe par un modèle mathématique, on découvre que le temps de réponse est une fonction du logarithme de la distance entre les nombres. De façon remarquable, une loi logarithmique similaire rend compte du temps nécessaire à un sujet humain pour comparer deux grandeurs physiques, tels le poids ou la longueur de deux objets... ou du temps nécessaire à une balance de Roberval pour basculer, d'autant plus long que les valeurs des poids placés sur ses plateaux sont voisines. Ainsi les nombres, objets symboliques abstraits, semblent traités par le cerveau humain comme des quantités physiques concrètes et continues. Même présentés sous forme d'une série de chiffres arabes, ils seraient convertis mentalement en une quantité interne continue, puis «pondérés» mentalement.

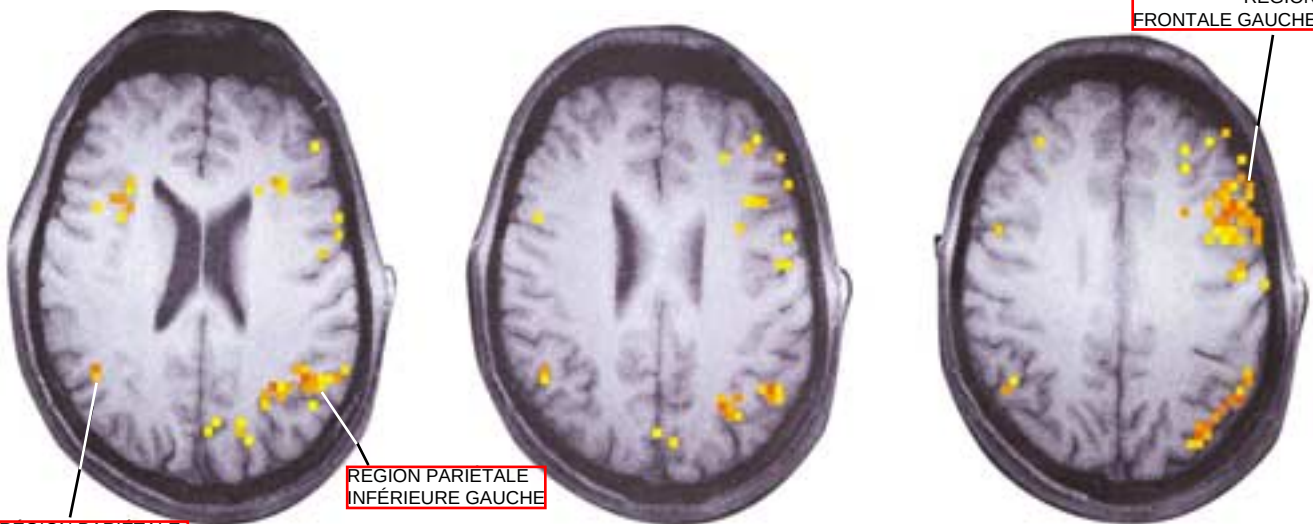
Dans le cas des nombres à deux chiffres, les résultats de l'expérience de



COMPARAISON



MULTIPLICATION



SOUSTRACTION

1. LES RÉGIONS CÉRÉBRALES activées dépendent de l'opération arithmétique effectuée. Pendant qu'une personne voit s'afficher sur un écran des chiffres qu'elle compare avec 5 (*en haut*), multiplie par 3 (*au milieu*), ou soustrait de 11 (*en bas*), on cartographie, par résonance magnétique, l'oxygénation accrue des régions actives. Lors de la comparaison des chiffres, une petite région pariétale inférieure droite entre en activité. La multiplication n'active en

revanche que la région pariétale inférieure gauche. La soustraction active simultanément ces deux régions, avec une étendue et une intensité plus prononcées. Une importante activation de la région frontale gauche, peut-être liée à l'utilisation de la mémoire de travail, est aussi visible. Suivant la convention neurologique, l'hémisphère droit apparaît sur la gauche des coupes, comme si l'on se plaçait face à la personne allongée sur le dos.

comparaison sont particulièrement étonnants. Dans un ordinateur, l'algorithme le plus rapide pour comparer des nombres est l'examen successif des chiffres, de la gauche vers la droite. Ainsi peut-on déterminer que 58 est plus petit que 65 en ne comparant que les chiffres des dizaines, 5 et 6. Les unités ne sont prises en compte que si les chiffres des dizaines sont identiques. Notre cerveau ne suit pas la même procédure : tout d'abord, la courbe des temps de comparaison avec 65 ne présente pas de discontinuité particulière pour les nombres qui commencent par 6 ; ensuite, le temps de comparaison dépend du chiffre des unités même lorsqu'il est superflu. Par exemple, les temps de réponse croissent continûment entre 51 et 59, alors même que le chiffre des dizaines suffirait à savoir que ces nombres sont inférieurs à 65.

Notre algorithme mental de comparaison ne décompose donc pas les nombres. Le cerveau humain convertit les petits nombres familiers, de un ou deux chiffres, en représentations internes sur une échelle continue des quantités, puis il compare ces quantités indépendamment des symboles qui les ont véhiculées. La continuité analogique ne disparaît que pour la comparaison de nombres de plus de quatre chiffres : les sujets les comparent chiffre par chiffre, de gauche à droite, mais toujours d'autant plus vite qu'ils sont différents.

D'autres expériences ont précisé les propriétés de ce «sens des quantités». L'effet de distance est quasi identique, que les nombres soient présentés en notation arabe (2), en toutes lettres (deux) ou même sous forme d'un nuage de points : ces notations conduisent, par des voies différentes, à la même représentation abstraite des quantités. L'effet est aussi observé dans des tâches où nous n'avons pas conscience d'effectuer un traitement sémantique des nombres. Lorsque nous décidons si deux chiffres sont identiques ou différents, ce qui paraît ne demander qu'une analyse visuelle superficielle, nous sommes plus lents lorsque les chiffres sont numériquement proches : il nous faut

plus de temps pour décider que 1 est différent de 2, que pour décider que 1 est différent de 9. Même dans cette situation, nous transformons les nombres en quantités internes.

De même, lorsque nous vérifions une addition, nous sommes d'autant plus rapides à répondre «faux» que le résultat proposé est loin de la vérité. En outre, nous comparons plus rapidement le même chiffre 4 avec 5 après une présentation subliminale du mot «trois» qu'après celle des mots «un» ou «neuf» : la présentation d'un nombre, si brièvement que nous n'avons pas conscience de le voir, réduit le temps de traitement de nombres voisins.

L'effet de distance fait donc partie intégrante de la compréhension des nombres. Dès que nous percevons un symbole numérique, chiffre ou mot, parlé ou écrit, nous accédons rapidement et automatiquement à la quantité correspondante sur une sorte de «ligne» organisée par proximité numérique (voir la figure 3).

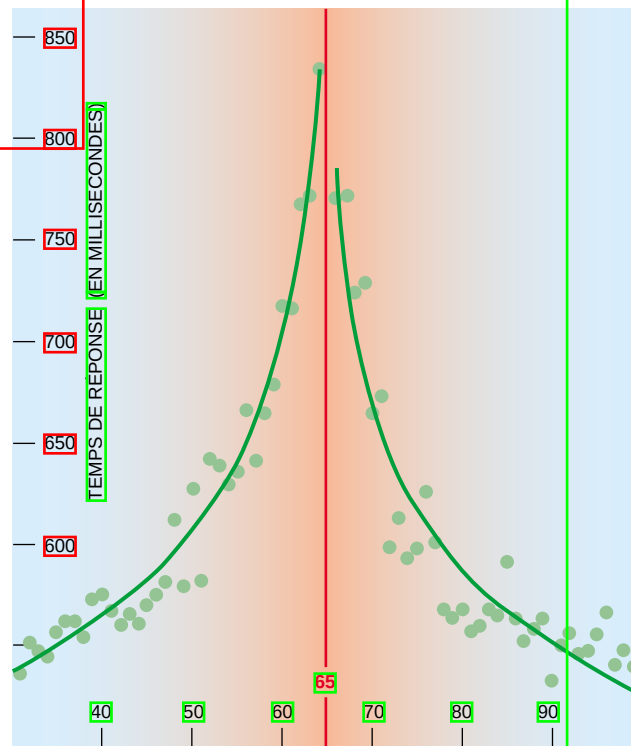
Où cette «ligne numérique» est-elle codée dans le cerveau ? Quelles régions cérébrales reconnaissent-elles la forme des chiffres arabes, et quelles autres interviennent-elles pour en représenter la quantité ? Dans un premier temps, l'examen de patients

atteints de lésions cérébrales a précisé les contributions respectives des hémisphères droit et gauche à l'activité arithmétique.

La spécialisation des hémisphères

Tout ce qui apparaît dans la moitié droite du champ visuel se projette dans l'aire visuelle primaire de l'hémisphère gauche, et *vice versa*. Lorsque nous fixons un point et qu'un chiffre apparaît à gauche de ce point pendant moins de deux dixièmes de seconde, durée insuffisante pour que le regard soit réorienté, le chiffre n'est «vu» que par le cortex visuel de l'hémisphère droit. Chez un sujet normal, l'information passe rapidement à l'autre hémisphère via un épais faisceau de fibres, le corps calleux. Chez certains patients, ce faisceau est sectionné lors d'une intervention chirurgicale visant à traiter une épilepsie rebelle : les deux hémisphères cérébraux sont intacts, mais dans l'impossibilité de communiquer. Le chiffre reste donc confiné à un seul hémisphère, et l'on mesure comment cet hémisphère seul effectue différents calculs.

Michael Gazzaniga et ses collègues de l'Université de Dartmouth ont ainsi découvert que chacun des deux hémisphères détermine si deux chiffres arabes sont identiques ou différents. La forme des chiffres est donc codée et reconnue indépendamment dans l'hémisphère gauche et dans l'hémisphère droit. La capacité d'identification du cardinal d'un ensemble et de la signification d'un chiffre arabe est aussi partagée : les deux hémisphères reconnaissent, dans une certaine mesure, si un chiffre arabe correspond ou non à un ensemble de points (tels 3 et ...). Mieux encore, chaque hémisphère sait comparer deux chiffres, et des nombres à deux chiffres. Enfin, avec Laurent Cohen, de l'Hôpital de la Salpêtrière, nous avons montré que chaque hémisphère présente un effet de distance quasi normal, même si ce dernier est un peu plus prononcé dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche. Chaque



2. NOUS COMPARONS DEUX NOMBRES plus vite quand leur différence est plus grande. Le temps moyen de comparaison d'un nombre avec 65 est fonction du logarithme de sa différence avec ce nombre.

hémisphère possède donc les procédures nécessaires à la fois pour interpréter un nombre écrit en chiffres arabes comme une quantité, et pour comparer deux quantités.

En revanche, le cerveau est nettement asymétrique dans le domaine du langage et du calcul. L'hémisphère gauche, isolément, possède apparemment toutes les capacités arithmétiques d'un sujet normal, mais l'hémisphère droit ne sait ni lire à haute voix, ni calculer. Un patient sans corps calleux, qui voit un chiffre 4 sur la gauche de son champ visuel, et le traite avec son seul hémisphère droit, sait bien que ce chiffre est plus petit que 5. Pourtant, il peut le lire «neuf» et il est totalement incapable de le multiplier par 3 ou de lui ajouter 8 (voir la figure 4).

Depuis les travaux fondateurs de Paul Broca, au XIX^e siècle, on sait que, chez la très grande majorité des gens, les processus de production du langage parlé sont uniquement présents dans l'hémisphère gauche. La section du corps calleux empêche les aires du langage de l'hémisphère gauche de recevoir de l'hémisphère droit les informations sur l'identité du chiffre à nommer. Le patient prononce alors un mot au hasard. De même, seul l'hémisphère gauche semble avoir accès aux tables d'addition et de multiplication, enregistrées sous forme de mots lorsque nous les apprenons en les récitant par cœur.

La plupart de ces résultats sont obtenus avec des patients au corps calleux sectionné chirurgicalement, qui étaient épileptiques depuis l'enfance. L'organisation cérébrale de ces patients est-elle identique à celle d'une personne ordinaire? Nous avons étudié le cas d'une femme de 30 ans, parfaitement normale sur le plan neurologique avant qu'un soudain accident vasculaire cérébral ne détruise la partie postérieure de son corps calleux. Nous observons bien les capacités quasi normales de chacun de ses hémisphères, sans qu'ils aient disposé de beaucoup de temps pour se réorganiser. Or, comme chez les patients précédents, son hémisphère gauche identifiait, comparait, prononçait, additionnait et multipliait les chiffres, tandis que son hémisphère droit ne pouvait que les identifier et les comparer.

Une autre source de données provient de patients atteints de lésions étendues de l'hémisphère gauche. Les capacités numériques de ces patients

sont à peu près celles de leur hémisphère droit seul. Jordan Grafman, de l'Institut américain de la santé de Bethesda, a étudié un ancien combattant du Viêt Nam dont la quasi-totalité de l'hémisphère gauche avait été arrachée par une rafale de mitrailleuse. Ce patient lisait et écrivait très difficilement, mais il pouvait identifier et comparer des nombres de un ou deux chiffres. Il comprenait donc toujours quelles quantités étaient associées aux chiffres. Ses capacités de calcul s'arrêtaient aux additions et aux soustractions les plus élémentaires telles que $2 + 2$.

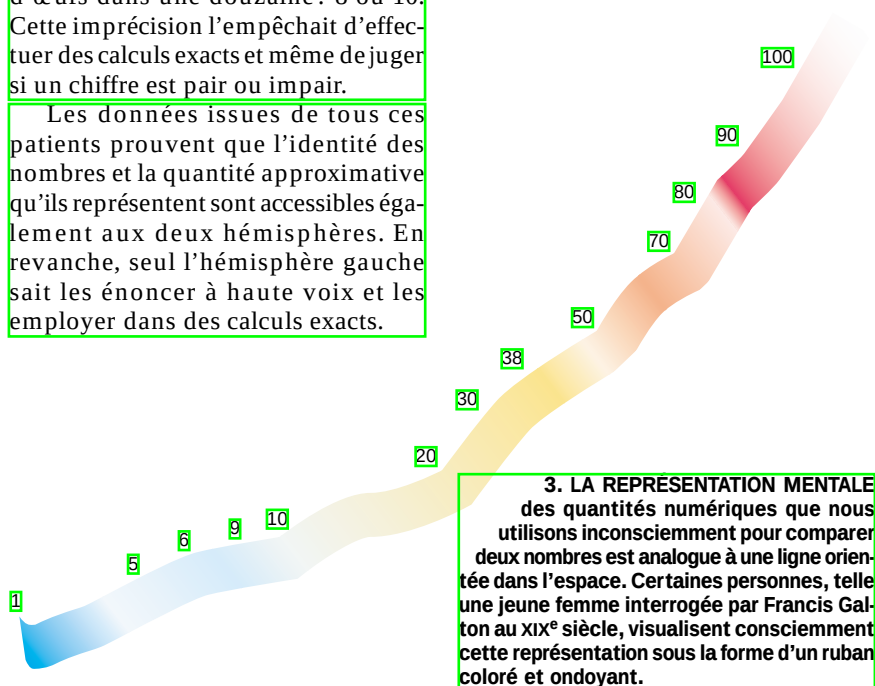
Lésions sélectives

Nous avons décrit le cas d'un patient encore plus spectaculaire, N., atteint d'une vaste lésion de la partie postérieure de l'hémisphère gauche. N. était très handicapé lorsqu'il devait lire, écrire ou calculer, énonçant sans sourciller que $2 + 2$ fait 3! Pourtant, il conservait un sens quantitatif des nombres : il savait toujours comparer deux nombres (même s'il était incapable de les lire à haute voix), avec un effet de distance normal ; il pouvait aussi faire des additions approximatives et savait donc que $2 + 2$ n'est pas égal à 9. N. paraissait ne se représenter les quantités numériques que de façon approximative. Il ne savait plus donner que des réponses approchées aux questions les plus diverses. Combien de jours dans l'année? 350, répondait-il. Combien d'œufs dans une douzaine? 8 ou 10. Cette imprécision l'empêchait d'effectuer des calculs exacts et même de juger si un chiffre est pair ou impair.

Les données issues de tous ces patients prouvent que l'identité des nombres et la quantité approximative qu'ils représentent sont accessibles également aux deux hémisphères. En revanche, seul l'hémisphère gauche sait les énoncer à haute voix et les employer dans des calculs exacts.

Quels réseaux d'aires cérébrales, dans chaque hémisphère, sont-ils responsables de la reconnaissance des chiffres, de leur lecture et de leur compréhension? Nous en avons identifié quelques-uns. La forme visuelle des chiffres arabes, par exemple, est analysée par les circuits de la voie occipito-temporale ventrale des deux hémisphères : un patient atteint d'une lésion de ces régions lit difficilement les chiffres, mais il peut les écrire ou les répéter. La compréhension et la production des mots parlés fait intervenir les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche, et de nombreux patients atteints de lésions de ces régions souffrent de difficultés à énoncer ou à comprendre les noms de nombres qu'ils entendent.

Quant au sens quantitatif des nombres, il fait intervenir les régions pariétales inférieures des deux hémisphères. Les travaux du neurologue allemand S.E. Henschen en 1919 et 1920, puis ceux de J. Gerstmann en 1940, enfin ceux d'Henri Hécaen à l'Hôpital de la Salpêtrière dans les années 1950 ont établi que des patients présentant des lésions de la région pariétale gauche ne savent plus calculer, alors qu'ils peuvent toujours nommer et écrire les nombres. Selon ces observations, la région pariétale inférieure n'intervient pas directement dans l'identification et la production des nombres, mais plutôt dans la manipulation interne des quantités numériques suivant les règles de l'arithmétique.



Nous avons récemment repris et approfondi ces observations. Nos résultats confirment qu'une lésion de la région pariétale entraîne une perte profonde du sens quantitatif des nombres. L'un des patients les plus étonnants que nous ayons observés, M., homme de 68 ans atteint d'une petite lésion de la région pariétale inférieure, n'éprouvait aucune difficulté de langage. Il lisait les nombres à haute voix et les écrivait sous la dictée. Pourtant, il ne comprenait plus le sens de ces nombres. Ainsi faisait-il parfois de grossières erreurs de comparaison de nombres, affirmant par exemple que 5 est plus grand que 6. Les soustractions lui posaient aussi d'énormes difficultés. Il ne parvint jamais à déterminer le résultat de $3 - 1$: il affirmait ne plus comprendre ce que cette opération voulait dire, et il proposa successivement pour résultat 7, 5 et 3. Il lui était également impossible de bissecter deux nombres (déterminer le nombre qui est à égale distance de chacun). Lorsque nous lui demandâmes quel nombre est entre 2 et 4, il proposa 7!

La lésion de M. était située dans son hémisphère droit, mais nous pensons que l'organisation cérébrale de ce patient gaucher était symétrique de celle d'une personne normale. Margaret Hittmair-Delazer et Brian Butterworth ont aussi observé un patient similaire, qui comparait les nombres avec de grandes difficultés, et pour lequel l'effet de distance était inversé : il mettait d'autant moins de temps que les nombres étaient proches et semblait compter même pour comparer deux nombres. Son sens des quantités était donc profondément bouleversé.

Le déficit de M. était remarquablement limité aux nombres abstraits : il trouvait sans se tromper l'intermédiaire entre deux lettres, deux notes, deux mois ou deux jours de la semaine, et il manipulait sans difficulté les dates ou les heures, déterminant quelle heure est entre 14 et 16 heures, et convertissant même «2 heures de l'après-midi» en «14 heures», ou «20 heures» en «8 heures du soir». Les opérations arithmétiques abstraites équivalentes $2 + 12$ et $20 - 12$, en revanche, lui étaient impos-

sibles. Seul le sens quantitatif des nombres, qui traite les quantités abstraites, semblait lui manquer.

Une autre dissociation intéressante fut observée entre les opérations arithmétiques. M. souffrait d'énormes difficultés en bissection et en soustraction (respectivement 77 et 75 pour cent d'erreurs), mais il lui était relativement plus facile d'additionner (32 pour cent d'erreurs) ou de multiplier les mêmes chiffres (25 pour cent d'erreurs). Il lui arrivait toutefois d'annoncer le résultat d'une multiplication à haute voix sans paraître comprendre le sens de l'énoncé. Cette observation confirme l'hypothèse que les tables d'addition et de multiplication, qui sont récitées par cœur à l'école élémentaire, s'impriment dans des circuits cérébraux liés à ceux du langage et partiellement indépendants de la représentation quantitative des nombres localisée dans la région pariétale. Cette dernière est en revanche nécessaire pour la soustraction, qui n'est pas apprise par cœur et nécessite un traitement des quantités.

Les multiples circuits de la multiplication

Nous avons d'ailleurs observé la dissociation inverse de celle de M. chez B., institutrice à la retraite atteinte d'une lésion sous-corticale de l'hémisphère gauche. Cette dame ne parvenait plus à réciter les tables de multiplication, ni d'ailleurs l'alphabet, ni *Au clair de la lune*, mais elle pouvait toujours soustraire, comparer, ou bissecter deux nombres ! Cette double dissociation montre que la région pariétale inférieure n'a pas un rôle générique dans l'arithmétique (voir l'encadré ci-contre) : elle ne renferme pas la fameuse «bosse des maths» ni le «sens des rapports des nombres» chers à Gall et aux phrénologues. Tout au plus, cette région contient-elle, dans les deux hémisphères, un codage des nombres sous forme de quantité, tandis que d'autres circuits neuraux spécialisés contribuent au codage de la table de multiplication, des dates, des heures, et même de l'algèbre.

L'existence de tels circuits et le rôle particulier de la région pariétale inférieure dans la manipulation des quantités sont confirmés par des observations directes du cerveau pendant qu'il calcule. Lorsqu'un circuit céré-

La double dissociation

La neuropsychologie, étude scientifique des patients atteints d'une lésion cérébrale, se fonde sur la méthode de la dissociation. En soumettant des patients à plusieurs types d'épreuves, on constate que ceux-ci parviennent à effectuer la tâche A, mais pas la tâche B. Par exemple, deux patients que j'ai étudiés avec Laurent Cohen, à l'Hôpital de la Salpêtrière, ne parviennent plus à lire à haute voix des paires de nombres (10 pour cent de réussite), mais peuvent indiquer lequel des deux nombres est le plus grand (100 pour cent de réussite). Les performances en lecture (tâche A) et en comparaison de nombres (tâche B) sont dissociées. Il est alors tentant de conclure que la lésion a perturbé sélectivement les circuits cérébraux de la lecture, mais non ceux de la comparaison des nombres, et donc que ces tâches sont réalisées par des régions cérébrales partiellement distinctes.

D'autres explications sont toutefois possibles : ainsi, les tâches A et B pourraient utiliser des circuits identiques, mais, la tâche A étant intrinsèquement plus difficile que la tâche B, n'importe quelle diminution non spécifique des facultés intellectuelles diminuerait les performances de A par rapport

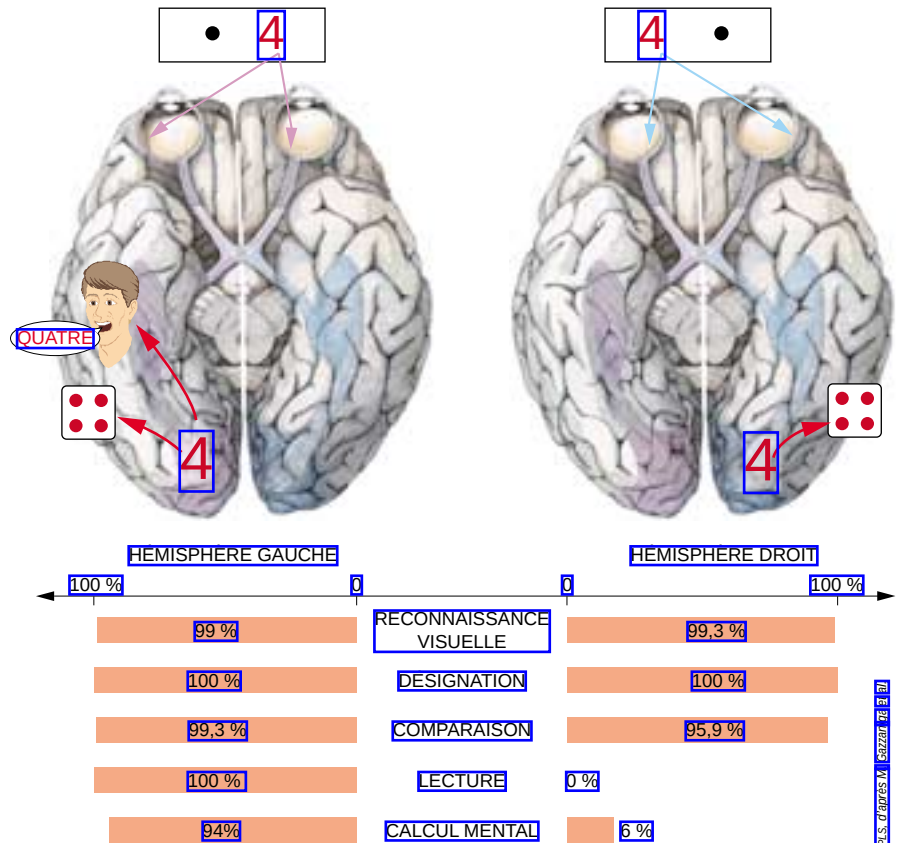
à B. Par exemple, la moindre erreur de perception des chiffres perturbe la lecture, mais pas nécessairement la comparaison : un patient qui lirait la paire de nombres «31, 99» comme «quarante et un, quatre-vingt-dix-huit» les placerait néanmoins dans le bon ordre. De plus, les pourcentages d'erreurs des tâches A et B ne sont pas toujours directement comparables : un patient qui obtiendrait 50 pour cent de réussite en comparaison de nombres ne ferait pas mieux que s'il répondait au hasard, alors que 50 pour cent de réussite en lecture demeurerait un score honorable, puisque, pour des nombres de deux chiffres, la probabilité de répondre correctement n'est que de un pour cent.

Pour toutes ces raisons, les neuropsychologues recherchent l'observation d'une double dissociation : au moins deux patients tels que, dans la tâche A, le patient 2 réussit mieux que le patient 1, et dans la tâche B, le patient 1 réussit mieux que le patient 2. Aucune des deux tâches ne peut alors être jugée intrinsèquement plus difficile que l'autre. Selon le site de la lésion cérébrale, l'une ou l'autre capacité pâtit : on peut alors affirmer qu'elles reposent sur des circuits cérébraux différents.

bral entre en activité, il s'ensuit, quelques secondes plus tard, une augmentation locale du débit sanguin et du taux d'oxygénation du sang dans les vaisseaux qui irriguent les régions cérébrales actives. Cette augmentation, confinée à l'intérieur de la boîte crânienne, peut être observée de l'extérieur par l'injection d'un traceur radioactif qui s'accumule préférentiellement dans les régions actives et dont la distribution spatiale est reconstituée à partir de la distribution des rayonnements émis, mesurée par une caméra à positons.

Dès 1985, P. Roland et L. Friberg, à l'Université de Copenhague, ont ainsi observé l'activité corticale lors de soustractions répétées de 3 en 3 ($50 - 3 = 47$, $47 - 3 = 44$, $44 - 3 = 41$, etc.) : une intense activité bilatérale de la région pariétale inférieure, accompagnée d'une activité des lobes frontaux sans doute liée à la mémorisation des résultats intermédiaires. Ces résultats ont récemment été reproduits en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique, technique plus précise où l'on mesure directement l'état d'oxygénation des molécules d'hémoglobine du sang. Même pendant des soustractions simples, telle $11 - 4$, nous observons une activation intense qui s'étend sur plusieurs centimètres le long du sillon intrapariétal, depuis le fond du sillon postcentral jusqu'à la région pariéto-occipitale. Plusieurs aires cérébrales sont donc vraisemblablement actives.

Nous mesurons aujourd'hui systématiquement l'activité cérébrale au cours de diverses tâches arithmétiques (lecture, comparaison, addition, soustraction, multiplication...). Selon nos premiers résultats, le cortex pariétal droit s'active durant la comparaison de nombres, alors que la multiplication donne lieu à une activité réduite et quasi exclusivement localisée dans l'hémisphère gauche, et la soustraction à des activations bilatérales. Un travail précédent a montré qu'une autre région, le noyau lenticulaire gauche, s'active plus lors de multiplications que lors de comparaisons des mêmes nombres. Or cette région sous-corticale était précisément celle dont la lésion avait causé chez B. une perte de la mémoire des multiplications ! Ainsi, la convergence des résultats obtenus avec des patients et des sujets normaux précise-t-elle les circuits associés à chaque opération.



4. LES DEUX HÉMISPHERES CÉRÉBRAUX ont des capacités arithmétiques différentes. Ils identifient visuellement les chiffres et savent quelles quantités ils représentent, mais seul l'hémisphère gauche accède à la prononciation et à la mémoire des tables arithmétiques. Les graphes indiquent les scores obtenus pour différentes tâches par un patient dont le corps calleux, reliant normalement les deux hémisphères, est rompu : un chiffre présenté dans la moitié droite ou gauche du champ visuel n'est traité que par l'hémisphère opposé. Le patient peut dans tous les cas dire si deux chiffres sont identiques, désigner du doigt les chiffres correspondant dans un tableau, ou les comparer avec 5 ; il ne peut toutefois les lire à haute voix ou les utiliser dans des calculs mentaux que lorsqu'ils atteignent son hémisphère gauche.

La région pariétale est-elle subdivisée en plusieurs sous-régions, spécialisées pour des nombres de tailles différentes ? Lisa Cipolotti, Brian Butterworth et Gianfranco Denes ont observé une patiente incapable de comprendre les chiffres supérieurs à 4, le sens des nombres 1, 2, 3 et 4 étant préservé. Il n'est pas impossible que les petits et les grands nombres soient représentés dans des régions cérébrales partiellement différentes.

Les étapes du calcul

La cartographie des zones cérébrales et de leurs fonctions, aussi précise soit-elle, ne suffit toutefois pas à comprendre les mécanismes cérébraux de traitement des nombres. Nous devons aussi connaître le déroulement temporel de ces phénomènes. Dans quel ordre et à quelle vitesse les différentes régions deviennent-elles actives ?

La résolution temporelle des images de caméra à positons ou de résonance magnétique est limitée par le temps d'établissement de la circulation sanguine dans les régions actives, qui est de plusieurs secondes. En revanche, la décharge simultanée des dizaines de milliers de neurones d'une région cérébrale en activité produit un minuscule courant électrique, que l'on détecte à la milliseconde près par électroencéphalographie, en apposant des électrodes sur le scalp. La contrepartie de cette excellente résolution temporelle est une perte de résolution spatiale : les signaux électromagnétiques mesurés à la surface du scalp sont parfois ambigus quant à la position des régions activées.

J'ai ainsi reconstitué la séquence temporelle des activations cérébrales lorsque nous comparons deux nombres (voir la figure 5). Je mesurais l'activité électrique du cerveau à l'aide de 64 électrodes réparties à la surface du scalp

d'une personne, tandis qu'elle comparait avec 5 des chiffres arabes (1, 4, 6 ou 9) et des noms de nombres (UN, QUATRE, SIX ou NEUF).

Vers 100 millisecondes après l'apparition du nombre sur l'écran, un potentiel électrique positif sur les électrodes postérieures indique l'entrée en activité de l'aire visuelle primaire. Puis, vers 150 millisecondes une différence

de topographie apparaît selon qu'un chiffre arabe ou un nom de nombre est présenté : ils sont identifiés par des réseaux anatomiques différents. Les chiffres sont reconnus par les régions occipito-temporales ventrales des deux hémisphères, alors que seule la région gauche intervient pour les mots. À ce stade, cependant, aucun effet de distance n'est notable : seule l'identité

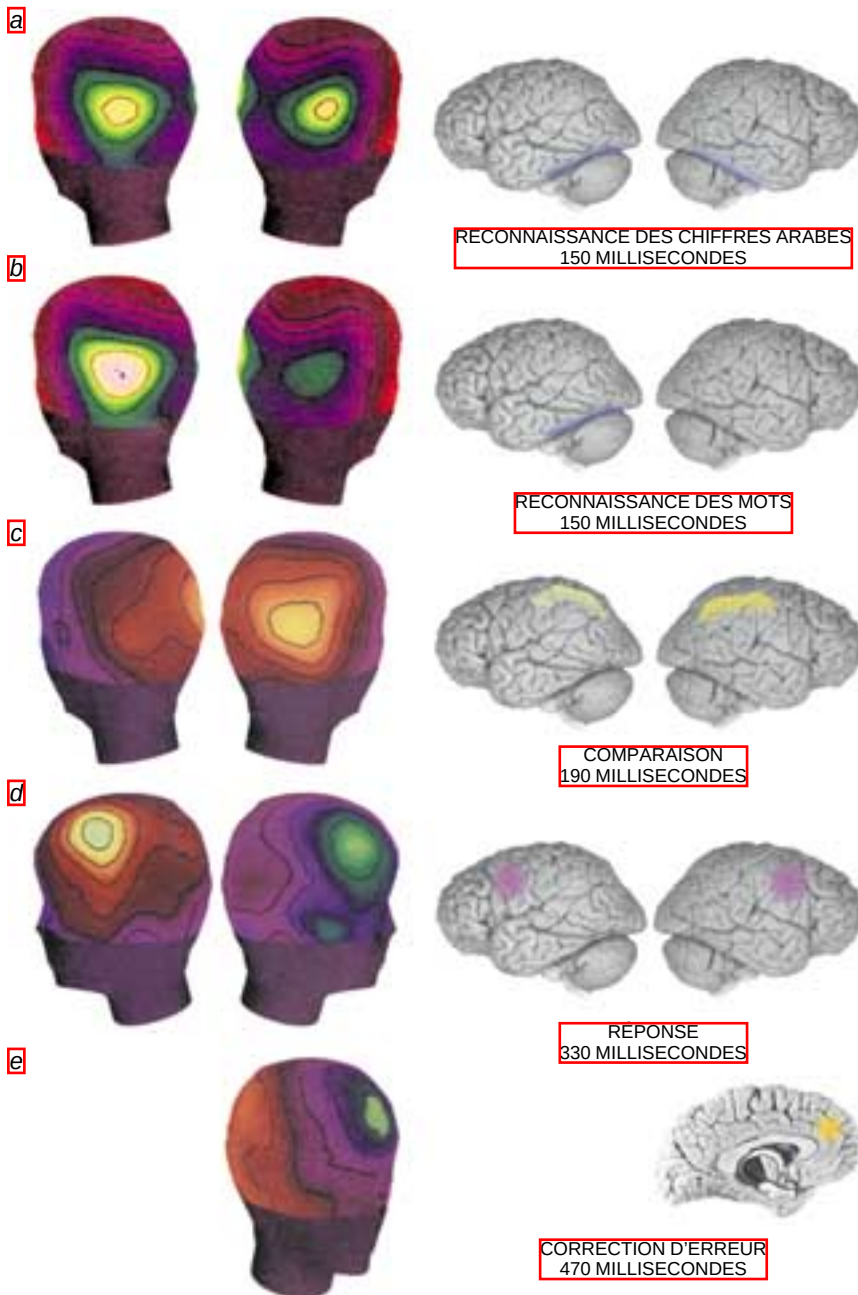
des symboles a été reconnue, mais pas leur sens.

Vers 190 millisecondes, l'effet de distance apparaît. Les sujets sont systématiquement plus lents pour les chiffres 4 et 6 que pour les chiffres 1 et 9. En outre, le potentiel mesuré sur les électrodes situées en regard du cortex pariétal inférieur varie en fonction de la différence du chiffre avec 5. Enfin, la topographie de cet effet est similaire pour les nombres présentés en chiffres arabes et en toutes lettres, ce qui confirme que la région pariétale inférieure ne code pas les nombres sous forme de symboles dans une numération particulière, mais dans un code quantitatif abstrait et indépendant de la notation d'entrée.

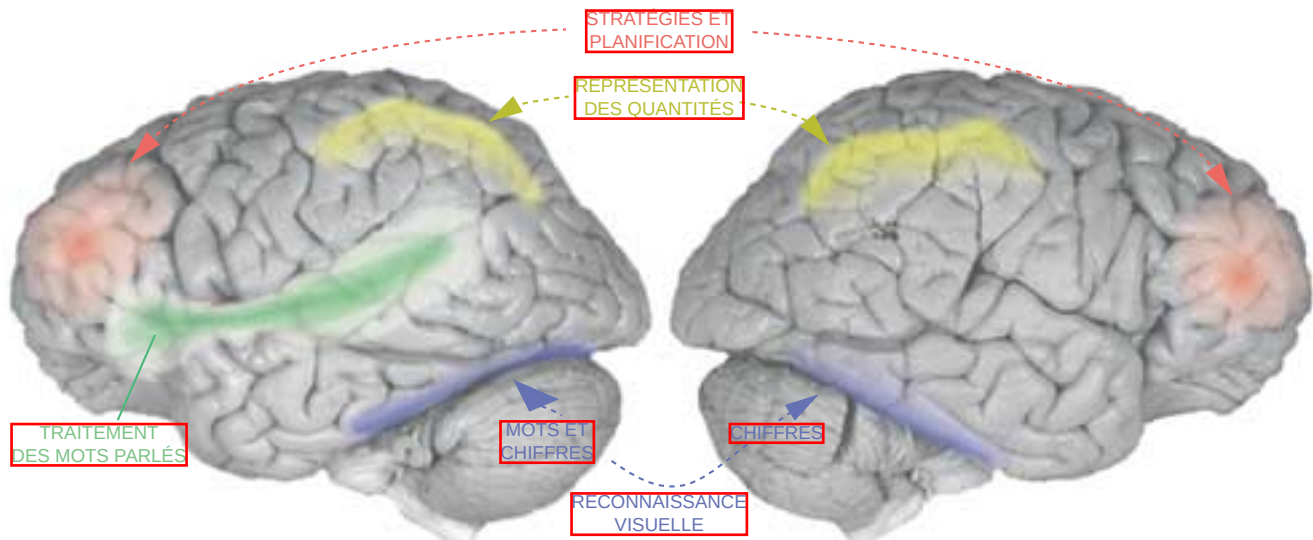
On suit aussi les étapes ultérieures du traitement de l'information. Dès 250 millisecondes, la première différence significative apparaît entre les réponses «plus grand» et «plus petit» : le sujet les donne en appuyant respectivement avec la main droite et avec la main gauche. Dès ce moment, un quart de seconde seulement après l'affichage du nombre, le système moteur commence à être informé de la réponse correcte. L'activation motrice ne culmine toutefois que vers 330 millisecondes, et la réponse elle-même ne survient que vers 400 millisecondes en moyenne. Ensuite, vers 470 millisecondes, on observe l'activation d'une nouvelle aire cérébrale, la région cingulaire antérieure, qui joue un rôle dans le contrôle des autres circuits cérébraux. Dès que le sujet fait une erreur, cette région s'active pour la détecter et tenter de la corriger. On voit alors une reprise de l'activité électrique concomitante de la réponse initiale.

Cette suite d'événements, identification du chiffre, compréhension par la région pariétale inférieure, puis réponse motrice, correspond à ce que nous pouvions déduire de la cartographie des régions cérébrales. L'électroencéphalographie précise toutefois la durée des différentes étapes.

Des expériences semblables révèlent en outre que, si l'on présente deux fois de suite le même chiffre dans la tâche de comparaison, l'étape d'identification est directement suivie de la réponse motrice, sans effet de distance et pour ainsi dire sans activation de la région pariétale inférieure : les sujets détectent la répétition, se remémorent la réponse précédente et la répè-



5. LA SEQUENCE D'ACTIVATION CERVEbraLE, au cours de la comparaison de chiffres avec 5, se déroule selon au moins quatre étapes. Les variations du potentiel électrique à la surface du cerveau (à gauche) reflètent l'activité des régions cérébrales sous-jacentes et indiquent quand les différentes régions cérébrales (à droite) entrent en activité. En 150 millisecondes, le chiffre ou le mot est reconnu (a et b) ; vers 190 millisecondes, la comparaison est faite, activant la région pariétale inférieure (c). Après 330 millisecondes, la personne entame un mouvement du doigt pour donner la réponse en appuyant sur un bouton (d). Enfin, vers 470 millisecondes, la région cingulaire antérieure s'active (e), afin de corriger une éventuelle erreur.



6. PLUSIEURS RÉGIONS CÉRÉBRALES seraient utilisées pour le traitement des nombres. Selon le modèle envisagé, la reconnaissance visuelle active la région occipito-temporale ventrale (en bleu), dans l'hémisphère gauche pour les mots écrits et des deux côtés pour les chiffres arabes. La reconnaissance et la production des mots parlés activent la région péri-sylvienne de l'hémisphère gauche (en

vert). Les quantités numériques sont représentées dans la région pariétale inférieure des deux hémisphères (en jaune), notamment dans la profondeur du sillon intrapariétal. Enfin, le cortex préfrontal (en rouge) intervient pour mémoriser les résultats intermédiaires et contrôler les stratégies mises en jeu dans les régions postérieures. Au cours d'un calcul, toutes ces régions échangent des informations.

tent. Plus intéressant encore, lorsque nous multiplions deux chiffres, si la multiplication est simple, telle 2×3 , l'activation pariétale est fortement latéralisée à gauche et de courte durée. Si, au contraire, la multiplication est moins familière, telle 8×7 , alors elle semble démarrer dans l'hémisphère gauche avant de s'étendre à la région pariétale droite pendant plusieurs centaines de millisecondes. La taille des nombres manipulés et la nature des opérations effectuées conditionneraient donc les chemins du calcul dans notre cerveau.

L'existence de régions cérébrales spécialisées dans le traitement des nombres pose la question de leur origine. La région pariétale inférieure est-elle déjà en partie opérationnelle chez le très jeune enfant et lui confère-t-elle déjà un sens approximatif des quantités? Des organismes aussi divers que le rat, le pigeon, le dauphin, le chimpanzé et le bébé humain de quelques jours, bien que dépourvus de langage, se représentent mentalement le cardinal d'un ensemble d'objets visuels ou sonores, et même effectuent certaines déductions arithmétiques élémentaires. Un bébé de quatre mois et demi s'attend à ce qu'un ensemble de deux objets auquel on en retranche un n'en contienne plus qu'un seul : il effectue mentalement un analogue, avec des objets concrets, de l'opération arithmétique abstraite $2 - 1 = 1$. Des circuits cérébraux pré-spécifiés pour la représentation des

quantités existeraient donc dès la naissance, indépendamment de toute éducation mathématique. L'apprentissage de la récitation des noms de nombres («un, deux, trois...») et de la forme visuelle des chiffres arabes («1, 2, 3...») permettrait alors ultérieurement d'associer des systèmes de numération symbolique à ce «sens des quantités», l'enfant apprenant à mettre en rapport le mot «quatre», le chiffre «4» et la quantité «:».

Quelle que soit la validité de ce schéma, un principe général d'organisation cérébrale émerge : la modularité des réseaux. Sans que nous en soyons conscients, des dizaines d'aires cérébrales spécialisées, réparties dans les deux hémisphères, s'activent lorsque nous pratiquons le calcul mental. L'information passe sans effort des représentations visuelles, spécialisées dans l'identité des chiffres, aux aires du langage, où les nombres sont codés sous forme de chaînes de mots, et aux aires du «sens quantitatif» où leurs quantités et leurs relations de proximité sont retrouvées. Nous commençons à saisir les principaux nœuds de ce réseau, mais deux questions demeurent en suspens. Quels mécanismes assurent la cohérence des informations numériques réparties et nous donnent l'impression subjective d'effectuer un calcul unique? Comment ces mécanismes de calcul élémentaires cèdent-ils la place, au fil de l'éducation mathématique, à des représentations

cérébrales d'objets mathématiques beaucoup plus élaborés et jusqu'à l'extraordinaire fluidité calculatoire et à la créativité mathématique d'un Einstein, d'un Poincaré ou d'un Ramanujan? Peut-être Hadamard, s'il prenait connaissance de ces interrogations, serait-il frustré de constater que ses questions les plus fondamentales demeurent sans réponse. Il éprouverait sans doute aussi quelque satisfaction à constater que ses méthodes introspectives sont désormais remplacées par de solides techniques expérimentales issues de la neurobiologie et de la psychologie cognitive.

Stanislas DEHAENE est chargé de recherches à l'unité INSERM 334, dans le service hospitalier Frédéric-Joliot du CEA à Orsay.

J. HADAMARD, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, éditions Gauthier-Villars, Paris, 1975.

S. DEHAENE et L. COHEN, *Towards an Anatomical and Functional Model of Number Processing*, in *Mathematical Cognition*, n° 1, pp. 83-120, 1995.

M. GAZZANIGA, *Le cerveau social*, éditions Odile Jacob, Paris, 1996.

Le cerveau en action : l'imagerie cérébrale en psychologie cognitive, sous la direction de S. DEHAENE, Presses universitaires de France, Paris, 1997.

S. DEHAENE, *La bosse des maths*, éditions Odile Jacob, Paris, 1997.

Peut-on sauver les forêts tropicales?

RICHARD RICE • RAYMOND GULLISON • JOHN REID

Une gestion «durable» des exploitations forestières tropicales peut réduire la biodiversité. La constitution de réserves serait un mode de préservation plus efficace.

La destruction des forêts tropicales humides est une catastrophe écologique : ces habitats luxuriants abritent une flore et une faune très variées, dont les biologistes n'ont encore étudié qu'une infime partie. L'une des causes principales de cette destruction est l'abattage des arbres exotiques dont le bois a une grande valeur.

Comment concilier les intérêts économiques des exploitants forestiers et la conservation de la forêt? Cette dernière serait-elle préservée par une réglementation plus stricte de l'abattage des arbres et par la replantation des espèces d'arbres coupées? Il y a quelques années, nous aurions accepté l'idée, car cette pratique concilie l'intérêt des populations locales et la biodiversité. Toutefois, nous avons changé d'avis depuis que nous observons des exploitations forestières en Amérique du Sud : la régénération, naturelle ou artificielle, des ressources forestières ne protège pas la forêt, et elle n'est pas rentable.

Dans la plaine bolivienne, l'Organisation internationale du bois tropical étudie la durabilité des méthodes d'exploitation dans la Forêt de production permanente Chiman, qui s'étend sur 500 000 hectares de forêt humide amazonienne. La principale essence de bois exploitée dans cette région

est l'acajou du Honduras (*Swietenia macrophylla* King). Nous avons découvert que les jeunes plants d'acajou ne poussent et ne prospèrent que sur des zones bouleversées par des événements naturels, notamment près de rivières dont des crues récentes ont nettoyé les rives et enfoui la végétation sous une épaisse couche de sédiments. Par suite, les acajous poussent par groupes de même âge et de même taille, assez distants les uns des autres. Dans une seule de ces zones, tous les arbres atteignent une taille commercialisable au même moment : une exploitation non réglementée aboutira donc inéluctablement à la coupe de tous les arbres les plus âgés.

Même si les forestiers ne coupaient pas tous les acajous, la croissance naturelle ne suffirait pas au remplace-

ment des arbres récoltés : les jeunes plants d'acajou (et de quelques autres essences tropicales) ne poussent pas à l'ombre de la forêt tropicale dense, de sorte que l'intervention humaine serait indispensable. Les exploitants devraient créer des conditions favorables au développement de nouveaux plants d'acajou en ouvrant de larges espaces dans la forêt, comme la nature le fait parfois. Le travail nécessaire serait gigantesque et devrait en outre s'accompagner de coûteux «nettoyages» périodiques, afin d'éliminer les espèces concurrentes de l'acajou. Au total, les interventions perturberaient une si grande surface de forêt que l'objectif global de conservation serait compromis. La préservation de l'acajou réduirait la diversité biologique de la forêt.

D'autre part, nous avons calculé que l'exploitation durable de la forêt Chiman serait moins rentable. Les forestiers ont probablement fait le même calcul : ils appliquent des règles d'exploitation durable dans moins de 0,12 pour cent de leurs concessions tropicales. La plupart du temps, ils abattent le plus vite possible les arbres de plus grande valeur marchande, sans se préoccuper de l'état des bouquets d'arbres résiduels et sans investir dans leur régénération. Le nombre d'essences ex-



1. DES GRUMES D'ACAJOU CENTENAIRE attendent d'être découpées dans une scierie bolivienne. L'acajou (*Swietenia macrophylla* King), l'une des essences tropicales les plus précieuses, est exploité dans de nombreuses régions d'Amérique centrale et du Sud, notamment au Guatemala, au Belize, en Bolivie, au Pérou et au Brésil.

traites va de une à 80 ou 90 (lorsqu'il existe une demande pour une grande variété d'espèces).

Couper est plus rentable

Afin de comprendre cette attitude, comparons les rentabilités de la coupe immédiate des arbres accompagnée d'un placement du produit de la vente, et du maintien des arbres sur pied, leur valeur augmentant avec leur volume. Dans le premier cas, les taux d'intérêt donnent la mesure du profit. Dans les pays en développement, les risques étant considérables et les capitaux rares, les taux d'intérêt réels sont souvent élevés : 17 pour cent en moyenne ces dernières années, en Bolivie. Les sociétés qui réalisent rapidement leur actif placent leurs profits immédiatement et obtiennent des rendements permanents élevés.

La conservation des arbres sur pied est d'un rapport inférieur : entre 1987 et 1994, l'augmentation réelle du prix de l'acajou a été en moyenne de un pour cent par an, tandis que la croissance annuelle en volume des arbres de taille commercialisable est inférieure à quatre pour cent. Au total, la valeur des acajous (ainsi que de la plupart des autres essences commerciales des régions tropicales américaines) augmente au plus de quatre à cinq pour cent par an. Le gain est donc quatre fois inférieur à celui d'un placement en Bolivie.

En outre, la valeur des arbres sur pieds peut s'effondrer si le vent, le feu ou une maladie les détruit, ou si le gouvernement décide de limiter l'exploitation forestière. Le choix de ne pas couper les arbres est donc un investissement incertain, dont le rendement est, au mieux, égal à celui d'un placement sûr (dans un pays riche) de l'argent tiré de l'abattage des arbres. Les exploitants forestiers, comme la plupart des investisseurs, évitent les

2. CES DEUX ZONES FORESTIÈRES SONT EXPLOITÉES, mais les dégradations sont très différentes. Des forestiers pratiquant une exploitation conforme à une réglementation stricte ont abattu la plupart des arbres de cette zone de l'île de Vancouver, au Canada (*en haut*) ; paradoxalement, les forestiers de Bolivie du Sud (*en bas*), soumis à un faible contrôle gouvernemental, n'ont coupé qu'une infime partie de la forêt renfermant des espèces de valeur marchande élevée.



MICHAEL J. STEVENS



RODNEY DICKSON

placements à risques dans les pays en développement sans la contrepartie de taux d'intérêt élevés. Dans la région de Chimanes, l'abattage non limité est deux à cinq fois plus rentable qu'une coupe qui permettrait une production d'acajou continue et durable. Les exploitations forestières ont donc adopté l'approche financièrement la plus rationnelle : elles récoltent tout l'acajou disponible, sans investir dans la régénération qui garantirait de futures récoltes, puis elles exploitent successivement toutes les essences qu'elles peuvent vendre en faisant des bénéfices.

Dans les pays en développement, les États ont peu de moyens pour lutter contre ces pratiques. Ainsi, en Bolivie, le budget de l'Office national des forêts est de moins de 1,70 franc par hectare de terres administrées et par an. Les organismes de contrôle boliviens ont beaucoup de difficultés à contrebalancer les avantages financiers que représente la coupe de tous les arbres de valeur en une seule fois.

Ces pratiques détruisent-elles la forêt? Dans la région de Chimanes

l'acajou est menacé, mais l'exploitation forestière a peu de conséquences sur l'ensemble de la forêt. Un ou deux acajous en moyenne poussent sur une parcelle de dix hectares : la construction de routes, l'abattage et l'enlèvement des grumes détruisent moins de cinq pour cent de la forêt. L'exploitation forestière actuelle est beaucoup plus respectueuse de l'environnement qu'une gestion durable qui nécessiterait des récoltes plus intensives d'une plus grande variété d'essences : cette dernière doublerait les dégradations.

Une durabilité destructrice

Ainsi la durabilité est un mauvais critère d'évaluation des dégâts environnementaux de l'exploitation forestière. L'idéal serait bien sûr que les sociétés forestières régénèrent la forêt qu'elles exploitent, sans la dégrader. Toutefois, compte tenu des pratiques réelles, la biodiversité est mieux préservée par une exploitation non durable, mais qui détruit peu l'environnement, que par une exploitation durable et destructrice.

Les défenseurs de la nature, soucieux de préserver les forêts tropicales, proposent de nombreuses mesures. Toutefois, la plupart du temps, elles n'auraient pas les conséquences bénéfiques escomptées, car elles ne distinguent pas les avantages de l'abattage des forêts existantes de ceux de la régénération. À moins d'un étroit contrôle de l'État, qui peut seul gérer les forêts sur le long terme, les sociétés forestières ne développent que les activités bénéficiaires financièrement à court terme.

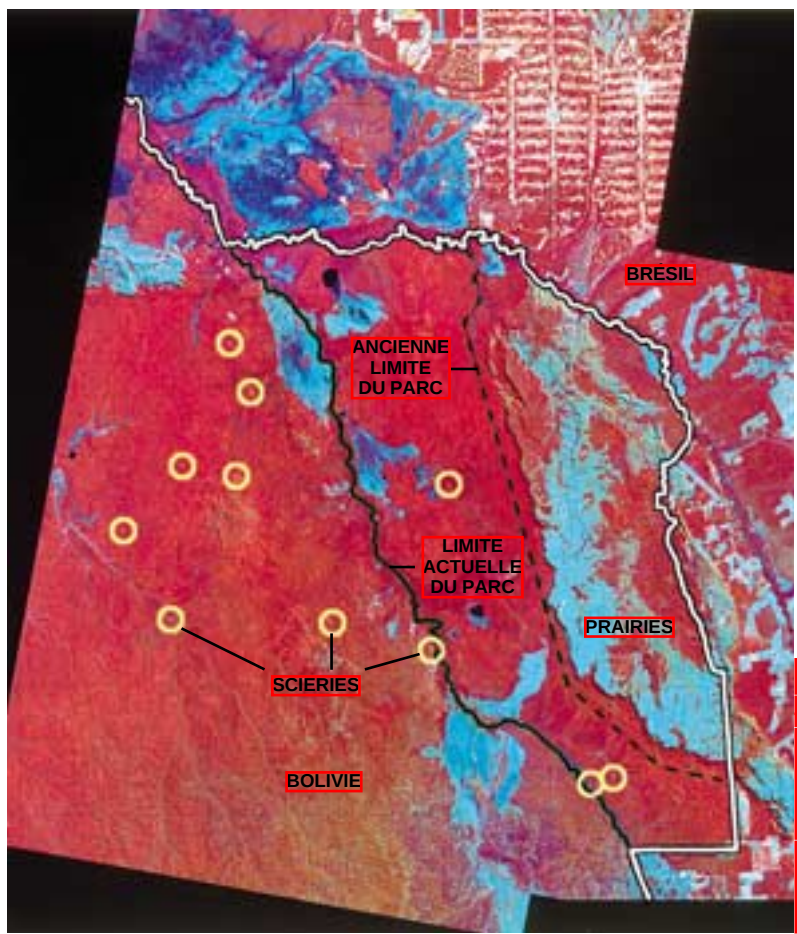
Ainsi, la promotion du commerce et de l'utilisation d'essences moins connues ne préserve pas les forêts contre le défrichage en vue d'une exploitation agricole des terres. Pourquoi serait-il plus rentable d'investir dans la régénération de nouvelles essences plutôt que dans celle d'essences que l'on exploite déjà? Le développement de marchés des espèces secondaires risque plus d'augmenter le nombre d'arbres récoltés que le souci de la conservation.

De même, les transformations du bois, qui créent de la valeur ajoutée (telles les fabrications de meubles



L'AMÉRIQUE DU SUD

3. UNE IMAGE SATELLITE (à droite) des forêts amazoniennes (zones en rouge) fait apparaître une faible dégradation due à l'exploitation forestière le long de la frontière, côté bolivien. La forêt a été exploitée sur l'ensemble de cette partie de la Bolivie, y compris dans le parc national récemment agrandi. Du côté brésilien, une forte colonisation et une agriculture de subsistance, le long des routes aménagées, ont fait disparaître la couverture forestière (zones en blanc), tout comme les clairières ouvertes pour l'élevage extensif. Les autres régions non boisées (en bleu) sont des marais et des prairies naturelles que l'on trouve à des altitudes supérieures.



L'AMÉRIQUE DU SUD

ou de contreplaqué), accroissent la vitesse et l'étendue de la destruction de la forêt, contrairement au but visé. En outre, le développement d'industries de transformation a fait baisser le revenu global de plusieurs pays, car d'importantes subventions sont nécessaires pour attirer les investissements requis.

La garantie, pour les sociétés forestières, d'un accès à long terme aux ressources forestières les inciterait-elle à investir dans des récoltes futures? Si cette garantie n'est pas accompagnée de subventions, les investissements pour la régénération ne deviendront pas rentables pour autant. Tout au plus réduit-elle le risque associé à des investissements plus lourds dans des équipements d'exploitation : elle encouragerait donc un abattage plus rapide des arbres.

Ainsi, en 1994, dans le Petén, province très boisée du Nord-Ouest du Guatemala, après une suspension de l'exploitation forestière décrétée par le gouvernement, des responsables guatémaltèques envisageaient d'attribuer de vastes étendues de forêt aux exploitants par des contrats d'une durée de 25 ans. Nous pensions que des concessions aussi longues ne rendraient pas les exploitations plus durables ni n'évitieraient l'extension des terres agricoles ; pis encore, nous prévoyions qu'elles perturberaient la récolte artisanale de gomme chicle, de feuilles de palmier d'ornement et de piments, produits d'exportation qui fournissent un revenu à des milliers de personnes. Nous avons donc adressé au gouvernement guatémaltèque un rapport où nous démontrions que les exploitations devraient beaucoup réduire leurs bénéfices pour gérer durablement ces forêts. Le projet a été suspendu, malgré la pression des industriels du bois pour sa réalisation.

Les limites du «label vert»

Une autre incitation à la protection des forêts est la création d'un «label vert», attribué aux forestiers qui respectent volontairement des normes environnementales. Le bois «vert» est vendu plus cher, mais il bénéficie d'un accès réservé à certains marchés. Toutefois, les surcoûts que les consommateurs acceptent de payer pour des produits «verts» sont inférieurs à dix pour cent : ils ne compensent

Vive la différence

Pourquoi protéger les forêts tropicales? En premier lieu, parce qu'elles abritent une partie de la biodiversité de la planète : écosystèmes, espèces et gènes. Les biologistes n'ont décrit que 1,4 à 1,5 million d'espèces vivantes, alors qu'il en existerait des dizaines de millions. La moitié des espèces décrites aujourd'hui vivent dans les forêts tropicales.

Quelques exemples illustrent la richesse biologique des forêts tropicales. Presque 600 espèces d'oiseaux vivaient sur une parcelle de cinq kilomètres carrés de forêt humide au Pérou (la France compte 537 espèces d'oiseaux). Dans la même jungle péruvienne, 43 espèces de fourmis vivaient dans le même arbre, autant que dans l'ensemble des îles Britanniques. Une parcelle de 1 000 mètres carrés de forêt tropicale contient en moyenne 300 espèces de plantes, contre moins d'une centaine sur une parcelle équivalente en région tempérée. La Guyane, territoire de 90 000 kilomètres carrés, est peuplée du même nombre d'espèces de plantes que la France métropolitaine, de 550 000 kilomètres carrés.

Cette diversité végétale et animale est vitale pour notre espèce : c'est une source irremplaçable de nourriture, de médicaments et de matières premières. Ainsi, les plantes sauvages portent des ressources génétiques nécessaires à la formation d'hybrides agricoles résistants aux ravageurs et aux maladies. Par ailleurs, près de 120 médicaments proviennent de 95 espèces végétales, dont 39 poussent dans les forêts tropicales.

La Convention sur le commerce international des espèces menacées d'extinction est un moyen de protéger la biodiversité. Cet accord de 1973 a contribué à éviter l'extinction des éléphants et des gorilles. La Bolivie, deuxième exportateur d'acajou après le Brésil, a récemment convaincu les États-Unis de soutenir la demande d'inscription de l'acajou dans l'Annexe 2 du traité, ce qui obligerait les pays à surveiller leurs exportations, afin de s'assurer que le commerce international ne met pas l'espèce en danger. Bien que les conséquences de cette proposition restent floues, nous espérons qu'elle attirera l'attention sur la préservation de la biodiversité.



X. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.



N. JORDAN - BRUCE COLEMAN INC.

PARMI LES ESPÈCES PROTÉGÉES déjà répertoriées dans l'Annexe 2 de la Convention sur le commerce international des espèces menacées d'extinction, on trouve (de haut en bas), les orchidées, les grenouilles vénéneuses, les caméléons, les colibris, les coraux, le ginseng d'Amérique et les phoques à fourrure des Galápagos (à gauche).

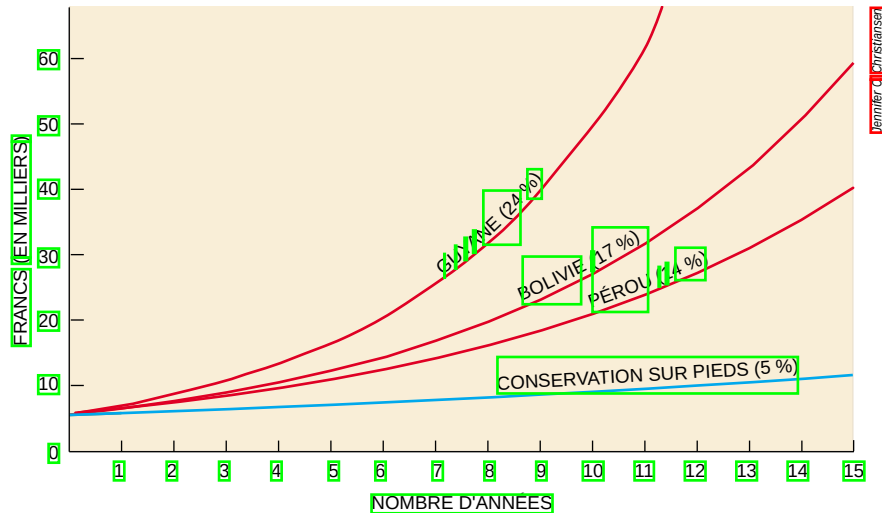
pas le manque à gagner d'une exploitation durable.

Des normes «vertes» favorisent effectivement la conservation de la forêt si leur respect coûte peu et s'il réduit vraiment la dégradation de l'environnement (une clause utile, par exemple, est l'interdiction de chasser les animaux de la forêt). Bien que la demande des consommateurs pour du bois «vert» soit encore faible, le marché de tels produits, avec un faible surcoût, pourrait être développé.

En attendant, restons prudents : les mesures les mieux intentionnées peuvent avoir pour seul résultat une accélération de la dégradation des forêts tropicales. Les écologistes doivent s'y résoudre : la gestion durable des forêts tropicales n'est pas pour demain. La logique économique et la faiblesse de la plupart des États des pays en développement sont des obstacles difficiles à surmonter.

Malgré ce constat pessimiste, nous faisons quelques propositions. En premier lieu, le remplacement des arbres coupés et la protection de la diversité biologique ne sont pas rentables aux taux d'intérêt élevés pratiqués dans les pays en développement, mais elles le deviendraient si des banques de développement ou des investisseurs motivés prêtaient à faible taux aux sociétés forestières. On pourrait aussi encourager la création de réserves dans les concessions exploitées et à leur périphérie. La surveillance de telles réserves, peu coûteuse, contribuerait à la conservation de la biodiversité. Plutôt que de simplement maintenir la couverture forestière, ces zones protégées permettraient de conserver la quasi-totalité des espèces qu'abrite la forêt, ainsi que des arbres âgés. L'idéal serait que ces terres soient voisines d'autres forêts intactes. Pour minimiser le coût, nous proposons de choisir des parcelles non exploitables, situées sur des pentes trop raides ou dans des forêts modérément exploitées dans le passé.

Bien sûr, les sociétés forestières s'opposeraient probablement à la création de ces réserves, même si elles étaient établies sur les terres les moins productives de leurs concessions. Le gouvernement bolivien s'est attaqué à ce problème par une incitation financière : il a créé une taxe forfaitaire d'exploitation (d'environ six francs par hectare et par an), dont sont exemptées les zones déclarées non exploitées par les forestiers.



4. LE PROFIT apporté par une récolte rapide des arbres et l'investissement des produits aux taux d'intérêt réels pratiqués dans les pays en développement (en rouge) est bien supérieur à celui de la conservation des arbres sur pieds (en bleu).

Ces zones peuvent atteindre 30 pour cent d'une concession. Cette mesure devrait encourager les exploitants à protéger leurs terres de faible valeur commerciale, et elle les habituera peut-être à l'idée de réserves environnementales.

Dans des forêts comme celle de Chimanes, où l'exploitation incontrôlée est sélective et où le défrichement est faible, le *statu quo* semble la meilleure des options disponibles. L'exploitation de la forêt de Chimanes se poursuivra probablement longtemps encore après l'épuisement de l'acajou : les pratiques actuelles de récolte sélective d'un grand nombre d'espèces commerciales, à raison d'une ou deux essences à la fois, pourrait durer plusieurs décennies. Le défi pour les protecteurs de l'environnement n'est pas tant de convaincre les sociétés forestières de pratiquer une exploitation durable, mais plutôt de protéger les forêts âgées tant qu'il en reste encore.

En outre, même si toute la forêt tropicale était exploitée de façon durable, elle resterait menacée. L'expansion des terres agricoles, le développement des routes et la colonisation sont, chacun, un danger considérable pour les forêts tropicales. La réduction des destructions associées serait plus efficace que la réorganisation de la production de bois.

Aucune solution miracle ne garantira la survie des forêts tropicales. Même nos propositions, notamment la création de réserves, seront inapplicables si, les ressources se raréfiant ou la demande augmentant, les forestiers exploitent les zones aujourd'hui non rentables. Cette proposition est toutefois applicable aujourd'hui, et elle aurait des conséquences immédiates en protégeant les forêts âgées. En outre, elle repose sur de simples restrictions des zones exploitées, faciles à contrôler et peu coûteuses, et non sur des règles techniques complexes d'exploitation.

Richard RICE est directeur à Conservation Internationale, à Washington. Raymond GULLISON est professeur au Collège impérial de Londres. John REID travaille à Conservation Internationale.

C.W. CLARK, *The Economics of Overexploitation*, in *Science*, vol. 181, n° 4100, pp. 630-634, 17 août 1973.

Jeffrey R. VINCENT, *The Tropical Timber Trade and Sustainable Development*, in *Science*, vol. 256, pp. 1651-1655, 19 juin 1992.

R.E. GULLISON, S.N. PANFIL, J.J. STROU-

SE et S.P. HUBBELL, *Ecology and Management of Mahogany (Swietenia macrophylla King) in the Chimanes Forest, Beni, Bolivia*, in *Botanical Journal of the Linnean Society*, vol. 122, n° 1, pp. 9-34, septembre 1996.

A.F. HOWARD, R.E. RICE et R.E. GULLISON, *Simulated Financial Returns and Selected Environmental Impacts from Four Alternative Silvicultural Prescriptions Applied in the Neotropics : A Case Study of the Chimanes Forest, Bolivia*, in *Forest Ecology and Management*, vol. 89, n°s 1-3, pp. 43-57, 1^{er} décembre 1996.

Le soi, le non-soi et les virus

ROLF M. ZINKERNAGEL

Parfois, les traités de non-agression scellés entre le système immunitaire et l'organisme qui l'abrite sont rompus : des maladies auto-immunes apparaissent. Le rôle de certains virus dans ces errements du système immunitaire se précise, ouvrant la voie à de nouveaux traitements.

La description homérique des péripéties guerrières des Grecs met en scène de multiples acteurs, soldats, politiques, dirigeants, divinités bénéfiques ou maléfiques, et de nombreux stratagèmes militaires, dont le cheval de Troie est le plus célèbre. Les combats que mène notre organisme par l'intermédiaire du système immunitaire, les projets et les ruses des acteurs de ces batailles, sont apparentés à cette riche mythologie.

Le système immunitaire défend l'organisme contre les micro-organismes étrangers pathogènes : virus ou bactéries, notamment. Chacune de ces entités porte à sa surface des molécules spécifiques, les antigènes. Le système immunitaire distingue les cellules de l'organisme des cellules étrangères d'après ces antigènes. Quand le système immunitaire réagit contre les molécules de l'organisme, les molécules du soi, il détruit les organes qui les portent, déclenchant une maladie auto-immune.

Pour éviter ce type de réactions, rares mais parfois funestes, le système immunitaire doit être spécifique, il doit garder le souvenir des agents pathogènes rencontrés et il doit tolérer les molécules du soi. Spécificité, mémoire et tolérance du système immunitaire sont aujourd'hui redéfinies grâce aux progrès notables de la biochimie, de la biologie moléculaire, de la biologie du développement et de la physiologie animale.

Afin d'assurer leur propre survie, les virus évitent de tuer trop vite leur hôte. Ainsi, la paix armée qui règne entre le système immunitaire de l'homme et les virus garantit à la fois la survie de l'hôte, mais aussi celle des micro-organismes pathogènes. Pour comprendre comment s'établit ce *modus vivendi*, nous examinerons les mécanismes de défense d'un organisme au cours d'une infection virale, nous évoquerons les acteurs de cette défense et nous aborderons les nouvelles hypothèses qui éclairent les mécanismes de l'auto-immunité.

Nous montrerons qu'il est inutile de considérer que les molécules du soi et celles du non-soi portent des «étiquettes» qui permettent au système immunitaire de les identifier. Nous pensons que le système immunitaire reconnaît seulement les molécules qui lui sont présentées dans des organes spécifiques, les organes lymphoïdes (la moelle osseuse, la rate et les ganglions lymphatiques), en quantité suffisante et pendant cinq à dix jours. Ces conditions sont remplies par les molécules étrangères, par exemple celles que portent les virus, mais ne le sont généralement pas par les molécules du soi (nous y reviendrons). Malheureusement, quand les molécules du soi satisfont les mêmes conditions que les molécules du non-soi, une maladie auto-immune s'installe.

Les acteurs du système immunitaire

Les lymphocytes *B* et *T*, les macrophages et les cellules présentant les antigènes sont parmi les principaux agents du système immunitaire. Les lymphocytes *B* sont responsables de l'immunité dite humorale. Chaque lymphocyte *B* reconnaît un antigène porté par les micro-organismes pathogènes grâce à un récepteur, spécifique de cet antigène. Les lymphocytes activés fabriquent alors des anticorps spécifiques de cet antigène. Les anticorps libérés recrutent d'autres fantassins de l'armée de défense et musellent les antigènes circulants en s'y liant.

L'efficacité de l'immunité protectrice dépend beaucoup de l'affinité d'un anticorps pour son antigène (c'est-à-dire de la force de leur liaison lorsque l'antigène et l'anticorps ont un seul site d'interaction). Elle dépend aussi de leur avidité : lorsqu'un antigène a plusieurs sites d'interaction avec son anticorps, l'énergie de la liaison combinée est notablement supérieure à la somme des énergies de liaison des sites pris séparément, et l'avidité est d'autant plus forte que l'énergie de la liaison combinée est élevée.

D'autres lymphocytes, les lymphocytes *T*, assurent l'immunité dite cellulaire. Parmi eux, les lymphocytes *T* auxiliaires qui interagissent avec les lymphocytes *B*, les aidant à se multiplier et à produire des anticorps, et les lymphocytes *T* cytotoxiques qui détruisent les cellules de l'hôte infectées par le micro-organisme pathogène. Les cellules naturelles tueuses et les macrophages assurent des fonctions comparables, mais complémentaires.

Rolf M. ZINKERNAGEL dirige l'Institut d'immunologie expérimentale, à l'Hôpital universitaire de Zurich. En 1996, il a obtenu, avec Peter Doherty, le prix Nobel de physiologie et de médecine, pour leurs travaux sur la restriction des réactions immunitaires par les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité. Le texte a été mis en forme par Françoise Cinotti.

Enfin, les lymphocytes, les macrophages et d'autres cellules auxiliaires (les polynucléaires basophiles, les mastocytes, les plaquettes, etc.) libèrent des molécules, nommées les médiateurs solubles de l'immunité. Ces médiateurs attirent les cellules de défense sur le lieu de l'infection, augmentent l'irrigation du site et détruisent les bactéries ; ce sont aussi les cytokines (les lymphokines, les interférons, les interleukines ou d'autres facteurs, tel le facteur nécrosant des tumeurs) qui ont plusieurs fonctions, notamment celle d'activer la prolifération des cellules immunitaires.

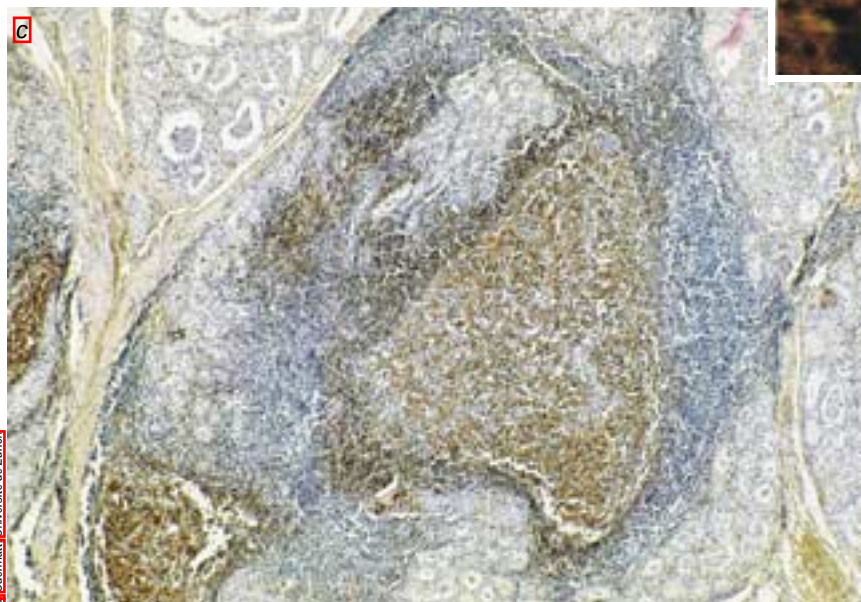
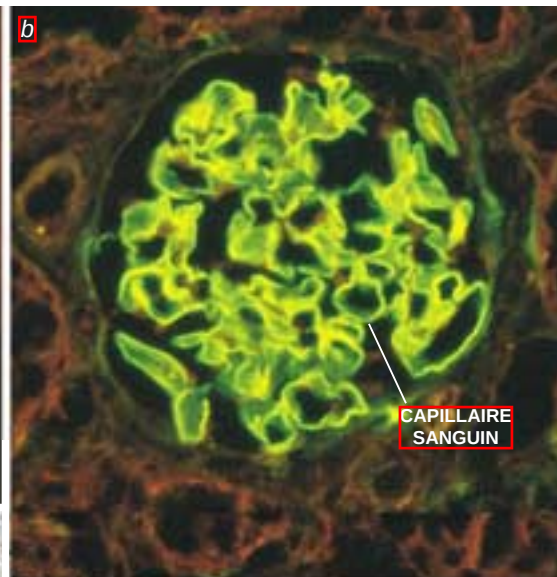
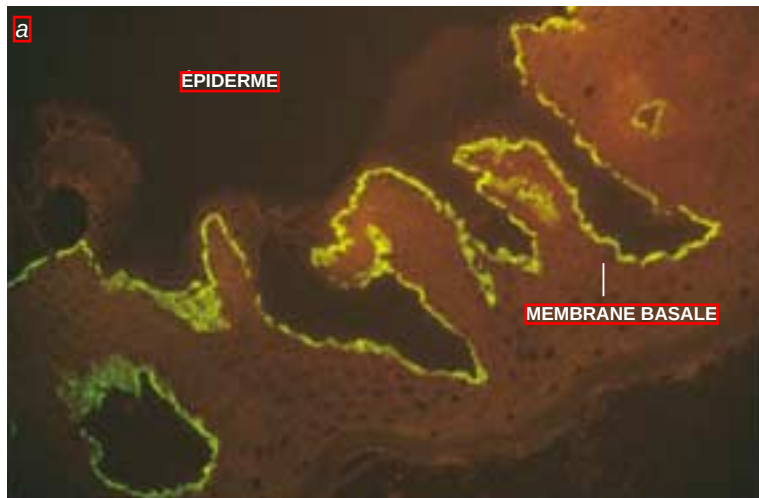
Les lymphocytes *T* cytotoxiques sont très agressifs ; ils libèrent des interleukines, qui engendrent des lésions cellulaires directes ou indirectes, et de la perforine, une molécule qui perce des trous dans les membranes cellulaires. Nous reviendrons sur ces lésions tissulaires qui engendrent des maladies dites immunopathologiques.

Les lymphocytes *T* reconnaissent les peptides antigéniques (des fragments d'antigènes) seulement quand ils sont exposés à la surface de cellules présentatrices d'antigènes par les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité. Les peptides provenant de l'intérieur des cellules (y compris les fragments d'antigènes des virus qui infectent les cellules) sont présentés par les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité dites de classe I. Ils sont reconnus spécifiquement par les lymphocytes $TC D_8^+$ cytotoxiques, qui détruisent les cellules lorsqu'elles sont infectées.

Les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II présentent des peptides dérivés de protéines englouties (on dit aussi phagocytées) par les cellules. Ces peptides, ainsi présentés, sont reconnus par d'autres soldats de l'armée de défense : les lymphocytes $TC D_4^+$ auxi-

liaires. Ainsi, les lymphocytes *T*, éléments essentiels de la surveillance de l'intégrité cellulaire, reconnaissent uniquement les peptides associés aux molécules du complexe majeur d'histocompatibilité.

Chaque lymphocyte *T* ou *B* reconnaît un seul antigène ou un peptide antigénique correctement présenté, qui lui est spécifique ; dans son ensemble, le système immunitaire reconnaît des milliards d'antigènes. Lorsqu'un antigène est reconnu par les quelques cellules qui lui sont spécifiques, il déclenche leur prolifération : en quelques jours, des « clones » de lymphocytes *T* ou *B* spécifiques sont produits. Au cours de son existence, l'organisme synthétise un vaste répertoire d'anticorps qui suffit généralement à vaincre la diversité des agents infectieux rencontrés. Dans près de 90 pour cent des cas, le système immunitaire gagne.



1. LES AUTOANTICORPS, responsables de maladies auto-immunes, sont visualisés avec différents colorants. Certains déclenchent des maladies de peau, telle l'épidermolyse bulleuse acquise (a), caractérisée par des éruptions de bulles remplies de liquide et dont la cicatrisation est parfois difficile. Ces autoanticorps, visualisés ici par un colorant fluorescent, sont dirigés contre le collagène. Sur la photographie b, les autoanticorps sont aussi dirigés contre le collagène : ils sont localisés le long de la membrane des capillaires qui sillonnent le glomérule rénal, lequel assure la purification du sang. Ils déclenchent un syndrome de Goodpasture, qui se manifeste notamment par une insuffisance rénale fatale. Sur la photographie c, les autoanticorps déclenchant une thyroïdite d'Hashimoto (une destruction auto-immune de la glande thyroïde) ont été colorés en marron. Les autoanticorps sont présents à la surface des lymphocytes B qui réagissent contre le soi, et dont on constate l'abondance dans le follicule (le « sac ») central.

L'acquisition de la tolérance

Toutefois, toutes les cellules de l'hôte ont, à leur surface, de très nombreux peptides antigéniques. Comment l'organisme distingue-t-il ses propres antigènes, qu'il tolère, des antigènes des agents infectieux, qu'il combat ?

La tolérance des lymphocytes *T* envers les autoantigènes (les molécules du soi) résulte d'abord d'un mécanisme de sélection négative qui a lieu dans le thymus, l'organe où se différencient les lymphocytes. Les thymocytes, les précurseurs des lymphocytes *T*, qui reconnaissent les autoantigènes exprimés en quantité suffisante dans le thymus, sont éliminés pendant leur différenciation. Ainsi, seuls les lymphocytes *T* qui ignorent les autoantigènes présentés dans le thymus quittent cet organe. Toutefois, la tolérance aux molécules du soi n'est pas sans faille, même après cette sélection négative, car tous les autoantigènes ne passent pas par le thymus.

Pour se protéger contre les autoantigènes qui ne sont pas présentés dans le thymus, l'organisme dispose d'autres mécanismes de sécurité. Les autoantigènes ne sont détectés par les lymphocytes *T* que s'ils sont en quantité suffisante ; certains ne sont pas reconnus, parce qu'ils ne sont pas présentés par des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité ; les autoantigènes sont ignorés par le système immunitaire tant qu'ils restent localisés hors des organes lymphoïdes ; enfin, certains autoantigènes sont à l'abri dans des sites immunologiquement privilégiés, par exemple le cerveau, les testicules, les ovaires ou la chambre antérieure de l'œil.

L'anergie est un autre rempart qui renforce cette mutuelle ignorance des autoantigènes isolés dans la périphérie et des lymphocytes *T* qui leur sont spécifiques. Selon ce concept, deux signaux sont nécessaires pour que les lymphocytes *T* soient activés : le signal antigène et un autre signal, par exemple un signal cytokine ou d'autres molécules dites accessoires. Seuls les antigènes associés à un second signal et exposés correctement par les cellules présentatrices d'antigènes activent leurs lymphocytes *T* spécifiques ; sinon, les lymphocytes restent silencieux, ou anergiques.

Les sanctuaires immunologiques isolent les autoantigènes, mais aussi les antigènes viraux quand ils parviennent à s'y introduire. Donnons deux exemples : une infection par le virus de la rage, qui infecte les axones des neurones (cette maladie est rare, mais généralement mortelle) et une infection par un papillomavirus, qui infecte les cellules de la peau nommées kératinocytes (il s'agit d'une infection fréquente, mais bénigne). Au début de ces infections, les lymphocytes *T* ne réagissent pas, car les virus sont isolés dans des sites protégés.

Même si les cellules infectées portent des antigènes viraux, ces derniers, confinés dans les organes immunologiquement privilégiés, n'activent pas le système immunitaire. En revanche, quand les neurones ou les kératinocytes infectés meurent, ils libèrent les antigènes viraux, puis sont digérés par des macrophages ; pris en charge par les cellules présentatrices d'antigènes circulantes, les antigènes sont exposés au système immunitaire, qui active les lymphocytes *T* spécifiques. Les

neurones et les kératinocytes sont attaqués et détruits par les lymphocytes *T* activés.

Ou bien le système immunitaire élimine le virus après un épisode d'infection aiguë, ou le virus échappe au système immunitaire, et une infection chronique s'établit : des cellules infectées survivent, libérant épisodiquement des particules virales. Il se peut aussi que les deux scénarios alternent au cours d'épisodes d'infection aiguë et d'infection chronique.

Infection aiguë, infection chronique

Les virus cytopathogènes détruisent les cellules qu'ils infectent ; quand les réactions immunitaires sont efficaces, la destruction tissulaire est limitée, et les réactions immunitaires cessent dès que les antigènes viraux ne sont plus produits. L'infection est jugulée et le tissu atteint est peu endommagé. Des autoantigènes, ignorés jusqu'alors par les lymphocytes *T*, sont libérés par les cellules détruites, mais la libération est de courte durée et les quantités sont insuffisantes

a

SOURIS TRANSGENIQUE EXPRIMANT LA GLYCOPROTÉINE DU VIRUS DE LA CHORIOMÉNINGITE LYMPHOCYTAIRE



ÎLOT DE LANGERHANS



2. UNE SOURIS TRANSGENIQUE (a) a reçu un gène étranger codant une protéine virale (le gène codant la glycoprotéine du virus de la chorioméningite lymphocytaire). La souris synthétise cette protéine comme une protéine du soi. La protéine est notamment exprimée comme un autoantigène par les cellules bêta des îlots de Langerhans, contenus dans le pancréas. Les cellules bêta des îlots de Langerhans assurent normalement la production d'insuline, qui maintient constante la concentration sanguine en sucre ; lorsqu'elles sont détruites, un diabète s'installe. Chez la souris transgénique saine, le système immunitaire ignore la protéine virale (b). L'animal n'est pas malade. Toutefois, la glycoprotéine n'étant pas présentée dans le thymus au cours du développement de la souris, des lymphocytes *T* et *B* susceptibles de réagir contre la glycoprotéine existent chez l'animal (les lymphocytes potentiellement autoréactifs sont normalement détruits dans le thymus au cours du développement). Quand on injecte le virus de la chorioméningite lymphocytaire, les macrophages absorbent les virus et exposent à leur surface des fragments d'antigènes viraux, notamment la glycoprotéine. Les lymphocytes *T* cytotoxiques susceptibles de réagir contre la glycoprotéine virale sont activés, car l'antigène leur est présenté en grande quantité et pendant plusieurs jours. À la suite de cette reconnaissance, les lymphocytes *B* spécifiques de la glycoprotéine sont à leur tour activés, et ils fabriquent des anticorps dirigés contre la glycoprotéine (c). Comme les cellules bêta des îlots de Langerhans portent aussi la glycoprotéine, le système immunitaire considère qu'il s'agit de cellules infectées par le virus et il les détruit ; l'animal devient diabétique (d).

pour activer les lymphocytes *B* et *T* potentiellement autoréactifs.

Dans le cas des virus non cytopathogènes, des lymphocytes *T* CD_8^+ cytotoxiques détruisent les cellules infectées avant qu'elles ne libèrent de nouvelles particules virales. Quand cette destruction se prolonge, elle risque de déclencher des mécanismes immunopathologiques ou des mécanismes auto-immuns. Lorsque les lymphocytes détruisent les cellules infectées plus rapidement que le virus ne se multiplie, ce dernier finit par être éliminé. Au contraire, quand le virus se multiplie trop vite, il persiste, et l'infection devient chronique. La libération prolongée d'antigènes viraux active des lymphocytes *T* auxiliaires et les lymphocytes *B* qui synthétisent des anticorps antiviraux. Les lymphocytes *T* auxiliaires produisent des substances qui endommagent les cellules infectées, voire les cellules saines. Une maladie immunopathologique s'installe : les tissus sont lésés par les substances libérées par le système immunitaire lui-même.

Au cours d'une infection chronique, des mécanismes auto-immuns peuvent être déclenchés en plus des mécanismes immunopathologiques. Des quantités notables d'antigènes du soi sont libérées ; si ces autoantigènes atteignent les tissus lymphoïdes, y résident suffisamment longtemps et sont correctement présentés, ils risquent d'activer les lymphocytes spécifiques qui les ignoraient auparavant. Des

lymphocytes *T* et *B* autoréactifs sont activés et déclenchent alors la production d'autoanticorps et la multiplication des lymphocytes *T* autoréactifs qui entretiennent le mécanisme auto-immun.

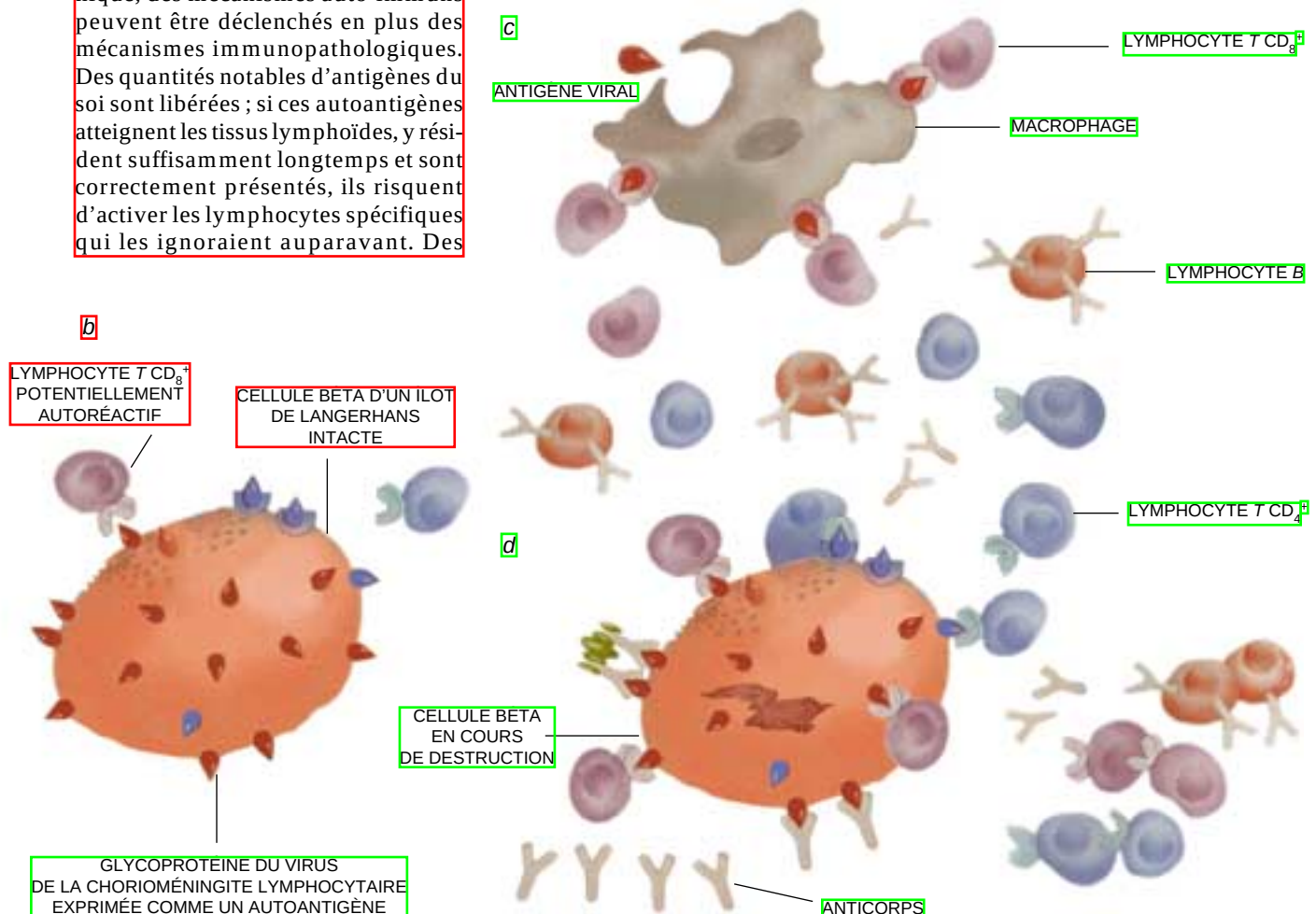
Chaque fois que l'on ignore le virus responsable des mécanismes immunopathologiques, on considère que la maladie est auto-immune. Nous sommes persuadés que certaines maladies qualifiées d'auto-immunes sont, en fait, directement causées par des réactions immunitaires contre un agent infectieux inconnu.

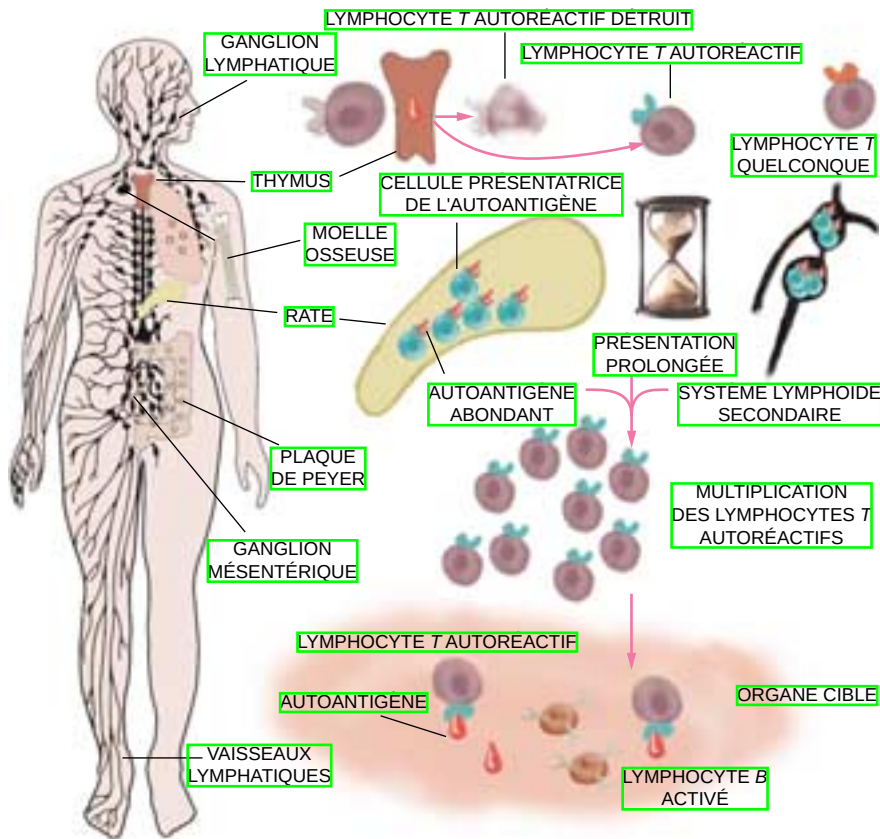
Dans les années 1970, des immunologistes ont émis l'hypothèse que des antigènes viraux ressemblent tellement à certains autoantigènes que le système immunitaire déclenche la production d'autoanticorps : par ce mécanisme de mimétisme moléculaire, les lymphocytes activés contre le virus se tromperaient et prendraient l'autoantigène pour un antigène étranger, l'attaqueraient et finiraient par détruire les cellules de l'organisme présentant l'autoantigène. Toutefois, cette hypothèse n'a pas encore été validée.

Nous allons développer quelques expériences qui étayent nos hypothèses sur la reconnaissance des autoantigènes par les lymphocytes *T* autoréactifs et sur la production des autoanticorps par les lymphocytes *B* autoréactifs.

Lymphocytes *T* autoréactifs

L'expérience suivante illustre le rôle du transport des antigènes vers les tissus lymphoïdes dans l'activation des lymphocytes. Nous avons utilisé une souris transgénique qui a le gène de la glycoprotéine (une protéine de l'enveloppe) du virus de la chorioméningite lymphocytaire ; elle fabrique cette molécule comme un autoantigène porté par les cellules bêta des îlots pancréatiques de Langerhans. La glycoprotéine n'est pas présentée dans le thymus, de sorte que ces souris ont des lymphocytes *T* cytotoxiques spécifiques de cette glycoprotéine. Ces souris ne deviennent jamais diabétiques, ce qui prouve que ces lymphocytes ne sont pas activés et qu'ils ne détruisent pas les cellules bêta des îlots de Langerhans : les autoantigènes sont ignorés.





3. LES AUTOANTIGÈNES ne sont généralement pas reconnus, parce qu'ils ne satisfont pas les conditions nécessaires à l'activation des lymphocytes autoréactifs. Normalement, les autoantigènes sont présentés dans le thymus, et les lymphocytes T activés par ces autoantigènes sont détruits. Ne quittent le thymus que les lymphocytes qui ignorent les autoantigènes. Toutefois, comme tous les autoantigènes ne sont pas présentés dans le thymus, des lymphocytes T potentiellement autoréactifs circulent dans l'organisme. Tout se passe bien, sauf si un autoantigène est présenté dans la rate ou dans tout autre tissu lymphoïde (on a représenté à gauche les principaux tissus et organes lymphoïdes). Si ces autoantigènes sont abondants et qu'ils viennent à être présentés pendant plusieurs jours dans les tissus lymphoïdes, les lymphocytes T spécifiques sont activés. Attirés par l'organe cible qui présente cet autoantigène, les lymphocytes T autoréactifs déclenchent les mécanismes d'autodestruction : une maladie auto-immune s'installe. Parfois, des cellules du tissu lymphoïde colonisent un organe cible, et les conditions de déclenchement d'une maladie auto-immune sont alors réunies, *in situ*.

Au contraire, quand on injecte à ces souris le virus de la chorioméningite lymphocytaire, les lymphocytes T cytotoxiques spécifiques de la glycoprotéine sont activés. Ils migrent vers les cellules bêta des îlots de Langerhans, qui expriment la glycoprotéine et les détruisent. Les cellules pancréatiques sont détruites en moins de deux semaines chez les souris transgéniques.

Cette expérience montre que des lymphocytes T potentiellement autoréactifs peuvent exister dans l'organisme sans créer aucun dommage, à condition que les autoantigènes n'atteignent pas les tissus lymphoïdes en quantité suffisante et que, s'ils y parviennent, ils n'y restent pas assez longtemps pour activer les lymphocytes autoréactifs.

L'expérience indique aussi que la quantité des autoantigènes libérés est une donnée fondamentale. Ainsi,

quand on administre la glycoprotéine purifiée seule, on ne déclenche pas de diabète auto-immun ; les souris ont seulement une insulite, une inflammation des cellules bêta des îlots de Langerhans qui ne sont pas détruites. La glycoprotéine déclenche une réaction immunitaire notablement moins efficace (entre 100 et 1 000 fois) que le virus entier qui se réplique, libérant de grandes quantités d'antigènes. Lorsqu'on injecte la protéine seule, les quantités d'antigènes sont insuffisantes pour déclencher un diabète. Pour que les lymphocytes T cytotoxiques autoréactifs soient activés, il faut qu'ils rencontrent de grandes quantités d'autoantigène (ici la glycoprotéine).

Dans ce modèle, seul le virus qui se répand dans tout l'organisme active suffisamment de lymphocytes T cytotoxiques pour que certains déclenchent

une maladie auto-immune contre les cellules bêta. Généralement, la quantité d'autoantigènes présentés dans les tissus lymphoïdes reste inférieure à la quantité minimale activant les lymphocytes T potentiellement autoréactifs. En principe, ce seuil d'activation représente une garantie suffisante contre les maladies auto-immunes dues aux lymphocytes T cytotoxiques.

Nous avons indiqué que, pour qu'une maladie auto-immune se déclenche, il faut que l'autoantigène soit correctement présenté dans un tissu lymphoïde, en grande quantité et pendant plusieurs jours. L'étude de la thyroïdite d'Hashimoto (une destruction auto-immune de la glande thyroïde) montre qu'un mécanisme peut faciliter la première de ces conditions : l'antigène ne migre pas vers les tissus lymphoïdes, mais, à la suite d'une réaction inflammatoire déclenchée contre un autoantigène ignoré, ce sont des cellules issues d'un tissu lymphoïde qui migrent vers l'organe cible (la thyroïde dans le cas de la thyroïdite d'Hashimoto). Le tissu lymphoïde qui s'organise dans l'organe cible est fonctionnel, de sorte que les conditions (abondance et présentation prolongée) sont réunies pour qu'une réaction auto-immune contre un autoantigène ignoré auparavant se déclenche.

Le même traitement pour tous les antigènes

Ces expériences nous ont conduits à proposer que le système immunitaire réagit contre tout antigène – du soi ou du non-soi – selon les mêmes règles : un antigène présent dans le thymus et dans les tissus lymphoïdes entraîne l'élimination des lymphocytes T qui lui sont spécifiques ; les cellules qui participent aux réactions immunitaires ne sont activées que dans les organes lymphoïdes organisés, la rate ou les ganglions lymphatiques ; les antigènes qui restent toujours en dehors des organes lymphoïdes sont ignorés par le système immunitaire ; quand un antigène atteint un tissu lymphoïde véhiculé par le sang ou par des cellules présentatrices d'antigènes mobiles, il active les lymphocytes T spécifiques, à condition d'être en concentration suffisante et d'y rester plusieurs jours.

Enfin, nous allons voir que les lymphocytes B déclenchent aussi des réactions auto-immunes quand l'antigène a une structure organisée.

Généralement, l'activation des lymphocytes *B* nécessite deux signaux : le premier correspond à la fixation de l'antigène sur son récepteur spécifique, et le second est fourni par les lymphocytes *T* auxiliaires. Toutefois, nous avons montré que les lymphocytes *B* peuvent être activés et produire des anticorps, même en l'absence de lymphocytes *T* auxiliaires, à condition que les antigènes qui les activent soient organisés sous forme d'un polymère, c'est-à-dire qu'ils présentent une structure répétitive. Inversement, quand les antigènes sont solubles, c'est-à-dire désorganisés, l'interaction avec les lymphocytes *B* est faible : les antigènes solubles n'activent pas les lymphocytes *B* autoréactifs (ils sont simplement ignorés).

Lymphocytes *B* et production d'autoanticorps

Nous avons récemment établi que la réaction médiée par les lymphocytes *B* est d'autant plus efficace que l'antigène déclenchant a une structure organisée. Nous avons utilisé des souris transgéniques, dont les cellules expriment la protéine VSV-G de l'enveloppe du virus de la stomatite vésiculaire. Cette protéine est la seule que porte l'enveloppe. Elle est dense et très ordonnée, l'espace qui sépare deux protéines étant toujours le même (de l'ordre de huit à dix nanomètres). La protéine VSV-G existe sous trois formes : une forme très organisée, présente sur l'enveloppe virale ; une forme peu organisée en micelles (ou agrégats), où les molécules ont un arrangement aléatoire et instable ; enfin, une forme totalement désorganisée, présente dans le sang (les antigènes du soi sont sous cette forme : chaque molécule, ou monomère, est isolée des autres).

L'organisation de ces différentes formes coïncide avec leur efficacité à déclencher la production d'anticorps, c'est-à-dire à activer les lymphocytes *B*. Ainsi, la forme la plus organisée active les lymphocytes *B* en l'absence de lymphocytes *T* auxiliaires ; la production d'anticorps est massive. La forme peu organisée requiert la présence de quelques lymphocytes *T* auxiliaires (dirigés contre les impuretés généralement présentes dans les micelles) et de cellules présentatrices d'antigènes pour activer les lymphocytes *B*. Enfin, la forme désorganisée, soluble, n'ac-

tive pas les lymphocytes *B* : pour qu'ils soient activés, il faudrait qu'ils soient en contact avec des lymphocytes *T* spécifiques de la protéine VSV-G, lesquels sont tolérants chez la souris transgénique. Dans ce modèle, le degré d'organisation des antigènes conditionne la puissance et l'efficacité de la réaction des lymphocytes *B*.

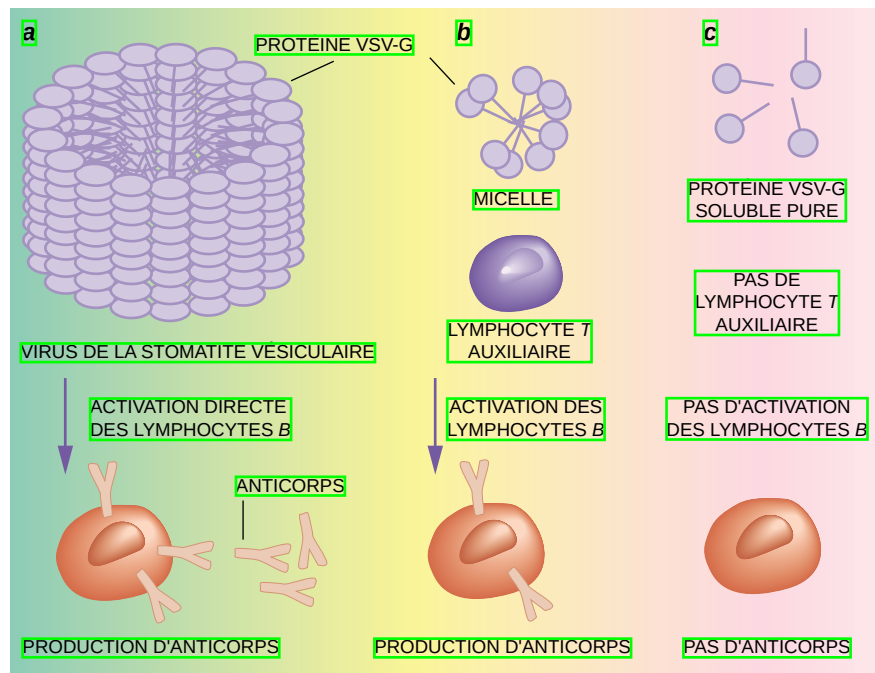
Chez l'homme (chez les mammifères en général), il n'existe pas (ou quasiment pas) d'autoantigènes très organisés accessibles aux lymphocytes *B* ; les protéines membranaires des cellules de mammifères n'ont pas une conformation rigide aussi organisée que celle de la protéine d'enveloppe du virus de la stomatite vésiculaire. Ainsi, les lymphocytes *B* différencieraient les antigènes du non-soi et ceux du soi d'après leur structure répétitive ou désordonnée.

On a montré que tous les virus déclenchant une production d'anticorps rapide et efficace présentent des

antigènes de surface très organisés et que, inversement, tous ceux qui n'activent pas les lymphocytes *B* ne présentent pas une telle organisation (la présence d'une structure organisée n'est toutefois pas toujours suffisante pour activer les lymphocytes *B*, notamment si la distance d'une dizaine de nanomètres entre les déterminants n'est pas respectée).

D'un point de vue évolutif, on peut penser qu'en se répliquant très vite, c'est-à-dire en accumulant des mutations, ce qui modifie leurs protéines d'enveloppe, certains virus échappent à cette reconnaissance des structures organisées, évitant la production d'anticorps antiviraux. Toutefois, pour survivre, les virus ne doivent pas tuer tous leurs hôtes : les virus cytopathogènes doivent déclencher une production efficace d'anticorps pour préserver certains de leurs hôtes.

Cette contrainte est moins impérative pour les virus non cytopathogènes



4. L'ASPECT D'UN ANTIGÈNE conditionne l'activation ou le silence des lymphocytes *B* autoréactifs chez des souris transgéniques qui expriment la protéine vsv-g comme un autoantigène. Le virus de la stomatite vésiculaire porte une protéine de surface, nommée vsv-g, régulièrement arrangée. Quand on injecte le virus de la stomatite vésiculaire à ces souris, la protéine vsv-g active directement les lymphocytes *B*, qui produisent des anticorps contre cette protéine (a). Quand on injecte aux souris la protéine sous forme de micelles, c'est-à-dire peu organisée, il faut que des lymphocytes *T* auxiliaires soient eux-mêmes activés pour que les lymphocytes *B* produisent des anticorps (b). Comme la protéine vsv-g est un autoantigène, les lymphocytes spécifiques de cette protéine sont éliminés. Les lymphocytes auxiliaires nécessaires à l'activation des lymphocytes *B* sont ici dirigés contre les impuretés présentes dans les micelles. Enfin, on peut aussi injecter la protéine totalement désordonnée, soluble dans le sang. Pour que les lymphocytes *B* produisent des anticorps, il faudrait qu'ils soient directement en contact avec des lymphocytes *T* auxiliaires spécifiques de la protéine vsv-g. Comme ces lymphocytes ont été éliminés dans le thymus au cours du développement, il n'y a pas de production d'anticorps (c). Chez l'homme, les autoantigènes accessibles aux lymphocytes *B* sont généralement solubles, de sorte que, normalement, les lymphocytes *B* ne produisent pas d'autoanticorps.

qui ne tuent pas l'hôte. On en déduit que les virus activant les lymphocytes *B* sont vraisemblablement cytopathogènes. Les virus non cytopathogènes, qui ne déclenchent pas la production d'anticorps, seraient maîtrisés par des lymphocytes *T* cytotoxiques, juste après l'infection.

La plupart des antigènes du soi sont sous forme de monomères solubles dans le sang, c'est-à-dire qu'ils ne présentent pas de structure organisée aux lymphocytes *B* et qu'ils ne déclenchent pas la production d'autoanticorps. Pourtant, le récepteur de l'acétylcholine, un neuromédiateur, et l'ADN ont des structures organisées. Des lymphocytes *B* potentiellement autoréactifs existent dans l'organisme, mais, normalement, ils ne sont pas activés parce qu'ils n'ont pas accès à ces structures du soi. Toutefois, quand ces lymphocytes sont malgré tout activés, ils fabriquent des anticorps soit contre le récepteur de l'acétylcholine, déclenchant une myasthénie, soit contre l'ADN double brin, déclenchant un lupus érythémateux systémique.

Quelles stratégies thérapeutiques ou préventives peut-on envisager? Peut-on espérer prévenir l'apparition des maladies auto-immunes? Les

données acquises nous font penser que certaines maladies auto-immunes sont déclenchées par un virus, identifié ou non. Les virus responsables d'infections chroniques, tels le virus d'Epstein-Barr (EBV), le cytomégalo-virus (CMV), le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) et le virus de Coxsackie, sont souvent incriminés. Toutefois, la mise en évidence est généralement indirecte : le nombre des patients infectés par ces virus dépasse notablement celui des personnes qui ont effectivement des maladies auto-immunes, et comme une maladie auto-immune ne se déclenche que plusieurs années après l'infection virale, les épidémiologistes ont des difficultés à établir des relations de cause à effet.

Prévention de l'auto-immunité

Malgré ces difficultés, quand on réussit à identifier l'agent qui déclenche une maladie auto-immune, on peut prendre des mesures prophylactiques et thérapeutiques. Les maladies auto-immunes peuvent en partie être prévenues par la vaccination avec des antigènes viraux qui ne participent pas aux mécanismes auto-immuns. On

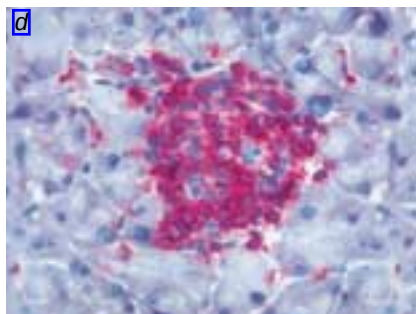
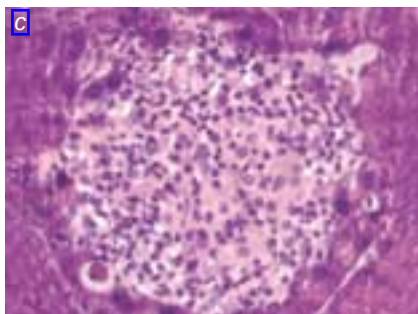
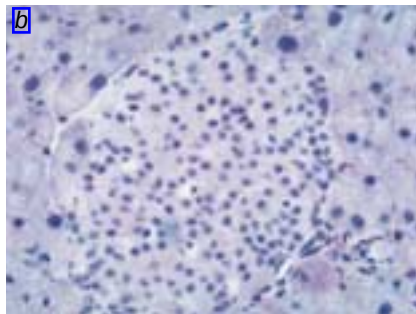
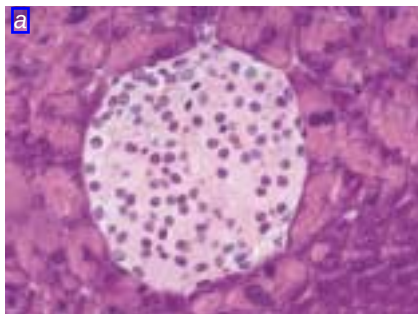
peut aussi tenter de rendre tolérants des lymphocytes *T* qui doivent ignorer les autoantigènes périphériques.

Nous avons testé ces différentes stratégies thérapeutiques de prévention sur des souris transgéniques exprimant la glycoprotéine du virus de la chorioméningite lymphocytaire. Nous les avons vaccinées avec un antigène du virus de la chorioméningite lymphocytaire (différent de la glycoprotéine), puis infectées avec le virus. Les lymphocytes *T* activés contre l'antigène vaccinant suffisent à éliminer le virus avant qu'une réaction auto-immune ne soit déclenchée et que les souris ne deviennent diabétiques (rappelez que les souris deviennent diabétiques quand elles sont infectées par le virus sans être vaccinées).

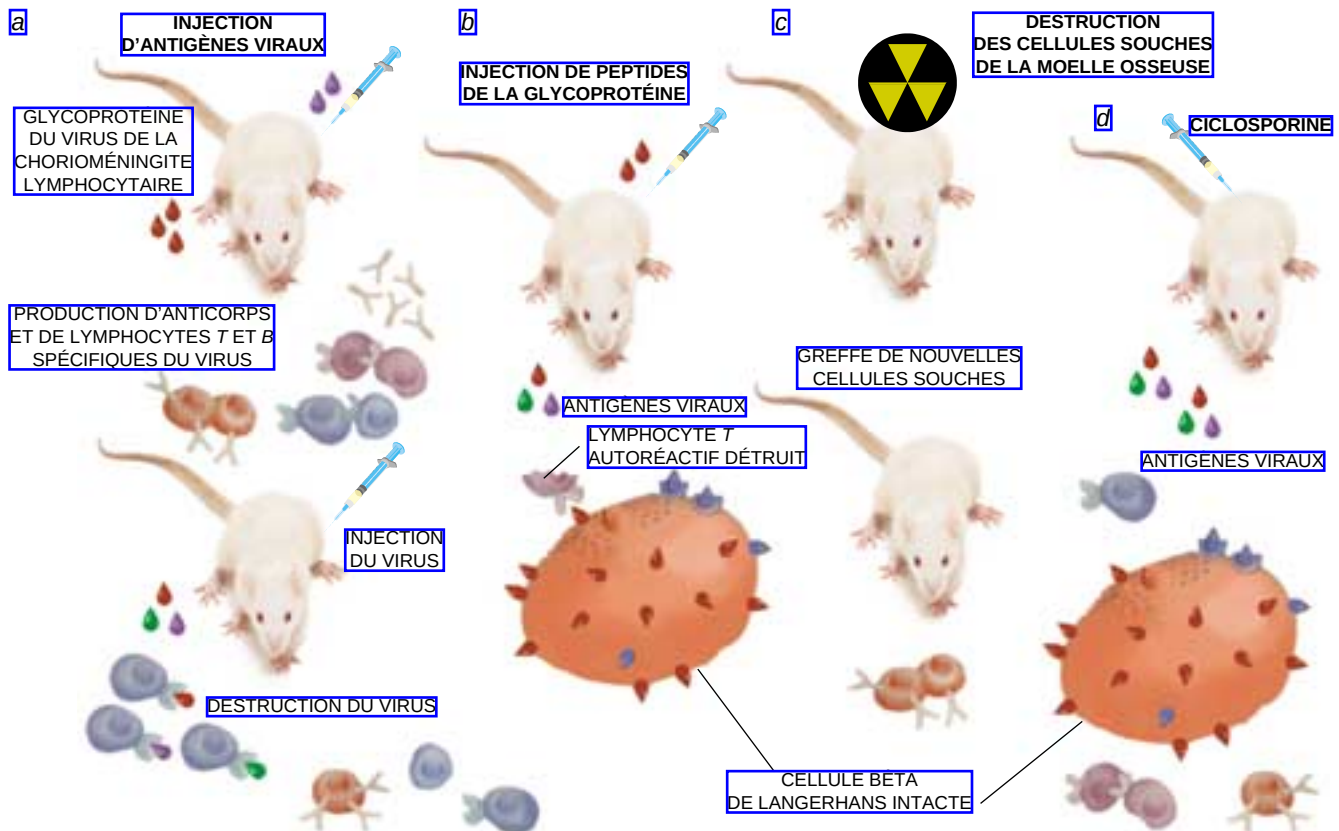
Nous avons aussi examiné si l'on pouvait rendre tolérants des lymphocytes *T* autoréactifs et, par là même, prévenir le diabète chez ces souris transgéniques. Nous leur avons administré trois fois un peptide issu de la glycoprotéine, le principal peptide reconnu par les lymphocytes *T* autoréactifs de cette souris. Le peptide est exposé en quantité suffisante dans les tissus lymphoïdes pour que les lymphocytes réagissant contre la glycoprotéine soient détruits. Même quand elles sont ensuite infectées par le virus, les souris ne deviennent pas diabétiques : elles ont quelques îlots de Langerhans infiltrés, mais les cellules bêta productrices d'insuline sont intactes. Les lymphocytes *T* cytotoxiques spécifiques de la glycoprotéine sont éliminés, de sorte que les cellules bêta des îlots de Langerhans sont préservés, malgré la présence du virus. Ce dernier est finalement détruit par des lymphocytes *T* cytotoxiques spécifiques des autres antigènes viraux.

En outre, nous avons irradié ces souris pour détruire les cellules souches de la moelle osseuse et la quasi-totalité des lymphocytes potentiellement autoréactifs. Ensuite, nous avons réintroduit de nouvelles cellules souches exprimant la glycoprotéine. La glycoprotéine est présentée comme un autoantigène dans le thymus, de sorte que les lymphocytes *T* cytotoxiques autoréactifs spécifiques de la glycoprotéine y sont détruits. Ces souris chimères ne deviennent jamais diabétiques quand on leur injecte le virus de la chorioméningite lymphocytaire, lequel est détruit.

Enfin, les souris transgéniques ne deviennent pas diabétiques quand on



5. L'ASPECT DES ÎLOTS DE LANGERHANS, chez une souris transgénique exprimant la glycoprotéine du virus de la chorioméningite lymphocytaire comme un autoantigène, change selon que la souris est infectée par le virus de la chorioméningite lymphocytaire ou qu'elle est saine. Lorsque la souris est saine, les îlots (a) sont sphériques et bien délimités (on voit ici un îlot, les taches sombres étant les noyaux des cellules bêta de cet îlot). Aucun lymphocyte *T* CD_8^+ n'est présent dans l'environnement (b). Au contraire, lorsque les souris sont infectées par le virus, les îlots sont déformés (c) et les lymphocytes *T* CD_8^+ affluent (d, en rouge). Les lymphocytes qui réagissent contre la glycoprotéine sont activés par le virus ; ils détruisent les îlots et déclenchent un diabète.



6. LE DÉCLENCHEMENT des maladies auto-immunes pourrait être évité de diverses façons. Avec la souris transgénique qui exprime la glycoprotéine du virus de la chorioméningite lymphocytaire, diverses méthodes ont été testées. L'injection d'antigènes de ce virus (différents de la glycoprotéine) déclenche la fabrication d'anticorps. Lorsqu'on injecte le virus à la souris vaccinée, le système immunitaire le détruit avant que la réaction auto-immune aboutissant au diabète ne se déclenche : les souris ne deviennent pas diabétiques (a). L'injection d'une grande quantité de peptides de la glycoprotéine peut aussi rendre tolérants les lymphocytes T cytotoxiques, ce qui évite le déclenchement des mécanismes immunopathologiques : les souris ne deviennent pas dia-

bétiques quand elles sont infectées par le virus (b). Une troisième stratégie consiste à irradier les souris pour éliminer les cellules souches et les lymphocytes T potentiellement autoréactifs, puis à greffer de nouvelles cellules souches qui expriment la glycoprotéine ; cette dernière est présentée dans le thymus, de sorte que les lymphocytes T spécifiques de la glycoprotéine sont éliminés. Les souris qui n'ont plus de lymphocytes susceptibles d'attaquer la glycoprotéine des cellules bêta ne deviennent pas diabétiques après injection du virus (c). Enfin, un traitement par un agent immunosuppresseur, telle la ciclosporine, inhibe le système immunitaire. Après injection du virus, la souris ne devient pas diabétique, mais le virus persiste (d).

leur injecte, en même temps que le virus de la chorioméningite lymphocytaire, un traitement immunosuppresseur : la ciclosporine. On obtient une immunosuppression générale qui prévient la destruction des cellules bêta des îlots de Langerhans ; en revanche, le virus persiste. L'inhibition des lymphocytes T autoréactifs spécifiques d'un antigène pourrait prévenir, voire guérir les maladies auto-immunes. Des expériences complémentaires ont été menées par d'autres équipes avec divers virus et un autre autoantigène du cerveau, la protéine basique de la myéline. Les résultats obtenus avec cet autoantigène ont confirmé nos conclusions tirées des expériences faites avec la glycoprotéine.

Certains virus participent aux phénomènes auto-immuns, mais, si les mécanismes se précisent, diverses questions restent ouvertes : quelles sont les maladies que l'on qualifie aujourd'hui de maladies auto-immunes et qui

sont en réalité des immunopathologies déclenchées par des agents pathogènes ? Comment différencier les réactions immunopathologiques et les réactions auto-immunes dues à des virus qui sont très banals ou qui n'ont pas encore été identifiés ? Comment identifier les virus qui engendrent les réactions autoagressives ? Quels sont les « seuils » – quantitatifs et qualitatifs – nécessaires à l'activation des lymphocytes T et B autoréactifs ?

Étant donné le nombre des autoantigènes exprimés dans les tissus périphériques, les maladies auto-immunes sont relativement rares : elles ne touchent que cinq à dix pour cent de la population et ne se déclenchent généralement qu'à un âge avancé. Les conditions que doivent remplir les antigènes du soi pour activer le système immunitaire sont donc très efficaces. Toutefois, les remparts de la protection

sont parfois franchis. Si l'on admet que des infections virales, bactériennes ou parasitaires sont à l'origine de beaucoup de maladies auto-immunes, la prévention par l'hygiène ou par la vaccination, ou le traitement par des antibiotiques, des agents antiviraux et des immunosuppresseurs pourraient inhiber les mécanismes auto-immuns.

R. ZINKERNAGEL, *Immunology Taught by Viruses*, in *Science*, vol. 271, pp. 173-178, 12 janvier 1996.

P. AICHELE, M. BACHMANN, H. HENGARTNER, R. ZINKERNAGEL, *Immunopathology or Organ-Specific Autoimmunity as a Consequence of Virus Infection*, in *Immunological Reviews*, n° 152, 1996.

M. BACHMANN, R. ZINKERNAGEL, *The Influence of Virus Structure on Antibody Response and Virus Serotype Formation*, in *Immunology Today*, vol. 17, n° 12, pp. 553-558, 1996.

Chimie combinatoire et nouveaux médicaments

MATTHEW PLUNKETT • JONATHAN ELLMAN

Grâce à cette nouvelle technique, on fabrique rapidement de nombreuses molécules de structures apparentées, accélérant ainsi la découverte de médicaments potentiels.

Pour combattre les maladies, le système immunitaire fabrique des protéines, les anticorps, qui neutralisent les micro-organismes envahisseurs, plus d'un milliard d'anticorps peuvent être synthétisés par des combinaisons variées des divers gènes qui codent les parties de ces anticorps. Pourtant le système immunitaire ne fabrique pas de nouveaux anticorps chaque fois qu'il est confronté à un nouvel agent pathogène. Il crible tous les anticorps disponibles, sélectionne les plus efficaces et les fabrique en grande quantité. Pour trouver de nouvelles molécules thérapeutiques, les chimistes ont décidé de suivre cet exemple : la chimie combinatoire qu'ils ont récemment mise au point synthétise de nombreux composés apparentés dont on évalue ensuite l'éventuel pouvoir thérapeutique.

La méthode diffère notablement de celle qu'utilisaient jusqu'à présent les laboratoires pharmaceutiques : la recherche systématique d'une activité biologique dans des composés de synthèse et dans toutes les substances d'origine naturelle, par exemple extraites de bactéries ou de plantes. Quand on identifie une substance intéressante, qui constitue alors une «tête de série», les chimistes modifient pas à pas la structure, vérifiant systématiquement comment évoluent les propriétés chimiques et biologiques de la molécule.

L'efficacité et la sécurité des composés ainsi obtenus sont

généralement correctes, mais, pour un médicament qui est mis sur le marché, des milliers d'autres sont élaborés, puis abandonnés. Cette méthode est longue et coûteuse : il faut plusieurs années de travail et des centaines de millions de francs pour passer d'une tête de série à un médicament commercialisé.

La méthode a été améliorée par la mise au point de tests rapides et fiables d'évaluation de l'efficacité et de la toxicité ; en outre, on sait mieux aujourd'hui

prévoir comment évoluera l'activité biologique d'une molécule en fonction des modifications imposées à sa structure. Toutefois, à mesure que la médecine progresse, la demande de médicaments s'accroît. Les biologistes demandent toujours plus de molécules à tester et des têtes de série qui nécessitent de moins en moins de modifications.

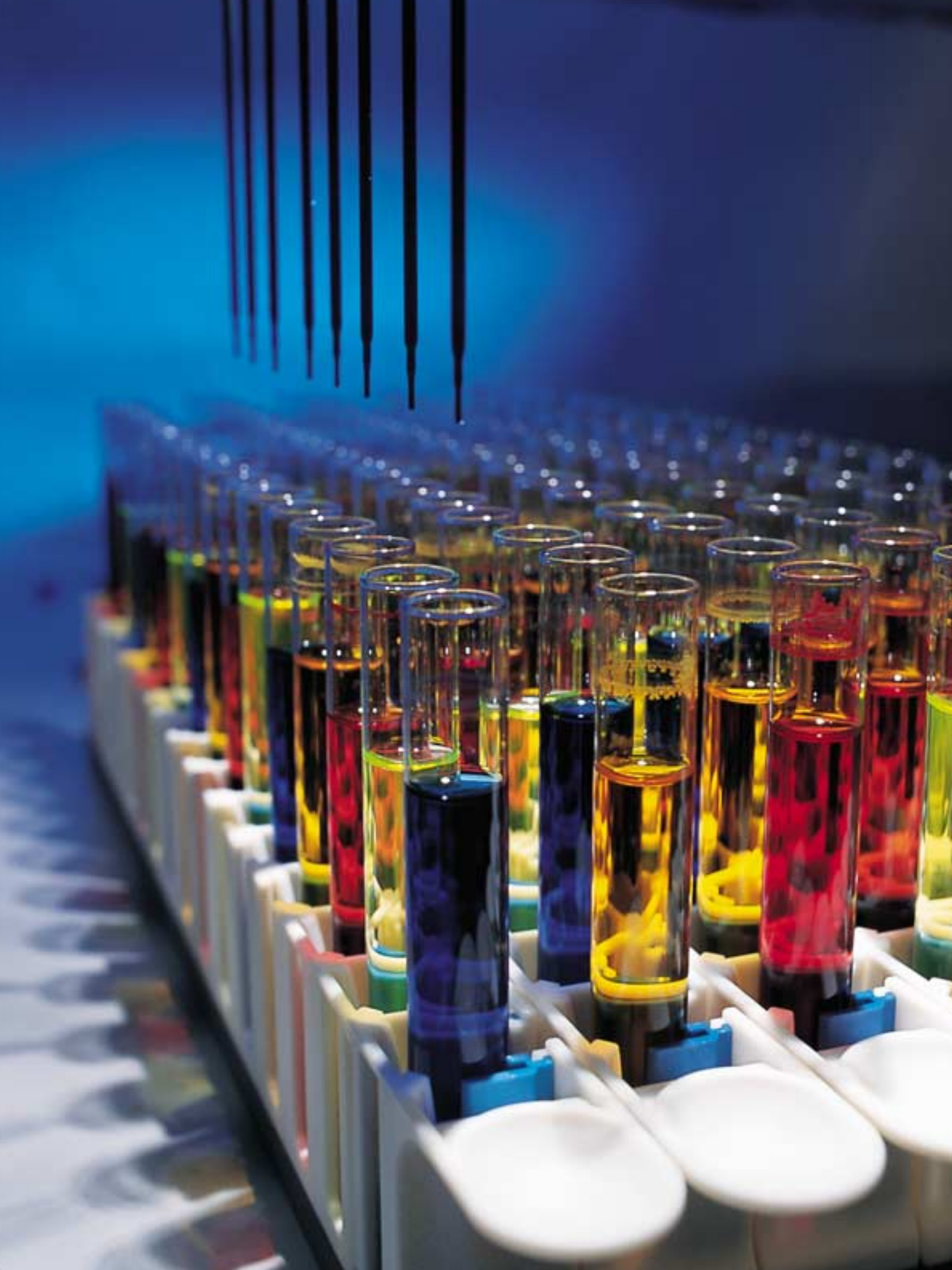
La bonne combinaison

La chimie combinatoire répond à ces exigences, en produisant rapidement des millions de molécules de structures apparentées. Il ne s'agit pas de molécules quelconques, car les chimistes sélectionnent celles qu'ils font réagir, afin d'obtenir les propriétés voulues. Le criblage des molécules obtenues révèle les plus actives : la chimie combinatoire fournit des médicaments potentiels, disponibles pour les tests cliniques beaucoup plus rapidement qu'auparavant et à un coût inférieur.

Les collections, ou banques, combinatoires de produits à cribler s'obtiennent facilement : on utilise des réactions standards pour assembler des éléments constitutifs sélectionnés de façon aussi variée que possible. Considérons, par exemple, quatre molécules, A1, A2, B1 et B2. Les molécules A1 et A2, dont



1. LE MELANGE aléatoire de sous-unités moléculaires est le fondement de la chimie combinatoire. Cette méthode permet de synthétiser rapidement d'innombrables molécules. Un robot (ci-dessus) répartit dans des tubes à essai (ci-dessous et à droite) les sous-unités qui réagissent pour former une grande variété de molécules.



les structures sont voisines, appartiennent à une même classe de composés ; B1 et B2 à une deuxième classe. Supposons que les composés de type A puissent réagir avec les composés de type B et former de nouvelles molécules dont on a toute raison de croire que certaines auraient une efficacité thérapeutique. La chimie combinatoire permet de construire toutes les combinaisons possibles : A1-B1, A1-B2, A2-B1 et A2-B2.

Naturellement, les chimistes utilisent beaucoup plus de deux molécules par famille. Soit 30 molécules de structure proche ayant toutes un groupe amine ($-NH_2$), par exemple, et 30 molécules portant un acide carboxylique ($-CO_2H$). Dans des conditions appropriées, la réaction des amines et des acides forme de nouvelles molécules, nommées amides (elles ont un groupe $-CONH-$). La réaction des 30 amines et des 30 acides donne au total 30×30 ,

soit 900 combinaisons différentes. Si l'on effectue une réaction avec 30 molécules d'une troisième série, le nombre total de combinaisons sera égal à 27 000 ($30 \times 30 \times 30$). Et avec plus de 30 molécules dans chaque série, le nombre de combinaisons augmente rapidement.

Les chimistes disposent de deux techniques combinatoires : la première, la synthèse en parallèle, a été élaborée au milieu des années 1980 par Mario Geysen, des Laboratoires *Glaxo Wellcome* ; la seconde, la synthèse par mélange et répartition, a été mise au point à la fin des années 1980 par Árpád Furkan, du Laboratoire *Advanced Chem-Tech*, à Louisville.

Initialement, M. Geysen utilisait la synthèse en parallèle pour identifier rapidement le site de fixation d'une protéine à un anticorps. Il fabriquait des fragments de protéine, ou peptides, en combinant plusieurs acides aminés (les protéines et les peptides sont des enchaînements d'acides aminés). En réalisant des dizaines, voire des centaines de réactions simultanées, puis en vérifiant si les peptides obtenus se liaient à un anticorps sélectionné, il repéra rapidement les peptides actifs parmi une multitude de molécules.

Dans une synthèse en parallèle, tous les couples de réactifs sont préparés séparément : les chimistes les placent souvent dans des plaques de microtitrage, c'est-à-dire des feuilles de plastique moulées, comportant huit rangées de douze petits puits ; chaque puits reçoit les quelques millilitres de solution où auront lieu les réactions. Cet agencement en lignes et en colonnes facilite l'identification des constituants combinés et celle des composés présents dans les puits.

Si l'on veut produire, par exemple, une série d'amides en combinant huit amines différentes et douze acides carboxyliques, comme on l'a décrit précédemment, on place une solution contenant la première amine dans les puits de la première rangée, une solution de la deuxième amine dans les puits de la deuxième rangée, et ainsi de suite. Puis on ajoute un des acides dans les puits de la première colonne, un autre acide dans les puits de la deuxième colonne, et ainsi de suite jusqu'à la dernière colonne. Ainsi, à partir de 20 molécules différentes seulement, on obtient une banque de 96 produits.

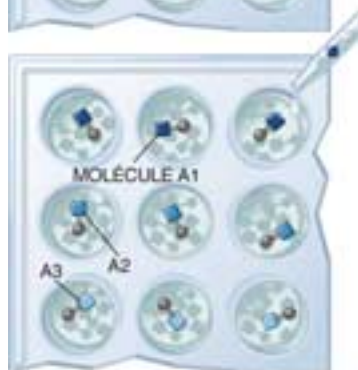
Les chimistes commencent souvent une synthèse combinatoire en fixant la première série de molécules réactives

La synthèse en parallèle



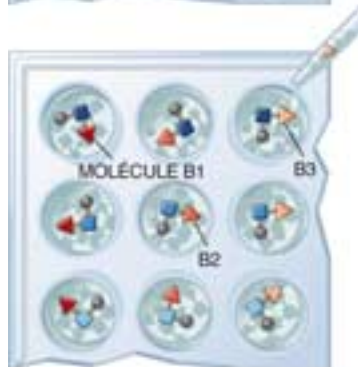
Étape 1

On part d'une feuille de plastique moulée (une plaque de microtitrage) comportant des puits ; les puits sont partiellement remplis avec une solution contenant des billes de polystyrène inertes (les cercles gris). Les plaques de microtitrage ont généralement 8 rangées et 12 colonnes, soit 96 puits ; on n'a représenté ici que le coin supérieur gauche de la plaque.



Étape 2

On ajoute une première série de molécules – celles de la classe A (les carrés) – aux billes, en mettant les molécules A1 dans la première rangée, les molécules A2 dans la deuxième rangée, et ainsi de suite. Après avoir ajouté la première classe de molécules, on filtre le contenu de chaque puits afin d'éliminer toutes les molécules qui ne se sont pas fixées aux billes.



Étape 3

On ajoute la deuxième série de molécules – celle de la classe B (les triangles) – dans les colonnes : les molécules B1 dans la première colonne, les molécules B2 dans la deuxième, etc. Comme dans l'étape 2, on élimine les réactifs en excès.



Étape 4

Quand la banque des 96 produits est achevée, on détache les produits obtenus de leur support solide, afin d'en tester l'activité biologique.

sur des supports solides, telles des billes microscopiques de polystyrène, chimiquement inertes. Après chaque réaction, on élimine par lavage les réactifs qui n'ont pas réagi et qui restent en solution, et l'on ne conserve que les produits fixés sur les billes. Cette technique impose que l'on fixe les réactifs sur les billes, puis qu'on détache les produits de la réaction ; toutefois, la facilité de la purification compense les éventuelles difficultés posées par ces deux opérations.

Aujourd'hui, dans de nombreux laboratoires, le travail routinier de la synthèse en parallèle est automatisé : des robots déposent les réactifs dans les puits appropriés. La méthode est ainsi plus précise et moins fastidieuse. Les chercheurs de la Société *Parke-Davis* avaient construit le premier système automatisé pour la synthèse en parallèle, qui permettait l'obtention simultanée de 40 composés ; aujourd'hui, un robot de la Société *Ontogen* fabrique jusqu'à 1 000 molécules par jour. La durée d'une synthèse en parallèle dépend du nombre de composés obtenus et, en raison des limitations pratiques, on produit des banques de quelques dizaines de milliers de composés au plus par cette méthode.

La synthèse par mélange et répartition

Contrairement à la synthèse en parallèle, où chaque composé reste dans son propre puits, la synthèse par mélange et répartition brasse des produits qui se ressemblent dans un même tube à essai. On réduit ainsi le nombre de tubes à essai nécessaires tout en augmentant le nombre des produits obtenus (on peut en obtenir plusieurs millions). En contrepartie, l'identification de tous ces produits et la mesure de leur activité biologique sont très difficiles.

Supposons que trois groupes de molécules A, B et C soient respectivement composés de trois molécules (A1, A2, A3 ; B1, B2, B3 ; C1, C2, C3). Dans un récipient, on fixe les molécules A1 sur des billes de polystyrène ; dans un deuxième récipient, on place les molécules A2 et, dans le troisième, les molécules A3. On réunit alors toutes les billes portant des molécules A dans un même récipient, on les mélange, puis on divise le mélange en trois parties égales : chaque récipient contient un mélange des trois composés A. Puis on ajoute les molécules B1

dans le premier récipient, les molécules B2 dans le deuxième et les molécules B3 dans le troisième. Après avoir recommencé les mêmes manipulations et introduit les molécules C, on obtient 27 composés différents. On procède ainsi par divisions successives, car, si l'on mélangeait tous les composés en une seule fois, seuls ceux qui réagissent le plus vite se fixeraient, les autres ne réagiraient pas.

Pour isoler la molécule la plus efficace, on teste d'abord toutes les combinaisons et l'on détermine celle qui a l'activité biologique recherchée la meilleure.

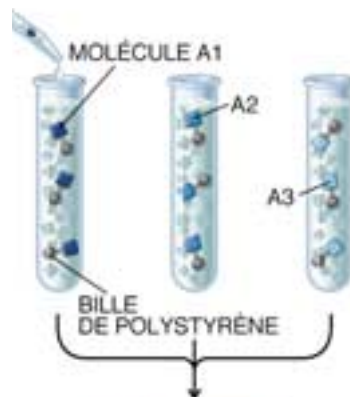
Plusieurs laboratoires pharmaceutiques ont automatisé la méthode de synthèse par mélange et répartition. L'un des premiers robots, celui de la Société *Chiron* fabrique des millions de molécules en quelques semaines : il délivre les produits chimiques et les mélange, et répartit les billes de polystyrène.

La principale difficulté de cette méthode reste l'identification d'un composé actif parmi des milliers d'autres. Kit Lam, de l'Université d'Arizona, a surmonté cet obstacle, car il a remarqué qu'à la fin d'une synthèse de ce type, toutes les molécules fixées sur une

La synthèse par mélange et répartition

Étape 1

Dans des tubes à essai, on place une suspension de billes de polystyrène inertes (les cercles gris). Pour simplifier, on n'a indiqué sur cette figure que trois tubes, mais on peut en utiliser des dizaines. On ajoute une première série de molécules – la classe A (les carrés) – dans les tubes, à raison d'un type moléculaire par tube.



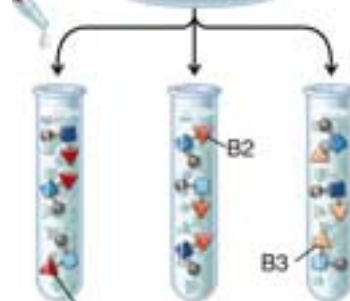
Étape 2

On regroupe le contenu des trois tubes.



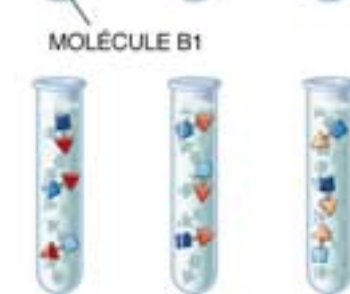
Étape 3

On partage le mélange en trois. Puis on ajoute la deuxième série de molécules – la classe B (les triangles) – en plaçant les molécules B1 dans le premier tube, les molécules B2 dans le deuxième, etc. On répète les étapes 1, 2 et 3 autant de fois que nécessaire, selon le nombre de sous-unités qui doivent être ajoutées.



Étape 4

On sépare les billes des réactifs qui n'ont pas réagi, puis on détache des billes les produits formés. Les chercheurs testent souvent l'activité biologique du mélange de chaque tube afin de déterminer l'activité biologique moyenne. Comme tous les mélanges sont identiques, au début de l'étape 3, on détermine quel est le mélange le plus actif : si c'est le tube où l'on a ajouté B2, on recommence la synthèse en ajoutant seulement des molécules B2 aux composés A. On détermine ensuite quelle est la combinaison A-B2 la plus active biologiquement.



Harold Schneidman Dessin

même bille sont identiques (chaque bille porte plusieurs centaines de milliards de molécules). Après avoir séparé du mélange les billes qui portent des molécules biologiquement actives, on détermine la structure moléculaire de ces composés. Malheureusement, cette méthode ne s'applique qu'à certaines molécules, notamment aux peptides et aux fragments d'ADN pour lesquels on sait déterminer la séquence sur des quantités infimes (par PCR, ou méthode d'amplification des gènes).

D'autres chercheurs ont une autre méthode, qui consiste à placer sur chaque bille une molécule connue, ou étiquette chimique, en même temps qu'une sous-unité réactive (on associe à chaque sous-unité une étiquette spécifique). En fin de réaction, on décroche les étiquettes, et leur identi-

fication, par une méthode chromatographique, par exemple, permet de reconstruire la formule chimique de la molécule synthétisée, sans avoir à identifier ses sous-unités. Néanmoins, l'identification des composés obtenus par la méthode de synthèse par mélange et répartition est généralement si difficile que la plupart des laboratoires pharmaceutiques utilisent la méthode de synthèse en parallèle.

Des banques de médicaments

Les deux techniques de la chimie combinatoire ont été initialement conçues pour la fabrication de peptides. Importantes dans les systèmes biologiques, ces molécules sont de médiocres médicaments, car elles sont

dégradées dans le tube digestif, mal absorbées par la paroi de l'estomac et rapidement éliminées.

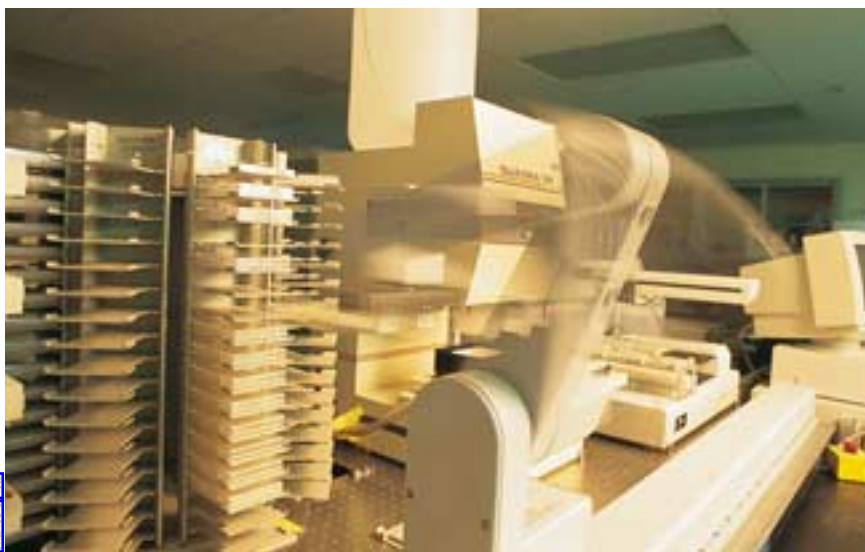
L'industrie pharmaceutique a continué avec acharnement à améliorer les méthodes combinatoires quand elle a compris qu'elle pouvait aussi les appliquer à des analogues de certains médicaments, les benzodiazépines notamment.

Ces médicaments sont parmi les plus prescrits. Le plus connu est le diazépam, ou Valium, mais beaucoup d'entre eux ont une importante activité biologique ; on trouve ainsi des agents anticonvulsifs et antihypnotiques, des antagonistes du facteur d'activation des plaquettes (une molécule essentielle à la coagulation du sang), des inhibiteurs de l'enzyme transcriptase inverse du VIH ou des inhibiteurs de la Ras farnésyle transférase, une enzyme qui participe au développement des cancers. En raison de la diversité de leur activité biologique, les benzodiazépines ont été les premiers composés non peptidiques préparés par synthèse combinatoire, dans l'espoir de trouver de nouveaux médicaments. En 1992, l'un d'entre nous (J. Ellman) a mis au point une méthode de synthèse des benzodiazépines sur support solide, ce qui a permis la constitution de banques contenant des milliers de dérivés des benzodiazépines.

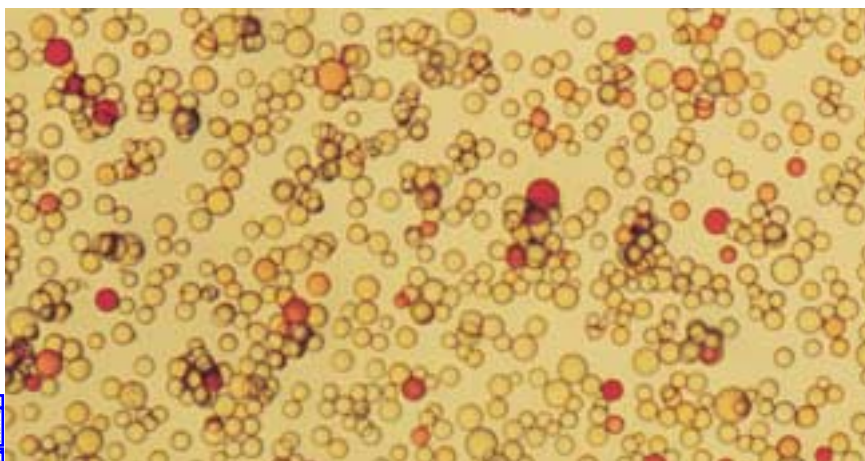
Plus récemment, nous avons amélioré la synthèse des benzodiazépines sur support solide et avons obtenu un nombre de nouveaux composés encore supérieur. Dans les synthèses combinatoires, on doit minimiser les réactions secondaires qui produisent des impuretés. Nous avons ainsi passé plus d'un an à perfectionner les conditions de notre nouvelle synthèse des benzodiazépines, mais, une fois les conditions optimales précisées, nous avons mis deux mois seulement pour fabriquer 11 200 composés !

Plusieurs de ces molécules ont une activité biologique prometteuse. L'une d'entre elles inhibe une enzyme qui intervient dans le cancer du côlon et dans l'ostéoporose ; une autre bloque l'interaction de certains anticorps et de l'ADN simple brin (une telle interaction est souvent incriminée dans une maladie auto-immune, le lupus érythémateux). Pour le moment, ces composés sont en cours d'évaluation en laboratoire.

Lorsque l'industrie pharmaceutique a vu que la chimie combinatoire



2. CE ROBOT DE CRIBLAGE transporte automatiquement des plaques, où sont fixées des banques combinatoires, jusqu'à l'appareil qui teste leur activité biologique.



3. DES BILLES DE POLYSTYRENE (agrandies environ 100 fois) sont souvent utilisées en chimie combinatoire : elles retiennent les produits de réaction, de sorte qu'un lavage élimine les molécules qui n'ont pas réagi. Les billes qui deviennent rouges sont celles qui ont une forte affinité pour un récepteur stéroïdien de synthèse.

4. DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS peuvent aussi être obtenus par chimie combinatoire. Cette banque de 128 dérivés d'oxyde de cuivre a fourni plusieurs films supraconducteurs.

PETER C. SCHULTZ



créait des principes actifs, les projets se sont multipliés. Au cours des cinq dernières années, des dizaines de petites sociétés entièrement consacrées à la chimie combinatoire ont vu le jour. La plupart des grands laboratoires pharmaceutiques ont fondé leur propre département de chimie combinatoire ou se sont associés à un laboratoire plus petit, spécialisé dans ce domaine.

Les chimistes ne se sont naturellement pas limités aux benzodiazépines et ont appliqué la synthèse combinatoire à des molécules variées. Soit ils ont cherché de nouvelles têtes de série, soit ils ont formé des dérivés de têtes de série déjà connues. Dans le premier cas, on crée souvent de grandes banques, composées de dizaines de milliers, voire de millions de produits. En revanche, les banques utilisées pour l'amélioration des têtes de série déjà isolées sont plus petites, avec seulement quelques centaines de molécules.

Quelques principes actifs découverts par chimie combinatoire sont en cours d'essais cliniques chez l'homme. Aucun n'est encore sur le marché, car les essais ne sont pas terminés, mais les premiers médicaments issus de la chimie combinatoire devraient être bientôt commercialisés.

Ainsi, en 1993, le Laboratoire pharmaceutique *Pfizer* a synthétisé, par les méthodes classiques, une tête de série qui semblait prévenir l'athérosclérose (un durcissement des artères). En moins d'un an, utilisant la synthèse en parallèle, le laboratoire a fabriqué plus de 1 000 dérivés de la structure initiale : certains étaient 100 fois plus actifs que le composé de départ. L'un d'eux est en cours d'essais cliniques chez l'homme. Il a fallu fabriquer plus de 900 molécules avant de constater une amélioration de l'activité biologique. La méthode exigeait de modifier la molécule pas à pas, et peu de laboratoires auraient ainsi consenti à investir autant de temps et d'argent pour synthétiser près de 1 000 dérivés avant d'en trouver un plus efficace que le produit d'origine.

De même, des chimistes du Laboratoire pharmaceutique *Eli Lilly* ont utilisé la synthèse en parallèle pour mettre au point un médicament contre les migraines, qui est en cours d'essais cliniques. Ils avaient trouvé une molé-

cule qui se liait à la cible voulue, mais aussi à d'autres récepteurs analogues à la cible, ce qui aurait déclenché des effets secondaires indésirables. Ils fabriquent environ 500 dérivés de cette molécule par synthèse en parallèle avant d'obtenir celle qui est en cours d'évaluation.

Les chimistes apprendront certainement à créer des banques combinatoires encore plus vite et à des coûts inférieurs. Des techniques qui augmentent le rendement et évitent l'utilisation des billes de polystyrène sont déjà en cours d'élaboration. Les méthodes d'évaluation de l'activité des produits testés seront certainement améliorées. Par exemple, la façon dont les milliers de composés d'une banque combinatoire se lient à un récepteur spécifique renseigne les chercheurs sur la forme, la taille et la charge électrique de ce récepteur, même si l'on en ignore la structure exacte. De telles informations aident les chimistes à modifier des composés existants ou à choisir les molécules qui seront à l'origine de nouvelles banques combinatoires.

La chimie combinatoire ne se limite pas au domaine pharmaceutique : elle est déjà utilisée en chimie des matériaux. Peter Schultz et ses collègues de l'Université de Berkeley ont utilisé les méthodes combinatoires pour synthétiser des supraconducteurs fonctionnant à haute température. D'autres chimistes ont appliqué ces méthodes aux cristaux liquides qui seraient utilisés dans des écrans plats et aux matériaux pour batteries en couches minces. Ils espèrent produire rapidement de nouveaux matériaux bon marché.

La chimie combinatoire peut sembler aléatoire : combiner diverses sous-

unités et espérer pêcher une molécule intéressante dans le mélange, ne serait-ce pas le triomphe de la chance aveugle sur le savoir et sur le raisonnement? Non, car les résultats ne sont probants que lorsque les banques sont intelligemment construites. Les chimistes doivent choisir la nature des sous-unités qu'ils utiliseront et les méthodes d'analyse qui détermineront l'activité biologique des composés obtenus. La chimie combinatoire bouleverse les habitudes des chimistes qui cherchent de nouveaux médicaments. L'imitation du système immunitaire aboutira vraisemblablement à la synthèse de molécules qui... palieront les insuffisances du système immunitaire!

Matthew PLUNKETT travaille au Laboratoire pharmaceutique *Arris*, où il prépare des banques combinatoires. Jonathan ELLMAN travaille dans le département chimie de l'Université de Berkeley.

Lorin A. THOMPSON et Jonathan A. ELLMAN, *Synthesis and Applications of Small Molecule Libraries*, in *Chemical Reviews*, vol. 96, n° 1, pp. 555-600, janvier 1996. *Combinatorial Chemistry*, numéro spécial de *Chemical & Engineering News*, vol. 74, n° 7, pp. 28-73, 12 février 1996. *Combinatorial Chemistry*, numéro spécial d'*Accounts of Chemical Research*, sous la direction d'Anthony W. Czarnik et Jonathan A. Ellman, vol. 29, n° 3, mars 1996.

James R. BROACH et Jeremy THORNER, *High-Throughput Screening for Drug Discovery*, in *Nature*, vol. 384, n° 6604, pp. 14-16, 7 novembre 1996.

Comment l'érosion construit les montagnes

NICHOLAS PINTER • MARK BRANDON

Paradoxalement, l'interaction des forces tectonique, érosive et climatique façonne les montagnes et éclaire l'histoire de la Terre.

Pour les Grecs, les montagnes étaient des symboles de la puissance divine : au sommet de l'Olympe, la plus haute des montagnes grecques (2917 mètres), régnaient les dieux, qui régissaient l'existence des mortels. Cependant, ainsi placés, les dieux n'auraient pas dominé longtemps le monde : les montagnes naissent, vivent et meurent selon des cycles complexes.

Contrairement à ce qu'on pensait jusque dans les années 1970, les montagnes ne sont pas uniquement dues aux collisions des plaques qui constituent l'extérieur de notre planète : elles sont aussi créées et façonnées par l'érosion et le climat.

Les interactions des forces tectoniques, de l'érosion et du climat déterminent la forme et la hauteur des sommets, ainsi que le temps nécessaire à la création ou à la disparition des chaînes de montagnes. Paradoxalement, la formation des montagnes semble dépendre autant des forces destructrices, l'érosion, que des forces constructives, la tectonique. Après avoir considéré pendant plus d'un siècle l'érosion comme un facteur secondaire, de nombreux géologues y voient aujourd'hui un mécanisme géophysique puissant : les montagnes les plus imposantes devraient leurs formes à de minuscules gouttelettes de pluie.

Ce résultat a d'importantes conséquences en sciences de la Terre. Les plaines, les vallées et, surtout, les montagnes renseignent les géologues sur l'histoire de notre planète durant des centaines de millions d'années. Les montagnes sont les témoins irréfutables de l'activité des forces tectoniques et de leur durée.

Les modèles de formation et d'évolution des montagnes ont une longue histoire. Selon le modèle du cycle géographique publié en 1899, les montagnes naissaient soudainement, en raison d'un spasme tectonique, puis elles vieillissaient lentement, en raison d'une érosion régulière. La simplicité et la logique de ce modèle ont conduit les géologues à oublier ses imperfections jusqu'à la révolution tectonique des années 1960, après laquelle on a relié la surrection des chaînes de montagnes aux collisions des grandes plaques lithosphériques qui constituent la partie relativement froide et fragile de l'exté-

1. CETTE VALLEE SPECTACULAIRE, dans les montagnes Rocheuses canadiennes, a été creusée par les glaciers – l'un des plus puissants facteurs d'érosion – pendant la dernière époque glaciaire, il y a 20 000 ans.

rieur de la Terre. L'énergie interne de la planète façonne la surface de la Terre en comprimant, chauffant et cassant la lithosphère, dont l'épaisseur est comprise entre un peu moins de 100 kilomètres sous les océans et 200 kilomètres ou plus sous les continents. La lithosphère n'est pas une coquille solide : elle est formée de plusieurs dizaines de plaques qui sont entraînées par la convection du manteau terrestre. Ces déplacements expliquent la plupart des phénomènes naturels de notre planète comme les séismes, la formation des bassins océaniques ou la création des chaînes de montagnes.

Si la tectonique des plaques est le principal moteur de la formation des chaînes de montagnes, elle donne une description insuffisante : depuis 20 ans, les géologues comprennent que les montagnes résultent de l'interaction complexe de trois mécanismes : l'érosion, les phénomènes climatiques et la tectonique.

La tectonique des plaques explique la répartition des chaînes de montagnes à la surface de la Terre. La formation des montagnes est toujours expliquée par des apports de matière ou de chaleur, ou bien des deux, dans une partie de la croûte terrestre (la croûte est la partie externe de la lithosphère). Une croûte plus chaude ou plus épaisse s'élève en formant des montagnes, car elle flotte sur le manteau plus dense qu'elle. La tectonique des plaques contribue à l'épaississement de la croûte par la convergence de deux plaques ou par un apport de chaleur ou de magma fondu.

La convergence de deux plaques a deux conséquences possibles. Dans certains cas, une plaque s'enfonce dans le manteau en glissant sous la seconde plaque : c'est la sub-

duction. Au-dessus de la zone de subduction, la plaque supérieure est épaissie par le rejet en altitude de la croûte comprimée et par l'apport de magma qui remonte après la fusion partielle de la plaque qui s'enfonce. De nombreuses montagnes, dont presque toutes celles qui forment la ceinture de feu du Pacifique (des volcans qui bordent les zones de subduction de l'océan Pacifique), se sont formées ainsi.

Subduction ou collision

D'autre part, quand deux plaques qui entrent en collision sont toutes deux surmontées de blocs continentaux, aucune des plaques ne s'enfonce sous l'autre. Toute la matière crustale apportée par la compression contribue à l'épaississement et à l'élévation de la zone montagneuse. Ce type de collisions a créé des reliefs spectaculaires comme le plateau tibétain et la chaîne de l'Himalaya, qui compte les dix sommets les plus élevés du monde.

Les apports de magma et de chaleur dans la croûte, au cours des épisodes d'activité volcanique, peuvent aussi créer des chaînes de montagnes : les plus longues chaînes de la planète, les dorsales médio-océaniques, résultent de remontées de magma entre des plaques qui s'écartent, renouvelant ainsi le plancher océanique. Ces dorsales divisent l'océan Atlantique, l'Est du Pacifique et l'océan Indien comme les coutures d'un ballon ; la dorsale médio-Atlantique mesure plus de 15 000 kilomètres de long, culminant jusqu'à 4 000 mètres au-dessus des plaines abyssales des fonds océaniques.

Sur les continents, la chaleur associée aux apports de magma peut aussi contribuer au soulèvement de grands ensembles de terrain en diminuant la densité de la croûte par rapport au manteau sous-jacent.

En plus des causes tectoniques, les nouveaux modèles de formation des montagnes prennent en compte les effets de l'érosion et du climat. L'érosion désagrège les roches, évacue les sédiments des pentes et les transporte dans les rivières. Sur un terrain géologique donné, l'activité des différents agents érosifs – la gravité, le ruissellement, le vent, le gel – dépend du climat, de la déclivité des pentes et de la nature des roches qui affleurent.

Le climat ne peut être découplé de l'érosion, car il détermine le volume moyen de matériaux éliminés d'un terrain. En général, l'érosion est importante quand le climat est humide, mais une forte humidité favorise aussi la croissance d'une végétation, qui protège la surface. Les montagnes des régions polaires, telles celles de l'Antarctique et du Groenland, sont moins sensibles à l'érosion, car elles sont arides et recouvertes par des manteaux de glace quasi immobile. À l'inverse, les glaciers des Alpes ou de la Sierra Nevada, en Californie, attaquent fortement la couche rocheuse, si bien que cette forme d'érosion est, peut-être, la plus puissante à la surface de la Terre.

De nombreuses autres relations existent entre l'érosion, le climat et le relief. Par exemple, les montagnes perturbent les vents et provoquent des

Richard Sisk: Pacific Northwest





Une télésatellite Project/om van Sant, Inc

2. L'HIMALAYA ET LE PLATEAU TIBÉTAÏN sont visibles, sur cette photographie prise par satellite, comme une vaste étendue blanche au Nord et à l'Est de l'Inde. La chaîne de l'Himalaya – les rides au Sud de la zone blanche – résulte de la collision continentale qui a commencé il y a 50 millions d'années, lorsque la plaque indienne a heurté la plaque asiatique.

précipitations et, donc, une érosion accrue sur la pente la plus exposée. Inversement, ce mécanisme d'«orographie» crée des déserts derrière de nombreux massifs montagneux. L'altitude détermine également l'érosion, parce qu'elle abaisse la température moyenne : les sommets les plus élevés sont moins protégés par la végétation et plus exposés à l'érosion des glaciers. Dans les régions tempérées, la vitesse de l'érosion est proportionnelle à la pente moyenne de la topographie, car celle-ci augmente les glissements de roches et le ruissellement des eaux. Au total, les montagnes modifieraient leur propre climat à mesure qu'elles s'érigent.

Pour comprendre le comportement d'un système aussi complexe qu'une chaîne de montagnes, on doit donc recenser les facteurs d'érosion et comprendre leurs interactions. En raison de celles-ci, des phénomènes assez simples conduisent à des effets d'une complexité surprenante. Des effets de rétroaction, stabilisateurs ou catastrophiques, peuvent survenir entre les différents phénomènes. Considérons, par exemple, la variation d'altitude d'un massif montagneux en fonction de son érosion. Lorsque l'altitude croît, l'intensité de l'érosion augmente, ce qui ralentit cette croissance. Comme cette rétroaction s'oppose à l'effet qui la produit, on la nomme rétroaction négative. À l'inverse, une rétroaction positive amplifie toute

variation du système : la raréfaction des précipitations derrière une montagne est un exemple de rétroaction positive ; l'érosion étant réduite, la montagne peut croître plus rapidement. Au Nord de l'Himalaya, une telle raréfaction des précipitations a contribué à la formation du haut plateau tibétain (voir l'encadré de la page 82).

Ce concept de rétroaction est au cœur des nouvelles théories qui expliquent la croissance des chaînes de montagnes et son impact sur l'ensemble de notre planète. De nombreux types d'interactions ont été identifiés ou imaginés. Déjà les études ont montré comment, par ces interactions, les mécanismes de surface comme le climat ou l'érosion influenceraient les phénomènes tectoniques profonds (et réciproquement).

L'isostasie, une question d'équilibre

L'une des rétroactions importantes fait intervenir le phénomène d'isostasie, qui résulte de la différence de densité de la croûte terrestre et du manteau : la croûte, moins dense que le manteau, flotte sur celui-ci. Si un massif montagneux reste en altitude, c'est que la croûte est rigide et que le manteau exerce une poussée verticale d'Archimède. Comme les icebergs, les sommets de chaque chaîne de montagnes

ont des racines qui s'enfoncent dans le manteau. Dans le cas des icebergs, la densité de la glace est environ 90 pour cent de celle de l'eau, de sorte que la partie de l'iceberg située au-dessus de la surface de l'eau est soutenue par une quantité de glace immergée d'un volume neuf fois supérieur. Dans le cas de la croûte continentale, la densité est 80 à 85 pour cent de celle du manteau sous-jacent, ce qui explique la présence de racines de plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur pour des montagnes de plusieurs kilomètres d'altitude. Cet équilibre des montagnes sur le manteau est qualifié d'isostatique.

L'isostasie est le mécanisme clef qui relie la tectonique (l'évolution interne d'une montagne) à l'altitude de la chaîne (son évolution externe). Lorsque l'érosion enlève de la matière en surface, la réaction isostatique soulève l'ensemble du massif et ramène en altitude jusqu'à 80 pour cent de la masse érodée. Ce soulèvement explique de nombreux phénomènes qui étonnaient naguère les géophysiciens.

Ainsi, des relevés détaillés de la côte Est des États-Unis avaient montré des vitesses de soulèvement de quelques millimètres à quelques centimètres par siècle. C'était étonnant, car les Appalaches se trouvent à l'intérieur de la plaque nord-américaine, où aucune convergence de plaques ne pouvait expliquer une telle remontée. Après avoir mis en doute les mesures de soulèvement, les géophysiciens reconnaissent aujourd'hui que certaines d'entre elles résulteraient de la réponse isostatique à l'érosion, tout particulièrement dans les régions les plus hautes des Appalaches. L'érosion qui se produit dans le lit des rivières est particulièrement importante, car elle peut engendrer des altitudes supérieures aux altitudes initiales des sommets : la matière éliminée dans les vallées produit un soulèvement de l'ensemble du massif montagneux, sommets et vallées compris.

Bien que l'isostasie puisse maintenir la hauteur des montagnes pendant des millions d'années, celles qui ne bénéficient plus d'apports tectoniques finissent par s'éroder. De grandes parties de l'Australie, par exemple, sont de vieux massifs aplanis : ces régions tectoniquement calmes depuis des centaines de millions d'années s'élèvent à quelques centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer. L'évolution de l'altitude est conforme à ce que l'on prévoit quand

on tient compte de l'isostasie et de l'érosion. En revanche, dans des massifs tectoniquement actifs comme la chaîne de l'Himalaya ou les Alpes, les variations d'altitude correspondent aux trois effets d'isostasie, d'érosion et de soulèvement par les forces tectoniques. Connaissant aujourd'hui les vitesses de soulèvement et d'érosion, on suppose que des dizaines de grands massifs montagneux sont apparus et ont été détruits au cours de l'histoire de la Terre.

Des ères tectoniques particulières ?

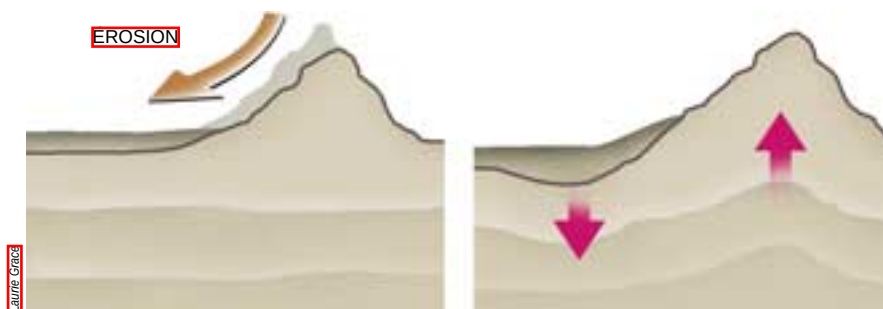
Comment retrouver ces anciens reliefs ? La formation des chaînes de montagnes laisse des traces géologiques comme des coulées de lave, des intrusions magmatiques, des affleurements de roches ayant été enterrés à grande profondeur, ainsi que de grandes quantités de sédiments déposés dans les plaines alluviales et des fossiles de plantes d'altitude. En datant ces restes, les géologues déduisent la dynamique de la formation des chaînes de montagnes au cours de l'histoire de la Terre.

Par l'examen des quantités de sédiments, des activités volcaniques passées, ainsi que de plusieurs autres indicateurs, on a conclu que l'activité tectonique, particulièrement intense au cours des 40 derniers millions d'années, a créé de nombreuses chaînes de montagnes. Au cours de la même période, le climat de la planète a considérablement changé : un refroidissement généralisé a transformé en terres recouvertes d'une calotte glaciaire le Groenland et le continent antarctique, qui étaient jadis tempérés et couverts de végétation. Ce refroidissement a culminé avec l'extension des glaciers d'Amérique du Nord et d'Europe, qui ont recouvert les continents au cours des deux derniers

millions d'années. Deux théories opposées expliquent le phénomène : soit la surrection des chaînes de montagnes aurait modifié le climat, soit la modification du climat serait responsable de la surrection accrue des montagnes.

Examinons d'abord la première de ces deux théories, qui propose que l'apparition de puissantes et nombreuses chaînes de montagnes ait modifié le climat en abaissant la température. Les glaciers, par exemple, tendent à se perpétuer : une fois en place, ils augmentent le pouvoir réflecteur, ou albédo, de la surface, ce qui diminue encore la température et accélère la formation de glace. Au cours des 40 derniers millions d'années, l'apparition de nombreuses chaînes de montagnes aurait augmenté la surface de la Terre recouverte de glaciers, ce qui aurait refroidi la planète en augmentant son albédo. Le dioxyde de carbone atmosphérique pourrait également avoir participé à ces modifications du climat : comme la surrection des montagnes modifie la répartition globale des pluies et des chutes de neige, les roches auraient été davantage altérées, et l'érosion chimique accrue aurait diminué la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique ; l'effet de serre aurait été moindre, et le climat global se serait refroidi.

La seconde théorie stipule, au contraire, que les grands changements climatiques de ces 40 derniers millions d'années sont indépendants des modifications du relief, et que les changements climatiques ont produit des indices qui ont été interprétés, à tort, comme résultant d'une rapide croissance des montagnes. De nombreux climatologues pensent que le refroidissement global résulte de la dérive des continents, qui a redistribué les continents à la surface de la planète et



3. LE SOULÈVEMENT dû à la compensation isostatique est le résultat de la densité inférieure des terrains qui constituent le massif montagneux par rapport au manteau terrestre sous-jacent : les montagnes «flottent» sur le manteau. L'érosion provoque un soulèvement de la croûte, et le dépôt de sédiments épaissit la croûte de part et d'autre des montagnes. La redéposition ne se fait pas au même endroit que l'érosion.

a modifié la circulation des courants océaniques. Ces derniers sont les principaux vecteurs du transfert de chaleur entre les zones équatoriales et les zones polaires (voir *L'origine des glaciations*, par Wallace Broecker, *Pour la*

Science, janvier 1996). Comment les modifications climatiques auraient-elles eu des effets analogues à ceux de la surrection des montagnes? En raison de l'équilibre isostatique : le refroidissement généralisé aurait accru

l'érosion de nombreuses chaînes de montagnes, mais une érosion supérieure du fond des rivières ou des vallées glaciaires aurait soulevé les massifs montagneux par l'effet de compensation isostatique.

L'Himalaya et les Appalaches

L'Himalaya et les Appalaches sont parmi les chaînes de montagnes les plus imposantes de la Terre. Bien qu'elles résultent toutes deux de la collision de deux blocs continentaux, elles sont très différentes. Leur comparaison fait ressortir les principes clefs de la compréhension actuelle de l'orogénèse.

Courant sur plus de 2 500 kilomètres au travers de l'Inde et du Sud du Tibet, la chaîne de l'Himalaya est la reine des montagnes. La plupart des plus hauts sommets s'y trouvent. Du plateau tibétain jusqu'à la Chine du Sud-Ouest, au Nord du massif, la chaîne de l'Himalaya contient la plus grande masse montagneuse du monde. Il est même possible que cette chaîne soit la plus grande que la Terre ait connue au cours du dernier milliard d'années. Le plateau tibétain, d'autre part, a l'aspect d'une plaine désertique dont l'altitude peut couper le souffle. C'est la plus grande surface terrestre (grande comme la moitié de l'Europe) située à plus de 5 000 mètres d'altitude.



Image 1. Smith / Peter Arnold / J. J. J.



Image 2. Powell / Mountain Light

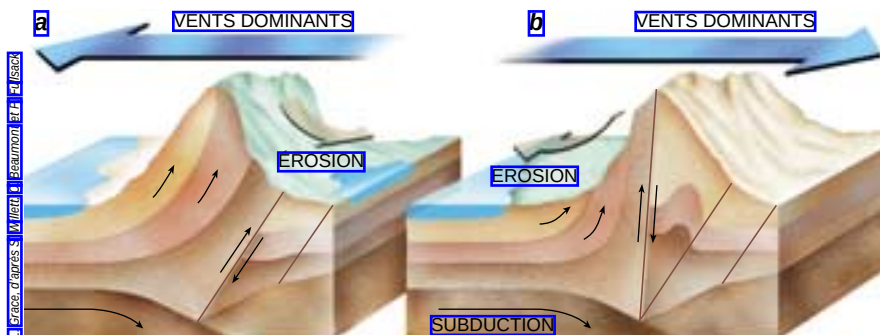
LES APPALACHES ET L'HIMALAYA se sont formés par des processus géologiques similaires mais à 250 millions d'années d'intervalle. Une érosion plus longue a donné aux Appalaches (*en haut*) un aspect moins hérissé que l'Himalaya (*en bas*) qui subit encore un soulèvement tectonique. La chaîne de l'Himalaya est peut-être la plus grande que la Terre ait connue depuis un milliard d'années.

Ce système géologique résulte de la collision, pendant les 50 derniers millions d'années, de la plaque indienne et de la plaque asiatique. La collision, qui écrasa l'Inde et le Tibet, activa une série de failles qui ont encastré une partie du continent indien sous l'Asie. Avant la collision, l'Inde dérivait vers le Nord, à une vitesse de 15 à 20 centimètres par an ; depuis le choc, la vitesse de déplacement n'est plus que de cinq centimètres par an environ. Ainsi l'Inde a-t-elle pénétré de 2 000 kilomètres à l'intérieur de la plaque asiatique, doublant l'épaisseur de la croûte, soulevant la chaîne de l'Himalaya et le plateau tibétain et rejetant vers l'Est et le Sud-Est d'immenses zones de l'Indochine et de l'Est de la Chine.

Lors de la formation de la chaîne de l'Himalaya et du plateau tibétain, plusieurs phénomènes ont interagi. La formation du plateau a apparemment déclenché un bouleversement climatique, il y a environ huit millions d'années, qui a renforcé la mousson, la saison des pluies intenses qui tombent sur la partie Sud de l'Asie. L'intensification de l'érosion due à cette mousson a provoqué, par réaction isostatique, un soulèvement de la chaîne de l'Himalaya, augmentant de plus d'un facteur dix la quantité de sédiments charriés par l'Indus et le Bengale. Pendant ce temps, l'intérieur du plateau tibétain évoluait beaucoup plus lentement, car il était partiellement protégé de la mousson par l'Himalaya et parce que les principales rivières n'y creusaient pas leur lit.

Quoique les Appalaches soient moins spectaculaires que l'Himalaya, elles ont été créées par le même mécanisme tectonique et évoluent aujourd'hui selon le même type d'interactions. La principale différence est l'âge : la chaîne de l'Himalaya a environ 50 millions d'années, alors que la période de plus forte croissance des Appalaches se situe entre 250 et 350 millions d'années.

Géologiquement, la côte Est des États-Unis est aujourd'hui la moins active du continent. Il y a 200 millions d'années, au contraire, c'était une zone orogénique très active. Pendant les centaines de millions d'années précédentes, l'ancêtre de l'océan Atlantique (nommé océan Iapetus) s'était progressivement refermé, en raison d'une subduction sous la côte Est de l'Amérique du Nord. Lors de cette fermeture, au moins trois blocs de terres émergées, probablement des arcs insulaires semblables au Japon actuel, se sont agrégés au continent. Plus tard, l'activité orogénique a culminé avec la collision de l'Afrique et de l'Amérique du Nord. Les premières montagnes des Appalaches qui sont nées de cette collision mesuraient 250 à 300 kilomètres de large et avaient une altitude moyenne comprise entre 3 500 et 4 500 mètres, avec des sommets sans doute d'altitude supérieure. Apparemment l'érosion a arraché 4 500 à 7 500 mètres de matériaux aux Appalaches pendant les 270 derniers millions d'années (les montagnes n'étaient pas plus hautes de 4 500 à 7 500 mètres, car la compensation isostatique a maintenu l'altitude de la montagne à mesure de son érosion). Pendant les 200 derniers millions d'années, alors que l'Amérique du Nord s'éloignait de l'Afrique et que l'océan Atlantique s'ouvrait, d'autres événements ont provoqué quelques épisodes isolés de soulèvement, mais l'érosion a été le mécanisme dominant d'évolution de la chaîne de montagnes.



4. L'OROGRAPHIE est due à la déflexion vers le haut des vents par les reliefs montagneux, ce qui augmente les précipitations sur les sommets et sur les pentes du massif exposées aux vents dominants. Pour une chaîne de montagnes côtière, lorsque les vents dominants soufflent vers le large, en sens opposé à la subduction (a), l'érosion est supérieure sur le versant continental du massif montagneux, ce qui y fait affleurer les roches d'origine les plus profondes et les plus déformées. Lorsque le vent souffle dans le même sens que la subduction (b), l'érosion dénude le versant côtier de la chaîne de montagnes, entraînant les roches les plus profondes vers la surface. Dans ce cas, le versant continental de la chaîne de montagnes reçoit peu de précipitations. C'est pour une telle raison que l'Est de la Sierra Nevada, en Californie, est désertique.

Ainsi apparaît un dilemme, analogue à celui de la poule et de l'œuf, naturel pour un système où s'exercent de nombreuses rétroactions. Les géologues ignorent quel mécanisme a déclenché les changements climatiques et topographiques qui se déroulent depuis 40 millions d'années, mais ils ont compris que de nombreuses interactions peuvent amplifier de petites variations et que la tectonique, le climat et l'érosion ont travaillé ensemble pour façonner les structures géologiques qu'ils étudient aujourd'hui.

L'érosion

La mise en évidence des nombreuses interactions dans la constitution des chaînes de montagnes montre que l'érosion, qui façonne les montagnes en surface, participe également aux mécanismes tectoniques profonds, dans la croûte. En dernier lieu, la force qui limite la croissance des montagnes est la gravité. Ainsi, l'érosion, en diminuant le poids des massifs montagneux, accélère les processus tectoniques sous les montagnes. En un sens, l'érosion «aspire» la croûte de l'intérieur du massif vers

la surface et laisse une empreinte différente sur les faciès des roches et sur les types de déformation crustale à l'intérieur ou sous les chaînes de montagnes.

La nature des roches affleurant à la surface des montagnes dépend en partie du climat local, de la vitesse de l'érosion et de sa nature. De cette manière, l'érosion agit sur la topographie, sur la composition et sur la structure des montagnes. Le métamorphisme des roches (les transformations minéralogiques qui résultent de la compression et de l'échauffement, dans le sous-sol) et l'apparition de minéraux susceptibles de former des roches dépendent des conditions de température et de pression à l'intérieur de la croûte. Des modifications apparemment négligeables du climat ou de l'érosion, comme une variation de vitesse ou de direction du vent, ou encore de petites variations en latitude, peuvent changer l'histoire des températures et modifier la nature des roches créées durant l'évolution des chaînes de montagnes.

Récemment, des modélisations numériques ont testé les effets des vents dominants et de l'orographie sur la répartition des différentes zones

Collection

Astronomie

Mécanique Céleste

Introduction aux éphémérides astronomiques

Cet ouvrage fournit aux chercheurs, étudiants et astronomes amateurs, les outils de base pour aborder la mécanique céleste.

- unités et données astronomiques concernant les corps du système solaire
- échelles de temps utilisées
- systèmes de référence pour repérer les corps célestes et transformations entre les différents repères
- théorie de la rotation de la Terre
- solutions les plus récentes des mouvements des corps du système solaire
- présentation des éphémérides de la *Connaissance des Temps*
- éphémérides pour le Soleil, la Lune, les planètes et les satellites

Il contient un grand nombre de tables, de figures et est accompagné d'un glossaire.

Bureau des Longitudes

ISBN 2-86883-298-9 - 450 pages - Prix : 380 FF

Connaissance des Temps 1998

Cet ouvrage donne les positions du Soleil, de la Lune, des planètes ainsi que des divers satellites (de Mars, Jupiter, Saturne...). Le lecteur peut calculer les coordonnées d'un astre à l'aide de la disquette fournie.

Bureau des Longitudes

ISBN : 2-86883-304-7 - 200 pages - Prix : 250 FF

Ces ouvrages sont disponibles soit chez votre libraire soit aux

Éditions de Physique

7 av du Hoggar - Z.I. de Courtabœuf

91944 Les Ulis Cedex A

Tél. : 01 69 18 75 75 - fax : 01 69 28 84 91

<http://www.ed-phys.fr>

e-mail : customers@ed-phys.fr

de métamorphisme dans les chaînes de montagnes. Elles ont révélé que, si les vents dominants vont dans le même sens que la subduction, la majeure partie des précipitations tombe sur le versant côtier de la chaîne de montagnes, au-dessus de la plaque qui s'enfonce. Ce phénomène y intensifie la déformation et l'exhumation des roches profondes de la croûte. À l'inverse, si les vents dominants sont opposés au sens de la subduction, l'érosion est plus forte sur le versant continental de la chaîne : la déformation du massif montagneux est relativement uniforme, et l'exhumation des roches profondes est limitée au versant continental. Une étude de la répartition des roches altérées dans le cœur de certains vieux massifs montre que les empreintes laissées par l'orographie et par les vents dominants restent visibles plus de deux milliards d'années après que la chaîne a cessé d'être active.

Ayant observé que le soulèvement tectonique et l'érosion peuvent se produire sur des échelles de temps et à des vitesses similaires, de nombreux géologues admettent aujourd'hui que certaines montagnes sont stationnaires : leur hauteur et leur forme générale peuvent rester stables, sans changement notable, durant des centaines de milliers d'années, voire des millions d'années, parce que la vitesse d'érosion est compensée par l'activité tectonique.

Les trois étapes

Si peu de montagnes actuelles sont dans cet état d'équilibre parfait, la plupart d'entre elles l'ont sans doute atteint durant leur histoire. L'évolution des chaînes de montagnes se divise en trois phases. La première, la phase de formation, commence avec la convergence de deux plaques ou avec la survenue d'un événement tectonique qui provoque l'épaississement de la croûte et l'élévation du relief ; durant cette période, la croissance tectonique est plus rapide que l'érosion. Puis, lorsque l'altitude devient très importante, l'érosion s'intensifie. Selon la taille de la chaîne et le climat local, le soulèvement continue jusqu'à ce que l'érosion ou la résistance de la croûte limitent la croissance de l'altitude moyenne de la chaîne. Cette deuxième période stationnaire dure aussi longtemps que la

tectonique compense l'érosion. Enfin, lorsque la surrection ralentit, l'érosion prend le dessus, et les montagnes vieillissent ; leur altitude moyenne décroît lentement. Lors de n'importe laquelle des trois phases, l'évolution des montagnes peut être compliquée par l'intervention d'événements tectoniques ou climatiques, et par les interactions entre ces mécanismes et l'érosion.

Les nouvelles théories sur la formation des chaînes de montagnes promettent d'être aussi fructueuses que le fut la tectonique des plaques il y a 30 ans. De la même manière que celle-ci a permis d'expliquer la répartition globale des séismes, des volcans, des fossiles et de nombreux types de roches et de minéraux, les nouvelles idées orogéniques montrent comment les forces tectoniques, le climat et la topographie interagissent pour créer les paysages les plus spectaculaires de la planète. Les simulations numériques prenant en compte ces théories rendent compte d'histoires tectoniques complexes, de la variabilité des climats, et des particularités géologiques locales.

Nicholas PINTER enseigne la géologie à l'Université de l'Illinois, à Carbondale. Mark BRANDON enseigne à l'Université Yale, dans le Connecticut.

T. YOSHIKAWA, *Landform Development by Tectonics and Denudation*, in *Themes in Geomorphology*, sous la direction de A. Pitty, Croom Helm, 1985.

C. BEAUMONT, P. FULLSACK et J. HAMILTON, *Erosional Control of Active Compressional Orogens*, in *Thrust Tectonics*, sous la direction de K.R. McClay, Chapman and Hall, 1992.

B.L. ISAACS, «Long-Term» *Land Surface Processes: Erosion, Tectonics and Climate History in Mountain Belts*, in *TERRA-1 : Understanding the Terrestrial Environment : The Role of Earth Observations from Space*, sous la direction de P.M. Mather, Taylor and Francis, 1992.

R.E. RAYMO et W.F. RUDDIMAN, *Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate*, in *Nature*, vol. 359, n° 6391, pp. 117-122, 10 septembre 1992.

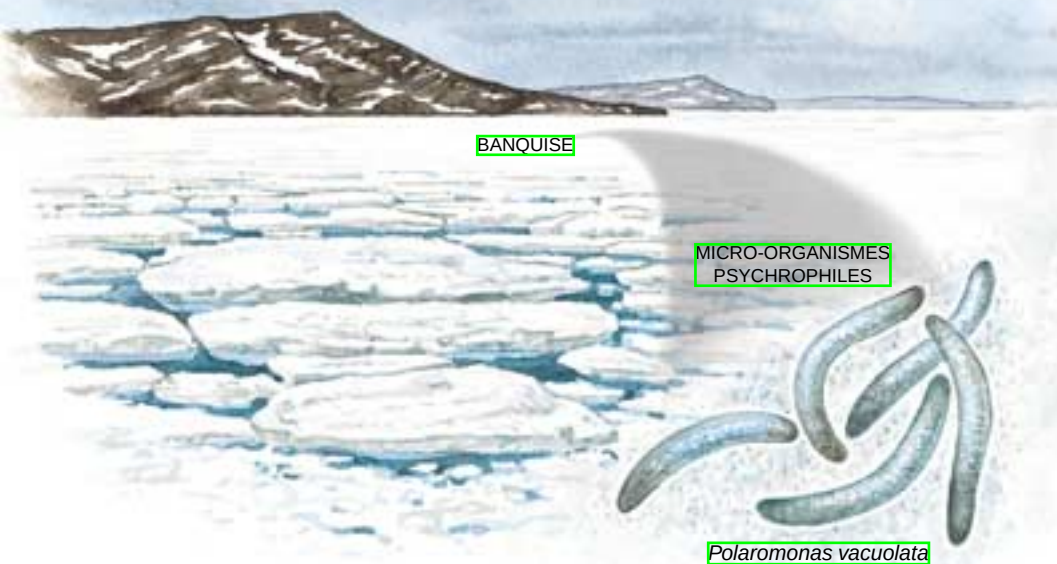
E. FIELDING, B. ISACKS, M. BARAZANGI et C. DUNCAN, *How Flat Is Tibet?*, in *Geology*, vol. 22, n° 2, pp. 163-167, février 1994.

E.A. KELLER et N. PINTER, *Megageomorphology*, in *Active Tectonics : Earthquakes, Uplift and Landscape*, Prentice Hall, 1996.

Les organismes de l'extrême

MICHAEL MADIGAN • BARRY MARRS

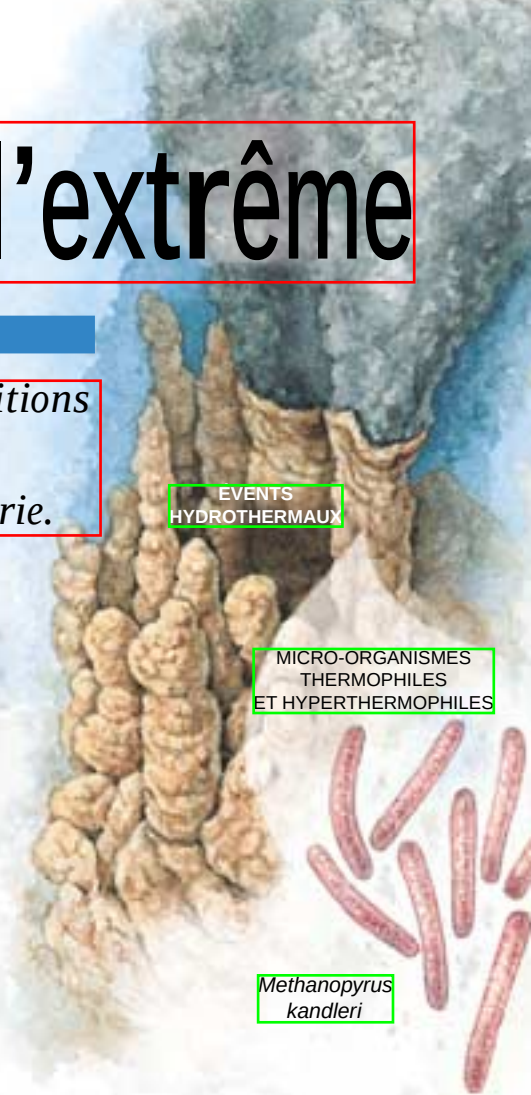
Certains micro-organismes survivent dans des conditions qui tueraient toute autre créature. Les molécules qui leur permettent de prospérer intéressent l'industrie.



BANQUISE

MICRO-ORGANISMES
PSYCHROPHILES

Polaromonas vacuolata



EVENTS
HYDROTHERMAUX

MICRO-ORGANISMES
THERMOPHILES
ET HYPERTHERMOPHILES

*Methanopyrus
kandleri*

Plongés dans de l'eau bouillante, dans de l'eau presque gelée, ou encore dans du vinaigre, dans de l'ammoniaque ou dans de la saumure, les animaux meurent quasi instantanément. Toutefois de nombreux micro-organismes se sont adaptés à ces environnements réhibitoires : ce sont les «extrémophiles», capables de survivre dans des conditions qui, du point de vue humain, sont réellement extrêmes. Mieux encore, ces micro-organismes ne se contentent pas de supporter ces environnements agressifs : ils ne se développent et ne se reproduisent bien que là.

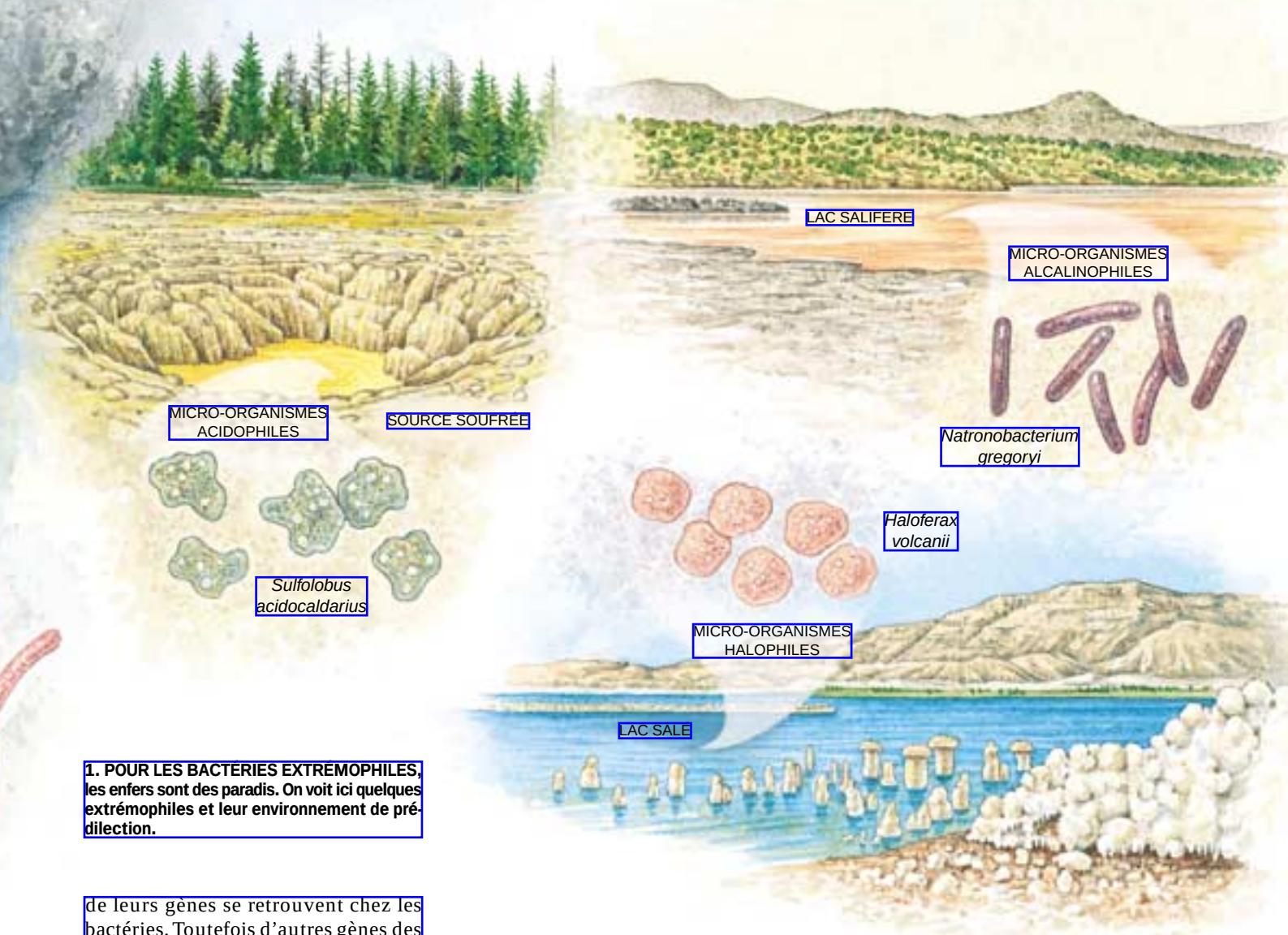
Certains extrémophiles sont connus depuis plus de 40 ans, mais la recherche de ces types d'organismes s'est intensifiée récemment, quand on a reconnu que certains endroits que l'on croyait stériles pullulent de vie microbienne. En outre, les industriels ont réalisé que les systèmes de survie des extrémophiles pouvaient avoir des applications variées.

Leurs enzymes des extrémophiles sont ainsi des catalyseurs de réactions biologiques extrêmement résistants : comme les catalyseurs chimiques, les enzymes accélèrent les réactions chimiques sans y participer, de sorte qu'elles peuvent être réutilisées indéfiniment. En 1997, diverses sociétés ont consacré plus de dix milliards de francs à l'étude des enzymes capables de produire des édulcorants, de délayer les jeans, d'identifier les criminels par leurs empreintes génétiques ou de diagnostiquer les maladies infectieuses ou génétiques. Comme les enzymes classiques perdent leurs propriétés lorsqu'elles sont excessivement chauffées ou placées dans des conditions extrêmes, les industries qui les utilisent doivent souvent prendre des précautions pour les protéger au cours de leurs réactions ou de leur conservation. La résistance des enzymes d'extrémophiles – surnommées «extrémozymes» – pourrait simplifier les méthodes de génie

enzymatique et accroître le rendement des réactions tout en réduisant les coûts. De surcroît, les ingénieurs peuvent utiliser ces extrémozymes dans des procédés nouveaux.

Une vingtaine d'équipes, dans le monde, analysent les extrémophiles, à la recherche de leurs enzymes. Seulement quelques-uns de ces micro-organismes sont utilisés aujourd'hui, mais d'autres le seront prochainement. Tout comme pour des enzymes classiques, la transformation d'un extrémozyme nouvellement isolée en un produit industriel nécessite plusieurs années d'études.

D'autre part, l'analyse des extrémophiles a bouleversé l'arbre de l'évolution. Naguère, on divisait les créatures vivantes en deux groupes principaux : les bactéries, dont les cellules sont simples et dépourvues de noyau, et les eucaryotes, d'organisation plus complexe, avec le matériel génétique enfermé dans le noyau cellulaire. L'étude des extrémophiles laisse supposer l'existence d'un troisième groupe : les archéobactéries. Ces dernières n'ont pas de noyau et ressemblent beaucoup aux bactéries ; certains



1. POUR LES BACTÉRIES EXTREMOPHILES, les enfers sont des paradis. On voit ici quelques extrémophiles et leur environnement de prédilection.

de leurs gènes se retrouvent chez les bactéries. Toutefois d'autres gènes des archéobactéries ne sont présents que chez les eucaryotes et, même, certains semblent être uniques. On y recherche des indices sur l'évolution de la vie primitive sur la Terre (voir l'encadré des pages 88 et 89).

Certains l'aiment chaud

La plupart des bactéries vivent aux températures comprises entre 20 °C et 40 °C, et aucun organisme pluricellulaire ne tolère des températures supérieures à 50 °C ; les micro-organismes eucaryotes, eux, ne résistent pas longtemps à plus 60 °C. Pourtant les hyperthermophiles apprécient des températures supérieures à 80 °C, voire 100 °C!

On connaît depuis longtemps des thermophiles s'accommodant de températures de 60 °C, mais les véritables extrémophiles – ceux qui se développent à des températures supérieures – ne furent découverts qu'il y a une trentaine d'années : à l'Université de Madison, Thomas Brock et ses collègues découvrirent les premiers spécimens

à l'occasion d'un recensement de la vie microbienne dans les sources chaudes et diverses mares du parc de Yellowstone. À leur grand étonnement, les biologistes découvrirent ainsi que la vie existait même dans les sources les plus chaudes, et, vers les années 1960, ils identifièrent le premier extrémophile vivant à des températures supérieures à 70 °C : ils s'agissait de la bactérie *Thermus aquaticus*, dont l'utilisation fut cruciale pour la mise au point de la technique d'amplification de gènes (ou PCR, de l'anglais *polymerase chain reaction*, soit « réaction en chaîne utilisant la polymérase »). Peu après, T. Brock et ses collègues trouvèrent également le premier micro-organisme hyperthermophile dans une source extrêmement chaude et acide : cette archéobactérie, qui a été nommée *Sulfolobus acidocaldarius*, prolifère à des températures atteignant 85 °C. La voie était ouverte vers la recherche de micro-organismes survivant dans l'eau bouillante : on en trouva aussi.

Observant que des bactéries supportent des températures supérieures à celles où vivent les eucaryotes, T. Brock prédit alors que l'on trouverait probablement des micro-organismes partout où de l'eau est sous la forme liquide. De nombreux travaux ont montré qu'il avait raison. Notamment, depuis la fin des années 1970, les biologistes ont identifié les micro-organismes vivant dans les sources chaudes et à proximité immédiate des sources hydrothermales sous-marines, émanations volcaniques, d'où jaillit parfois (dans « les fumeurs noirs ») une solution chargée en minéraux, extrêmement chaude (sa température atteint 350 °C à la bouche des fumeurs).

Plus de 50 espèces d'hyperthermophiles ont été isolées ; beaucoup furent découvertes par Karl Stetter et ses collègues de l'Université de Regensburg. *Pyrolobus fumarii*, le micro-organisme le plus thermorésistant, se développe sur les parois des fumeurs sous-marins. Sa repro-

Jusqu'à quelle température trouvera-t-on la vie? Des «super-hyperthermophiles» prolifèrent-ils à 200 °C ou à 300 °C? Les biologistes ont appris à se méfier, mais ils admettent que la température limite est de l'ordre de 150 °C : au-delà de cette température, les liaisons chimiques qui assurent l'intégrité de l'ADN et des autres molécules essentielles semblent menacées.

Les biochimistes qui s'intéressent aux relations entre la structure des molécules et leur activité essaient de comprendre comment les molécules des micro-organismes thermophiles et des autres extrémophiles restent fonctionnelles, malgré des conditions auxquelles ne résistent pas les molécules analogues

Quelle que soit la raison exacte de leur activité intense dans des conditions extrêmes, les enzymes issues des micro-organismes thermophiles sont déjà largement utilisées par l'industrie. L'exemple le plus remarquable est celui de la polymérase *Taq*, provenant de *Thermus aquaticus* et utilisée pour l'amplification de gènes. Inventée au milieu des années 1980 par Kary Mullis, cette méthode permet d'utiliser l'ADN comme empreinte génétique, mais elle est également devenue indispensable en recherche biologique, pour le diagnostic médical (tel celui des infections par le VIH) et, de plus en plus, pour le dépistage de prédispositions génétiques aux maladies, tels certains cancers.

Pour synthétiser des copies d'un segment d'ADN, on utilise une enzyme de la classe des ADN polymérases ; puis, pour décrocher la polymérase de l'ADN recopié et laisser à l'enzyme la possibilité de synthétiser un nouveau brin d'ADN, on chauffe la solution réactionnelle. Initialement, les polymérases,

Les ingénieurs de la Société *Cetus* analysèrent des échantillons de *Thermus aquaticus* isolés par T. Brock et en purifièrent l'ADN polymérase (la polymérase *Taq*). Sa résistance à la chaleur permit la mise au point d'un système d'amplification de l'ADN entièrement automatique. Plus récemment, certains biochimistes ont remplacé la polymérase *Taq* par une polymérase *Pfu*, isolée de la bactérie hyperthermophile *Pyrococcus furiosus*, qui se développe surtout à des températures voisines de 100 °C.

L'amplification d'ADN n'est que l'une des nombreuses applications des extrémozymes thermophiles. Par exemple, une de ces enzymes assure la production de cyclodextrines, des molécules formées lors de la fermentation de l'amidon. Ces molécules en forme d'abat-jour sont solubles dans l'eau, mais elles peuvent se lier à des molécules insolubles, qui se placent alors en leur centre. On les utilise pour retarder la libération de molécules volatiles, telles celles des arômes alimentaires, pour ralentir la libération de principes actifs de médicaments dans l'organisme, pour réduire l'amertume des aliments ou pour masquer des odeurs désagréables.

Au cours de l'été 1996, des biologistes de plusieurs laboratoires ont achevé l'analyse génétique complète de *Methanococcus jannaschii*, un micro-organisme extrémophile méthanogène qui se développe à des températures voisines de 85 °C. Connaissant ainsi l'enchaînement des diverses sous-unités de l'ADN du micro-organisme, ils ont confirmé que les organismes vivants étaient de trois types, et non réduits aux procaryotes et aux eucaryotes.

composent la lignée des procaryotes ; les cellules de l'autre lignée, celle des eucaryotes, ont leur matériel génétique enfermé dans un noyau (c'est le groupe auquel appartiennent les plantes, les humains et les autres animaux). En comparant les molécules d'ARN riboso-



mal, pour les diverses cellules, Carl Woese avait conclu, en 1977, qu'un groupe de micro-organismes préalablement classés parmi les bactéries, le groupe des archéobactéries, était distinct des procaryotes et des eucaryotes. *Methanococcus jannaschii* est la première archéobactérie dont on a séquencé tous les gènes : 44 pour cent de ses gènes ressemblent à ceux des bactéries ou des eucaryotes ; 56 pour cent sont totalement différents de tout autre gène déjà décrit.

les eucaryotes ont un lointain ancêtre commun. De nombreuses archéobactéries, ainsi que certaines bactéries, sont adaptées aux conditions que l'on imagine identiques à celles de la Terre primitive : des températures élevées et une faible concentration en oxygène. De nombreux biologistes sup-

Le froid, l'acide et la base

Les milieux froids sont plus courants que les milieux chauds. Les océans, dont la température moyenne est comprise entre 1 °C et 3 °C, couvrent plus de la moitié du Globe, et de vastes zones émergées de l'Arctique et de l'Antarctique sont gelées en permanence ou ne dégèlent que pendant quelques semaines, en été. Ces milieux inhospitaliers abritent également des micro-organismes : les bactéries psychrophiles (étymologiquement «qui aiment le froid»).

James Staley et ses collègues de l'Université de Washington ont montré que des micro-organismes variés peuplent l'eau de l'Antarctique, pourtant gelée pendant une grande partie de l'année. De tous les eucaryotes photosynthétiques, algues, diatomées et bactéries récoltés par le groupe de J. Staley, la bactérie *Polaromonas vacuolata* est la plus remarquable : sa température de croissance optimale est de 4 °C, et des températures supérieures à 12 °C sont trop chaudes pour sa reproduction. De tels organismes intéressent les industriels, car ces derniers ont besoin d'effectuer certains traitements à la température des réfrigérateurs : pour modifier des aliments frais, pour limiter l'évaporation des parfums ou pour les lavages à froid.

Les extrémophiles qui se développent en milieu acide ou basique (res-

pectivement nommés acidophiles et alcalinophiles) sont également recherchés. La plupart des milieux naturels terrestres sont neutres, avec un pH compris entre cinq et neuf (le pH se mesure sur une échelle comprise entre 0 et 14; la neutralité correspond au pH égal à sept). Les acidophiles se rencontrent dans les milieux assez rares dont le pH est inférieur à cinq, tandis que les alcalinophiles préfèrent les endroits où le pH est supérieur à neuf.

Les milieux les plus acides résultent surtout d'activités géochimiques, telles que le dégagement de gaz soufrés par les événements hydrothermaux ou par quelques sources chaudes; certains résultent des activités métaboliques de certains acidophiles eux-mêmes. On trouve aussi ces organismes dans les résidus de l'industrie du charbon. Leur tolérance à l'acidité du milieu externe ne s'accompagne pas d'une acidification interne, qui détruirait les molécules importantes, tel l'ADN. Aussi une des clefs de la survie dans les milieux acides tient à la neutralisation du milieu interne, à l'aide de molécules de neutralisation et de molécules qui, restant en contact avec le milieu externe, évitent l'acidification interne; ces deux types de molécules défensives restent opérationnelles en milieu très acide : on a isolé de la paroi et de la membrane de certains acidophiles des extrémozymes qui fonctionnent

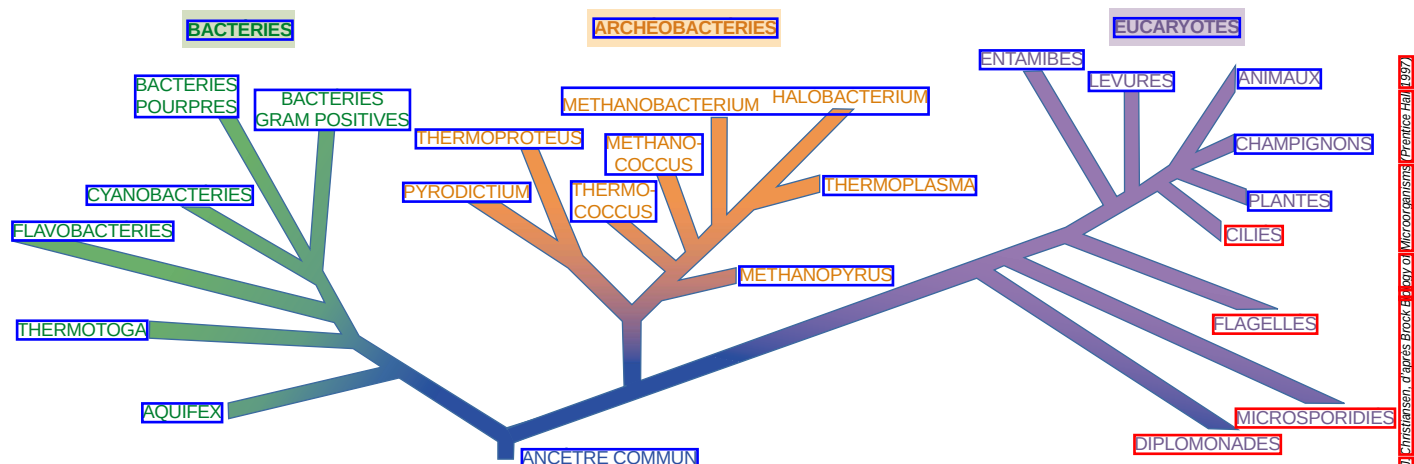
aux pH inférieurs à un (le pH du vinaigre est généralement supérieur à deux, par exemple).

Ces extrémozymes acidophiles sont utiles comme catalyseurs pour la synthèse chimique en solutions acides ou comme additifs pour l'alimentation animale (ils conservent leur activité dans l'estomac des animaux) : elles dissocient des molécules difficiles à digérer, ce qui permet l'emploi de graines bon marché.

Les alcalinophiles, d'autre part, vivent dans les sols riches en carbonates et dans les «lacs salifères», tels ceux que l'on trouve en Égypte, dans la vallée du Rift, en Afrique ou à l'Ouest des États-Unis. Aux pH supérieurs à huit, certaines molécules vitales, notamment les ARN, se dégradent. Aussi, comme les acidophiles, les alcalinophiles maintiennent un pH interne neutre, avec des extrémozymes en surface ou à proximité de la membrane, ainsi que dans les sécrétions des cellules. Plusieurs fabricants de détergents sont intéressés par ces enzymes, car, pour laver efficacement, les détergents doivent éliminer les taches d'origine alimentaire ou autres, ce dont s'acquittent des enzymes comme les protéases (qui dégradent les protéines) et les lipases (qui dégradent les graisses) ; or les protéases et les lipases classiques sont dégradées aux pH de la plupart des lessives. Les versions alcalinophiles de ces enzymes conservent leur activité; plusieurs de celles qui sont

posent donc que ces deux groupes sont apparus les premiers, se différenciant peu de temps après l'apparition de l'ancêtre commun à toutes les formes de vie. Les eucaryotes se seraient ultérieurement séparés des archéobactéries. L'arbre ci-dessous est conforme à cette hypothèse : les micro-organismes hyperthermophiles, tels que *Methanopyrus* (archéobactérie) et *Aquifex* (bactérie), divergent près de la racine de l'arbre.

Les biologistes s'intéressent aujourd'hui beaucoup aux gènes qui n'existent que chez les archéobactéries. Ces gènes codent l'information nécessaire à la synthèse des enzymes et d'autres protéines importantes pour la structure et la fonction cellulaires. De nombreux gènes archéobactériens codent probablement des protéines inconnues, à partir desquelles on veut étudier la vie primitive sur le Globe.



efficaces à chaud ou à froid sont utilisées ou en cours de développement. On étudie également les extrémozymes alcalinophiles pour le délavage des jeans : en dégradant la cellulose et en libérant les colorants fixés aux fibres, certaines enzymes assouplissent et décolorent les tissus, comme si on avait frotté ceux-ci avec des cailloux.

Une existence saumâtre

La liste des extrémophiles ne se limite pas aux thermophiles, aux acidophiles

ou aux alcalinophiles : les halophiles, par exemple, se plaisent dans les milieux extrêmement salés, notamment les lacs salés naturels et les marais salants. Certains de ces milieux salins sont également alcalins, car la dégradation du carbonate de sodium et d'autres sels dégage parfois des ions basiques. Les micro-organismes qui vivent dans ces milieux sont doublement adaptés à la présence de bases et de sels.

Les halophiles présentent des particularités très intéressantes, qui leur évitent de se vider de leur eau interne par le phénomène d'osmose. Normalement, les molécules diffusent, des zones de concen-

tration supérieure vers les zones de concentration inférieure. L'eau, par exemple, migre à travers les membranes cellulaires, de sorte qu'une cellule placée dans une solution très salée perd de l'eau et se déshydrate, à moins que son cytoplasme ne contienne une concentration en sel (ou en autres solutés) supérieure ou égale à la concentration dans le milieu. Les halophiles évitent la dessiccation osmotique en produisant en quantité des solutés internes ou en captant des solutés de leur environnement. Par exemple, l'archéobactérie *Halobacterium salinarum* accumule du chlorure de potassium, et ses enzymes cyto-



2. LES MILIEUX EXTREMES sont parfois très colorés. C'est aux halophiles que les marais salants de la baie de San Francisco doivent leur teinte rosée (à gauche), tandis que des bactéries thermophiles font

briller une source chaude du parc de Yellowstone (à droite). Une lame de verre plongée dans l'une des sources bouillantes de Yellowstone (en haut) s'est immédiatement couverte de nombreux micro-organismes.



3. LA PROSPECTION BIOLOGIQUE impose la fréquentation de milieux inhospitaliers. À gauche, Karl Stetter, de l'Université de Regensburg, examine une source chaude du parc de Yellowstone. À droite,

James Staley, de l'Université de Washington, creuse la glace de l'Antarctique. Les bactéries psychrophiles présentes dans l'échantillon de glace apparaissent sous la forme d'une bande sombre.

Structure modifiée

En France, plusieurs laboratoires s'intéressent aux micro-organismes extrémophiles, notamment à ceux qui vivent dans les sources hydrothermales et autour d'elles, au fond des océans. Les échantillons sont prélevés lors des campagnes de plongée utilisant le *Nautilus*, le sous-marin océanographique de l'IFREMER. C'est lors d'une telle expédition que Daniel Prieur, du Laboratoire de biologie marine de Roscoff, a isolé, de l'intérieur d'un fumeur noir, une nouvelle souche d'archéobactérie hyperthermophile et barophile (adaptée à la pression) qu'il a nommée *Pyrococcus abyssi*. Les conditions optimales de croissance de cet extrémophile sont une température de 96 °C, sous une pression de 200 atmosphères. Au Laboratoire de biochimie des signaux régulateurs cellulaires et moléculaires, nous avons étudié l'enzyme aspartate transcarbamylase de cette bactérie : elle résiste très bien aux températures et pressions élevées. Le clonage de son gène, la modélisation de la structure tridimensionnelle de l'enzyme et sa comparaison avec l'enzyme homologue d'*Escherichia coli* (qui vit à 37 °C) ont mis en évidence des particularités structurales qui doivent être à la base de l'adaptation de la bactérie.

La figure ci-dessous montre la superposition de la structure modé-

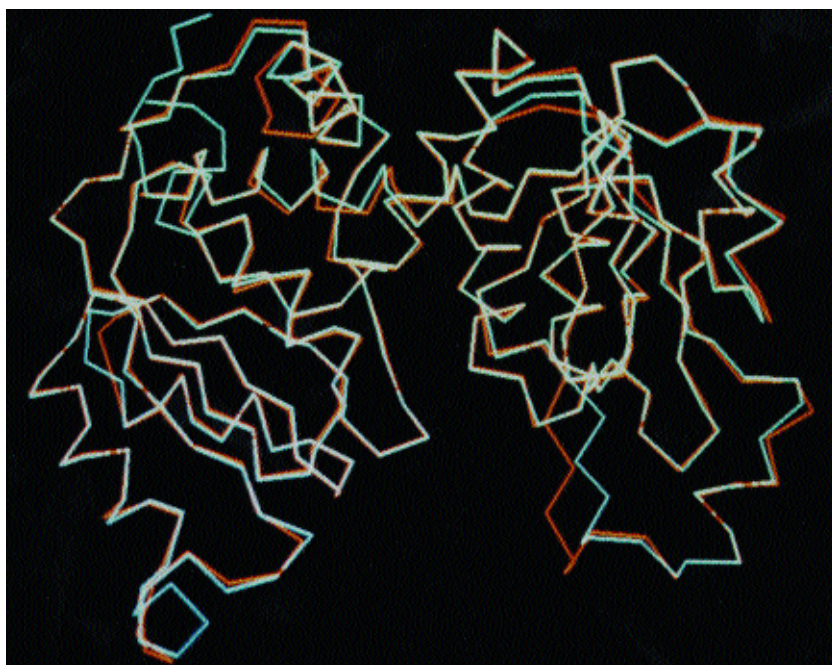
lisée de l'enzyme (en rouge) et de la structure, connue par cristallographie, de la protéine d'*Escherichia coli* (en vert). Des différences sont localisées dans des régions externes, dont on sait qu'elles sont importantes pour les propriétés catalytiques et régulatrices de l'enzyme. La chaîne catalytique de *Pyrococcus abyssi* possède presque deux fois plus d'acides aminés chargés (positivement et négativement) que la chaîne d'*Escherichia coli*. Tous ces acides aminés sont à la surface de la chaîne, ce qui suggère que la stabilisation résulte de l'accroissement de la taille et de la compacité du cœur hydrophobe de cette enzyme, les acides aminés chargés supplémentaires participant plutôt à la stabilisation de la structure quaternaire (l'arrangement des sous-unités).

Le gène codant l'aspartate transcarbamylase de l'espèce voisine *Pyrococcus furiosus* est en cours de séquençage dans le Laboratoire de Nicholas Glansdorff, à Bruxelles. Cette archéobactérie est également une hyperthermophile, mais elle vit à la pression atmosphérique.

Nous effectuons le même type d'analyse pour l'aspartate transcarbamylase d'une bactérie psychrophile et provenant de l'Antarctique.

Guy HERVE

Université Pierre et Marie Curie



plasmiques ne fonctionnent qu'en présence de concentrations élevées de ce sel. Les protéines de ses structures cellulaires en contact avec le milieu extérieur ne sont fonctionnelles qu'en présence de fortes concentrations de chlorure de sodium.

Les enzymes halophiles sont aujourd'hui moins utilisées que d'autres extrémozymes, mais une application au moins est à l'étude : les biochimistes tentent d'utiliser des extrémozymes halophiles afin de mieux récupérer le pétrole des roches.

Pour créer des voies permettant au pétrole piégé dans les roches de passer dans le puits où s'effectue la récupération, les ingénieurs injectent généralement un mélange d'une gomme visqueuse (le guar, qui provient de certaines plantes) et de sable par le puits, puis ils cassent la roche au moyen d'explosifs, poussant simultanément le mélange injecté dans les fissures formées par l'explosion. Le guar facilite la dispersion du sable dans les fentes, de sorte que les grains maintiennent ultérieurement les fissures ouvertes. Comment éliminer la gomme et laisser circuler le pétrole, après cette opération? Une solution consiste à injecter, avant le mélange de gomme et de sable, des enzymes qui dégraderont la gomme : celle-ci conserve sa viscosité le temps que le sable soit charrié jusqu'aux fissures, puis elle est dégradée.

Toutefois les puits de pétrole sont des endroits très chauds et souvent salés, où les enzymes «ordinaires» perdent leurs propriétés. Une extrémozyme fonctionnant de manière optimale à des températures et à des salinités élevées resterait probablement inactive à proximité de la sortie du puits, froide et non salée ; elle deviendrait progressivement active à mesure qu'elle pénétrerait dans le puits, puisque la température augmente avec la profondeur.

Moisson d'extrémozymes

Où trouver les extrémozymes utiles à l'industrie? Classiquement les biologistes de l'industrie isolent les souches de micro-organismes qui contiennent les enzymes utiles, puis ils les cultivent en laboratoire. Toutefois, dans le cas des extrémophiles, ces méthodes sont souvent peu efficaces et coûteuses. Aussi les ingénieurs se sont-ils intéressés à la production d'extrémozymes par des techniques de recombinaison

de l'ADN, qui évitent les cultures d'extrémophiles. Les gènes, constitués d'ADN, codent les enzymes et les diverses protéines des cellules. Aussi, à partir de micro-organismes extrémophiles collectés dans les milieux naturels ou cultivés en laboratoire, on peut former de nombreuses copies des gènes qui codent les enzymes pour, ensuite, synthétiser ces dernières : on introduit les gènes clonés dans des micro-organismes que l'on sait bien cultiver et qui produiront les enzymes en quantités illimitées.

Deux techniques permettent d'identifier des extrémozymes potentiellement efficaces. Tout d'abord, on peut faire de petites cultures d'une bactérie extrémophile récupérée dans un milieu intéressant, puis rechercher des molécules utiles. Par exemple, on cherche des enzymes qui dégradent des protéines en ajoutant à une solution de protéines des extraits des cultures de cellules ; quand on observe une dégradation, on isole les enzymes responsables de cette activité, ainsi que les gènes qui codent ces enzymes, en espérant que ces gènes pourront être introduits dans des cellules qui les exprimeront.

On peut aussi isoler directement l'ADN d'échantillons d'eau, de terre ou de tout autre prélèvement provenant d'un milieu extrême. Puis, par des techniques de recombinaison de l'ADN, on introduit des segments d'ADN sélectionnés au hasard dans des cellules domestiquées (idéalement on n'introduit qu'un fragment par cellule) et l'on teste les colonies issues des cellules modifiées, à la recherche d'activités enzymatiques. Quand une nouvelle activité apparaît, on sait qu'elle provient d'un gène inséré. Cette méthode évite les nombreuses manipulations du procédé classique et ne sélectionne que les enzymes qui pourront, ultérieurement, être produites par des cultures de cellules domestiquées. En outre, elle procure les gènes qui codent ces enzymes sans imposer des cultures d'extrémophiles, généralement très difficiles.

Bien que la diversité des micro-organismes soit considérable, on trouve difficilement les enzymes parfaitement adaptées aux tâches qu'on veut leur confier. Aussi les enzymologues les plus en pointe modifient aujourd'hui les extrémozymes, afin de leur donner des activités sur mesure. Par exemple, après avoir découvert une extrémozyme qui dégrade efficacement des

protéines à haute température, ils sont intervenus afin de la faire fonctionner dans une gamme plus étendue d'acidité et de salinité.

Aujourd'hui, les biologistes effectuent ces transformations de deux façons. Les partisans de la «méthode rationnelle» cherchent d'abord la base structurale d'une propriété donnée ; puis ils modifient le gène de l'enzyme afin que la protéine catalytique qui en résultera détienne, à coup sûr, cette propriété. Les partisans de l'autre approche, nommée évolution dirigée, font varier de façon plus ou moins aléatoire le gène codant une enzyme choisie, et, à partir des gènes modifiés ainsi obtenus, ils fabriquent des milliers de versions différentes de cette enzyme. Ils testent alors l'ensemble pour déceler si l'une des versions a acquis le caractère escompté. Cette dernière stratégie est «edisonnienne», car lorsque Thomas Edison rechercha des matériaux pour confectionner les filaments d'ampoule électrique, il testa tous les matériaux à sa disposition, de l'éclat de bambou jusqu'au fil de soie.

Aujourd'hui les extrémozymes utilisées dans l'industrie sont peu modifiées, mais les deux approches, rationnelle et edisonnienne, produiront certainement des enzymes mieux adaptées aux tâches qu'on leur confie. Par ces mêmes méthodes, on étudie d'ailleurs la transformation d'enzymes ordinaires en extrémozymes artificielles.

Michael MADIGAN est professeur de microbiologie à Carbonsdale (Illinois). Barry MARRS est directeur de la Société *Photosynthetic Harvest*.

M.W.W. ADAMS et R.M. KELLY, *Enzymes Isolated from Microorganisms That Grow in Extreme Environments*, in *Chemical and Engineering News*, vol. 73, n° 51, pp. 32-42, 18 décembre 1995.

Extremophiles, numéro spécial de *Federation of European Microbiological Societies (FEMS) Microbiology Reviews*, vol. 18, nos 2-3, mai 1996.

K.O. STETTER, *Hyperthermophiles in the History of Life*, in *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*, sous la direction de Gregory R. Bock et Jamie A. Goode, John Wiley & Sons, 1996.

Michael T. MADIGAN, John M. MARTINKO et Jack PARKER, *Brock Biology of Microorganisms*, huitième édition, Prentice Hall, 1997.



Jules Verne, visionnaire incompris

ARTHUR EVANS • RON MILLER

La découverte d'un manuscrit longtemps égaré révèle que le père de la science-fiction se préoccupait des dangers de la science et de la technique.

Près d'un siècle après sa mort, Jules Verne fait à nouveau rêver les lecteurs du monde entier, avec un roman jusqu'ici inédit, *Paris au XX^e siècle*. Achèvement en 1863, ce manuscrit était resté dans un coffre-fort, dont il n'a été sorti qu'en 1989 par l'arrière-petit-fils de l'auteur. Homme du XIX^e siècle, Verne peint une aventure humaine dans un monde où règnent des gratte-ciel de verre et d'acier, des trains à grande vitesse, des automobiles à moteur à combustion, des ordinateurs, des télécopieurs et un réseau mondial de communications. Le Verne qui avait présenté à ses lecteurs nombre de merveilles techniques, des sous-marins aux hélicoptères, ne déçoit pas ici.

Toutefois, le nouvel ouvrage ne fait pas l'apologie du progrès scientifique : *Paris au XX^e siècle* est une tragédie montrant la vie d'un jeune homme idéaliste qui lutte pour trouver le bonheur dans le monde féroce et matérialiste qu'est devenu Paris vers 1960. Comme en 1984 de George Orwell, ce roman de Verne est un commentaire lugubre et troublant sur le coût humain du progrès technique.

Adressé par Jules Verne, ce message surprend. Beaucoup de ses lecteurs supposent qu'il a vanté les merveilles de la technique, parce qu'il était lui-même un scientifique optimiste. Beaucoup croient aussi qu'il a écrit, principalement pour des enfants, des histoires sans profondeur. Le mythe s'est imposé, éclipsant l'homme.

En fait, Verne n'était ni un scientifique ni un ingénieur : c'était un écrivain, et des plus prolifiques : au cours de sa vie, Verne écrivit plus de 60 romans, méticuleusement fondés sur la réalité, qui inspirèrent de nombreux scientifiques, ingénieurs, inventeurs et explorateurs, tels William Beebe (le créateur et pilote de la première bathysphère), l'amiral Richard Byrd (un pionnier de l'exploration de l'Antarctique), Youri Gagarine (le premier homme ayant volé dans l'espace) et Neil Armstrong (le premier astronaute ayant marché sur la Lune).

Bien que des œuvres aux fondements scientifiques aient été écrites avant les siennes, Verne éleva la technique de la vraisemblance scientifique au rang d'art. Ce type de science-fiction, fondée sur des descriptions minutieuses des progrès scientifiques et techniques, a ensuite dominé le genre. Toutefois l'attachement de Verne aux détails techniques ne résulte pas d'une confiance aveugle dans les vertus de la science. Ses premiers écrits, pièces, essais ou nouvelles, étaient des critiques de la science et de la technique.

C'est son éditeur, Pierre-Jules

Hetzel, qui poussa Verne vers le récit narratif qui le rendit célèbre : des aventures au rythme rapide, didactiques et optimistes. Sans

partager cette idée, Verne résista peu à Hetzel. Après la parution de son premier livre en 1863 (le premier d'une série de romans publiés sous le titre *Voyages extraordinaires* : *Voyages dans les mondes connus et inconnus*), Verne expliqua à ses amis de la Bourse (où il avait été associé à une agence de change) : « Mes amis, je vais vous quitter. J'ai eu l'idée, celle que tout homme, selon Girardin, devrait avoir une fois par jour, et que j'ai eue, moi, une seule fois dans ma vie, l'idée qui doit faire ma fortune. Je viens d'écrire un roman d'une forme nouvelle, bien à moi. S'il réussit, ce sera le filon de la mine d'or. » Ce fut effectivement le filon.

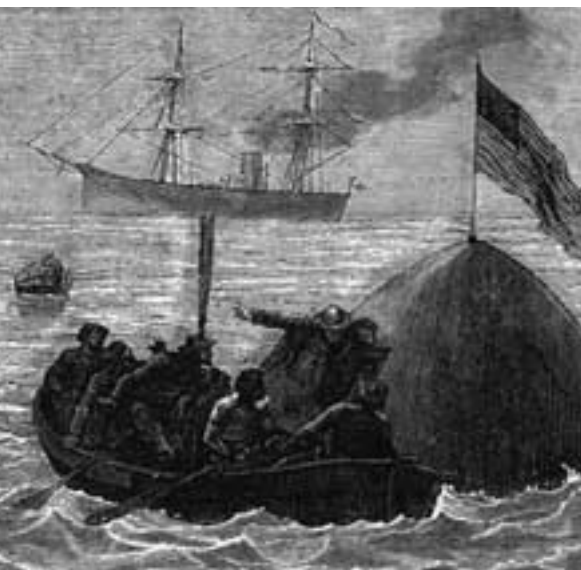
Tant qu'il fut guidé par Hetzel, Verne écrivit des romans qui étaient tous du même type. Cependant, après

Mais, que les Américains prennent garde de se livrer à une destruction exagérée !... Peu à peu les baleines deviendront rares sur ces mers du sud, et il faudra les pourchasser jusqu'au-delà des banquises.

Le Sphinx des glaces

1. UNE FORMATION ROCHEUSE en forme de lion couché à tête humaine surgit au-dessus de la mer tumultueuse dans *Le Sphinx des glaces*, l'histoire d'un voyage dans l'Antarctique fondé sur *Les aventures d'Arthur Gordon Pym*, d'Edgar Allan Poe. Verne y explique comment la chasse excessive menace les baleines d'extinction.





2. L'AMERRISSAGE décrit dans *Autour de la Lune* (à gauche) ressemble beaucoup à celui qui eut véritablement lieu quand *Apollo 11* (à droite) revint de la Lune, en 1969.

la mort de l'éditeur, en 1886, il revint à ses idées initiales, prônant l'écologie, critiquant le capitalisme, appelant à plus de responsabilité sociale et doutant des avantages réels de la science et de la technique. Comment Verne est-il alors passé pour un adepte des sciences et des techniques ?

Ambitions littéraires

Jules Gabriel Verne est né le 8 février 1828 à Nantes, ville alors prospère. Lorsqu'il eut 18 ans, sa famille l'envoya à Paris pour lui faire suivre les traces de son père, avoué. Toutefois le jeune homme avait d'autres idées. Il acheva ses études de droit, mais il était attiré par le monde littéraire parisien ; encouragé par Alexandre Dumas père et fils, qui étaient ses amis, il rêvait de célébrité littéraire. Sa licence de droit passée, il commença à composer des poèmes et des pièces.

Secrétaire du Théâtre lyrique, il vécut d'abord de leçons, puis il rédigea de courts articles et des nouvelles sur des sujets de science et d'histoire pour un magazine populaire, *Le Musée des familles* : il sélectionnait les bases de ces reportages au cours de longues consultations de livres, de revues scientifiques et de journaux, en bibliothèque. Et, naturellement, il pensa rapidement à utiliser cette documentation technique dans un « roman de la science » qui mêlerait la fiction et les faits, l'aventure et les principes scientifiques. Verne voulait que ce genre nouveau tienne de la fiction à la Feni-

more Cooper, à la Walter Scott et à la Edgar Poe, mais qu'il présente les plus récentes découvertes, explorations et expériences de son époque.

Il comptait ainsi bénéficier de l'engouement du public français pour la science, la technique et l'exploration : pendant cette période d'industrialisation et d'expansion technique rapides, les scientifiques et les ingénieurs étaient devenus les nouveaux héros populaires. Cette mode, à une époque où les sciences étaient peu enseignées dans les écoles publiques (en raison de la longue tutelle de l'Église), avait suscité une forte demande du public.

La méthodologie du premier roman de Verne, *Cinq semaines en ballon*, fut reprise pour tous les romans ultérieurs. Le romancier trouvait lui-même ses idées littéraires, mais il discutait de ses projets avec de nombreux amis et relations. Il consultait notamment son cousin Henri Garcet (un mathématicien), Jacques Arago (explorateur, frère de l'astronome et physicien François Arago) et Félix Tournachon, plus connu des Parisiens sous le pseudonyme de Nadar.

Pionnier de la photographie, aéronaute et président de la *Société d'encouragement pour la locomotion aérienne au moyen d'appareils plus lourds que l'air*, Nadar intéressa Verne aux projets de conquête de l'air et l'introduisit dans son propre cercle d'amis où entraient des ingénieurs aussi éminents que Jacques Babinet, l'inventeur du premier instrument de mesure de l'hu-

midité, et Gabriel La Landelle, dont le projet d'hélicoptère servit ultérieurement de modèle à l'une des machines fictives de Verne. Les discussions avec Nadar et ses amis aidèrent le romancier à rassembler les connaissances techniques qui furent utilisées dans le premier roman.

Verne s'inspira également d'événements de l'époque. Les récits de voyages en ballon, réels ou fictifs, s'étaient popularisés au cours des années 1850 et au début des années 1860. Les journaux français rapportant des découvertes étranges et exotiques en Afrique avaient intéressé un vaste lectorat, qui suivait de près les aventures d'explorateurs intrépides dans ce vaste continent encore mal connu. Verne vit dans ces récits le cadre idéal pour son premier roman d'aventures scientifiques.

Peu après en avoir achevé le manuscrit, en 1862, il eut la chance de rencontrer Hetzel. Verne lui demanda aussitôt s'il voudrait publier l'histoire provisoirement intitulée *Un voyage en l'air* (que son auteur avait été près de détruire, après un refus par une autre maison d'édition). Hetzel accepta et, quelques semaines plus tard, Verne et Hetzel entamèrent une collaboration qui allait durer un quart de siècle. Les textes de Verne (sauf *Cinq semaines en ballon*) furent d'abord publiés dans le nouveau journal de Hetzel, *Le Magazine d'Éducation et de Récréation*.

Dans l'espoir d'obtenir en Angleterre un succès analogue à celui qui avait été rencontré en France, le pério-

dique *The Boy's Own Paper* traduisit les textes publiés par Hetzel. Ces récits eurent un succès immédiat et durable auprès des jeunes lecteurs anglais, mais cette popularité eut des inconvénients : les traductions, hâtives, étaient souvent expurgées de la majeure partie de la science et ne conservaient que les passages les plus sensationnels des textes originaux. Et Verne ne fut connu, jusqu'à aujourd'hui, des lecteurs anglophones que par ces traductions bâclées.

Enfin célèbre

En 1864, deux ans après avoir rencontré Hetzel, Verne écrivit son *Voyage au centre de la Terre*, l'histoire qui eut le plus de succès. Il avait observé l'intérêt croissant du public pour la géologie, la paléontologie et les théories de l'évolution. Narré à la première personne par le jeune protagoniste, Axel, le *Voyage au centre de la Terre* maintient un bon équilibre entre les rêveries poétiques du narrateur et les observations scientifiques détaillées de son oncle, le professeur Lidenbrock, alors qu'ils descendent dans les profondeurs de la Terre et découvrent un monde préhistorique souterrain. Ces entrelacs de faits réels et imaginaires constituent le fondement de la stratégie narrative de Verne.

L'année suivante, Verne publie *De la Terre à la Lune*. Rompant avec la tradition littéraire qui exigerait de raconter un tel voyage comme une entreprise imaginaire, Verne extrapole seulement des principes scientifiques admis à son époque, donnant une vision prophétique troublante : l'aire de lancement choisie est peu éloignée de Cap Canaveral, l'ancienne base américaine de lancement de fusées, en Floride ; il indique aussi la vitesse initiale nécessaire pour échapper à la gravité terrestre. Dans la suite, *Autour de la Lune*, Verne décrit correctement les effets de l'apesanteur et la rentrée brûlante de la capsule dans l'atmosphère, avec un amerrissage dans l'océan Pacifique, qu'il situe à deux kilomètres seulement de l'endroit où *Apollo 11* amerrit, à son retour de la Lune, en 1969.

Naturellement certaines de ces prévisions se sont peut-être «auto-accomplies», tant sont nombreux

les scientifiques et les ingénieurs spatiaux (tels Hermann Oberth et Konstantin Tsiolkovski) qui ont lu les récits de Verne. L'astronautique moderne se serait probablement développée plus lentement si Verne n'avait pas écrit ses deux romans. Soucieux des principes scientifiques, Verne rencontra les mêmes problèmes techniques qu'affrontèrent les ingénieurs astronautiques du siècle suivant. Que les solutions retenues par Verne soient similaires aux solutions modernes n'est donc pas surprenant.

Néanmoins les écrits de Verne contiennent aussi quelques erreurs scientifiques. Sa plus grande erreur, dans *De la Terre à la Lune*, fut de proposer un lancement de l'engin spatial à l'aide d'un canon gigantesque au lieu de fusées. Ce choix illogique semble avoir été voulu : quelques remarques très sceptiques, dans le roman, indiquent que Verne ne croyait pas à son canon géant. Toutefois, la technique de

lancement par des fusées était alors si rudimentaire qu'il supposa que ses lecteurs admettraient plus facilement la notion de canon lunaire géant, et il ne résista probablement pas à l'envie de se moquer de la féroce concurrence entre les fabricants américains d'artillerie après la guerre de Sécession, fil humoristique qui guide toute la lecture de *De la Terre à la Lune*, d'*Autour de la Lune* et de *Sans dessus-dessous*.

Verne commença sa première nouvelle nautique alors qu'il était installé sur le bateau qu'il avait acheté en 1868 pour croiser sur la Somme et au large des côtes françaises. Un an plus tard, il achevait *Vingt mille lieues sous les mers*, le premier roman fondé sur l'océanographie. Le pouvoir imaginaire de cette saga sous-marine, dont l'une des vedettes est le *Nautilus* (ainsi dénommé d'après le sous-marin *Le Nautil* que Robert Fulton avait construit à Paris en 1800), a fait de ce récit l'un des plus lus et des plus admirés.

Comment survint ce dépeuplement ? De l'extermination des indigènes par la guerre, de l'enlèvement des hommes adultes pour travailler dans les plantations péruviennes, de l'abus d'alcools forts, et – pourquoi ne pas l'avouer ? – de tous les maux que la conquête apporta à ces îles quand les conquérants appartenaient aux races dites civilisées.

L'île à hélice (1895)



UNE ÎLE TROPICALE est en proie à la violence dans *L'île à hélice*, l'un des nombreux récits écrits après la mort de Pierre-Jules Hetzel, qui fut l'éditeur exclusif de Verne jusqu'au rachat de la maison Hetzel par Hachette.

Sa rédaction fut mouvementée, parce que le capitaine Nemo fut un sujet de grave désaccord entre Hetzel et Verne. L'éditeur voulait justifier les attaques de navires par une position idéologique du capitaine, qui aurait été un adversaire de la traite des esclaves. Verne, lui, voulait que Nemo soit un Polonais haïssant le tsar de Russie (la répression russe de l'insurrection polonaise, cinq ans avant la publication du roman, avait été terrible), mais Hetzel était très préoccupé d'une éventuelle interdiction du livre en Russie, où il espérait vendre les livres de Verne.

Auteur et éditeur finirent par décider que les motivations de Nemo resteraient mystérieuses : celui-ci serait seulement un champion de la liberté et un défenseur des opprimés. Pour les besoins du film tiré de l'œuvre, en 1954, les scénaristes décidèrent que Nemo lutterait contre les fabricants d'armes.

Un autre film fut tiré du *Tour du monde en quatre-vingts jours*, le roman de Verne qui eut le plus de succès. Publiée en 1872, cette histoire s'en tient aux moyens de transport existants. Verne en trouva l'idée dans une relation de voyage qui avait paru en France après l'ouverture du canal de Suez, dans une brochure promotionnelle

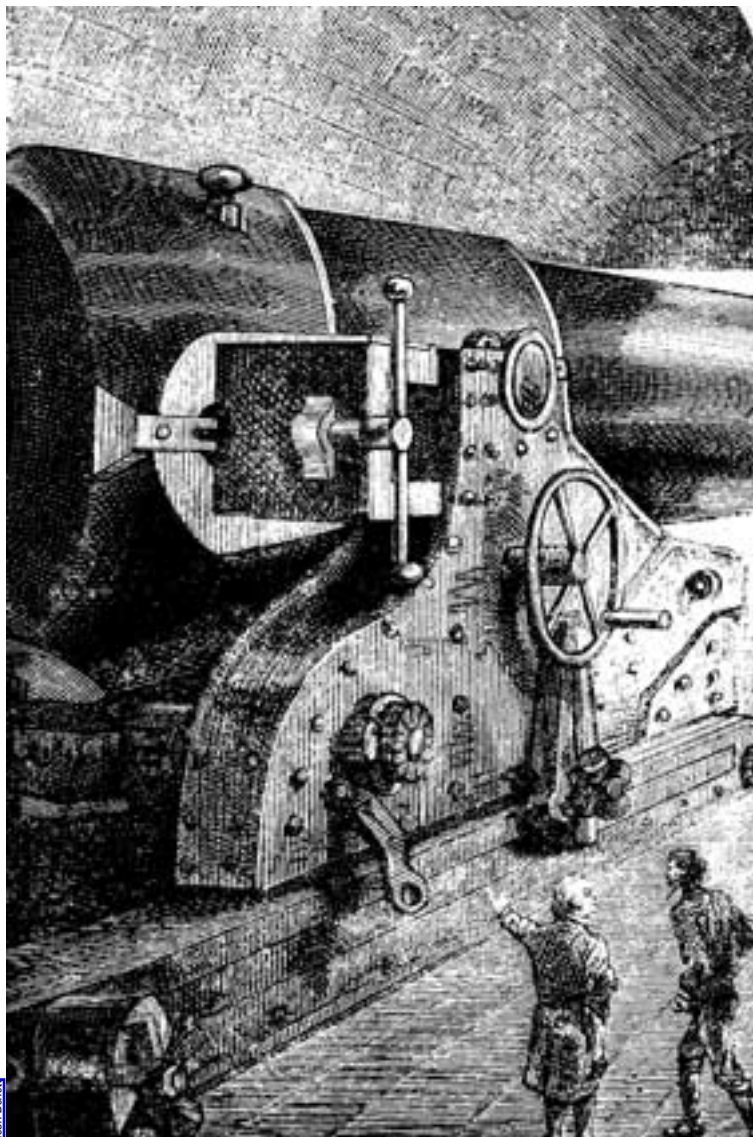
de l'agence de voyages Thomas Cook et dans une nouvelle de Poe intitulée *Trois dimanches dans la même semaine*, où il notait déjà qu'une personne voyageant autour du Globe vers l'Est gagnerait une journée en passant la ligne de changement de date.

Dans *Le Tour du monde en quatre-vingts jours*, Verne décrit comment un Anglais flegmatique et son serviteur plein de ressources se dépêchent de faire le tour du monde, malgré une foule d'aventures qui les retardent. Le roman fut initialement publié sous forme de feuilleton dans un journal parisien, ce qui tripla presque la diffusion ; puis la publication du livre complet, quelques semaines après la publication du dernier épisode, assura des ventes records, en France et à l'étranger. La renommée de Verne culmina quand des célébrités telles que Nellie Bly, Jean Cocteau et S.J. Perelman tentèrent ensuite de faire vraiment le tour du monde en moins de 80 jours.

Les huit œuvres suivantes furent toutes de la même veine que le *Tour du monde en quatre-vingts jours* ; puis Verne publia en 1879 un curieux roman, *Les Cinq cents millions de la Bégum*, qui rappelle les premiers écrits de l'auteur et annonce la vision plus critique de la science et de la technique qu'il reprendra après la mort de Hetzel. Ce roman raconte l'histoire de deux personnages symboliques, le docteur Sarrasin, français, et Herr Schultze, allemand, qui reçoivent chacun un énorme héritage avec lequel ils doi-

«Obus-fusée de verre, revêtu de bois de chêne chargé, à soixante-douze atmosphères de pression intérieure, d'acide carbonique liquide. La chute détermine l'explosion de l'enveloppe et le retour du liquide à l'état gazeux. Conséquence un froid d'environ cent degrés au-dessous de zéro dans toute la zone avoisinante, en même temps mélange d'un énorme volume de gaz carbonique à l'air ambiant. Tout être vivant qui se trouve dans un rayon de trente mètres du centre d'explosion est en même temps congelé et asphyxié. Je dis trente mètres pour prendre une base de calcul, mais l'action s'étend vraisemblablement beaucoup plus loin, peut-être à cent et deux cent mètres de rayon ! Circonstance plus avantageuse encore, le gaz acide carbonique restant très longtemps dans les couches inférieures de l'atmosphère, en raison de son poids qui est supérieur à celui de l'air, la zone dangereuse conserve ses propriétés septiques plusieurs heures après l'explosion, et qui tout être qui tente d'y pénétrer périt infailliblement. C'est un coup de canon à effet à la fois instantané et durable !... Aussi, avec mon système, pas de blessés, rien que des morts !» Herr Schultze éprouvait un plaisir manifeste à développer les mérites de son invention.

Les Cinq cents millions de la Bégum (1879)



4. L'ARME GEANTE construite par Herr Schultze, dans *Les Cinq cents millions de la Bégum*, publié en 1879, présume le fanatisme qui fondera sur l'Europe au siècle suivant.

vent construire une ville idéale dans les contrées sauvages du Nord-Ouest américain. Sarrasin construit une cité utopique paisible, tandis que Schultze érige une entreprise aux allures de forteresse où l'on fabrique des armes de pointe. Bien dans l'esprit de son temps (on sortait de la guerre de 1870), ce roman montre pour la première fois, avec Herr Schultze, un scientifique œuvrant pour le mal.

Préfigurant Hitler, Schultze affiche des convictions fanatiquement racistes et prône l'extermination des éléments les plus faibles de la race humaine et l'ascension glorieuse d'une nouvelle classe dirigeante : «l'*Übermensch* technique». Pour la première fois, Verne montre que la puissance de la technique peut engendrer la corruption et que la connaissance scientifique peut devenir diabolique quand elle est entre les mains de personnes méchantes.

Le public français accueille fraîchement le roman. Alors qu'il se vendait entre 35 000 et 50 000 exemplaires des autres ouvrages, dans les premières années après leur publication (*Le Tour du monde en quatre-vingts jours* se vendit à 108 000 exemplaires), *Les Cinq cents millions de la Bégum* n'atteignent que la moitié des lecteurs habituels : ceux-ci n'adhèrent apparemment pas au pessimisme scientifique de Verne.

Pourtant Verne continue dans cette veine. Il reprend des thèmes moraux et



5. UNE SCÈNE CLEF de Hector Servadac, de Jules Verne, fait la couverture de la première parution du magazine américain de science-fiction *Amazing Stories*, publié pour la première fois à New York en avril 1926.

invente souvent des personnages qui n'ont plus de rapport avec la science ; les quelques scientifiques qui restent sont, de plus en plus souvent, des fous mégalomanes.

Verne essaye aussi de faire connaître certains abus sociaux et environnementaux contemporains. Par exemple, dans *L'Île à hélice*, il décrit le fléau des politiciens et des missionnaires qui détruisent les cultures indigènes de diverses îles polynésiennes. Dans *Le Sphinx des glaces*, il met en garde contre l'extinction imminente des baleines. Dans *Le Testament d'un excentrique*, il signale la pollution causée par l'industrie du pétrole, et, dans *Le Village aérien*, il dénonce le massacre des éléphants pour leur ivoire.

La transformation littéraire de Verne transparait encore plus nettement quand il reprend des œuvres écrites au début de sa carrière. Ainsi, dans *Sans dessus dessous*, volet final d'une trilogie commencée avec *De la Terre à la Lune*, les personnages de Verne ne se contentent plus d'envoyer des capsules habitées dans l'espace ; ils cherchent à modifier l'inclinaison de la Terre à l'aide d'un canon gigantesque. Totalement indifférents aux catastrophes écologiques et humaines qui résulteraient d'un tel projet, ils veulent faire fondre la calotte polaire pour mettre à jour ses immenses richesses minières. Les protagonistes de ce

roman sont des caricatures dont Verne expose l'irresponsabilité et l'orgueil.

De l'homme au mythe

Malgré des difficultés familiales, une santé déclinante et la mort du frère qu'il aimait tant, Verne continue de composer deux ou trois romans chaque année jusqu'à la fin de sa vie. Toutefois ces derniers écrits lui rapportent peu. *L'Île à hélice* et *Le Sphinx des glaces*, par exemple, sont vendus à moins de 10 000 exemplaires. Certains de ses derniers romans, comme *Le Superbe Orénoque*, *Les Frères Kip*, *Bourses de voyage* et *L'Invasion de la mer*, n'atteignent même pas les 5 000 exemplaires, pour la première édition.

Avec un tiroir plein de manuscrits inachevés dans son bureau, Verne se sent mal quelques semaines avant son 78^e anniversaire. Lucide jusqu'à la fin, il demande à sa femme, Honorine, de rassembler la famille autour de lui et il meurt paisiblement le 24 mars 1905. Il est enterré près de son domicile, à Amiens, et deux ans plus tard, une sculpture commémorative est placée sur sa tombe. Elle montre Verne sortant de sa tombe, un bras tendu vers les étoiles.

Deux décennies après sa mort, un périodique américain intitulé *Amazing Stories* – le premier magazine entièrement consacré aux histoires de science et d'aventures – utilise une représentation de la tombe de Verne comme logo. Pour décrire ces récits, l'éditeur, Hugo Gernsback, inventa le terme «scientifiction» qui devint plus tard science-fiction. Et progressivement, Verne resta connu pour sa vision optimiste du progrès scientifique.

Arthur EVANS est l'éditeur de la revue *Science-Fiction Studies*. Ron MILLER est illustrateur scientifique.

Arthur B. EVANS, *Jules Verne Rediscovered*, Greenwood Press, 1988.

William BUTCHER, *Jules Verne's Journey to the Centre of the Self*, St. Martin's Press, 1991.

Paul K. ALKON, *Science Fiction Before 1900*, Twayne, 1994.

Brian TAVES et Stephen MICHALUK, *The Jules Verne Encyclopedia*, Scarecrow Press, 1996.

Herbert LOTTMAN, *Jules Verne : An Exploratory Biography*, St. Martin's Press, 1997.

Votes étranges et paradoxaux

JEAN-PAUL DELAHAYE

Manipulation d'informations confidentielles lors des opérations de vote.

Condorcet, illustre encyclopédiste et démocrate convaincu du *Siècle des lumières*, a montré qu'à des élections à la majorité simple A peut battre B (dans un vote opposant A à B), B peut battre C (dans un vote opposant B à C) et C peut battre A (dans un vote opposant A à C). La situation la plus simple créant ce paradoxe ne fait intervenir que trois électeurs, le premier ayant pour ordre de préférence A B C, le second B C A et le troisième C A B. Comment être juste en matière électorale ? s'interrogeait Condorcet.

Notre intuition d'électeur est souvent mise en défaut. Certains paradoxes naissent de l'arithmétique des systèmes de votes, que nous maîtrisons mal. D'autres font intervenir la manipulation d'informations confidentielles qui autorise des opérations imprévues ou même à première vue impossibles. Les trois exemples qui suivent illustrent les difficultés de la démocratie : pour vous donner la possibilité de jouer, nous les présentons sous forme d'énigmes.

1. A UN LOGICIEN RIEN D'IMPOSSIBLE

Une assemblée composée d'un nombre impair de logiciens a été capturée par le *grand méchant logicien* qui veut les enrôler dans sa secte. Il leur laisse une chance d'échapper à l'embrigadement. Il dessine dans le dos de chacun d'eux une croix noire ou une croix rouge en procédant au hasard (il s'aide d'une pièce de monnaie qu'il jette en cachette). Chaque logicien voit les croix dessinées sur le dos des autres logiciens, mais ne voit pas celle qu'il porte. Aucune communication n'est permise entre les logiciens. Un scrutin est organisé, et chaque logicien vote pour indiquer s'il pense qu'il y a un nombre pair de croix rouges au total, ou un nombre impair de croix rouges au total. L'abstention n'est évidemment pas permise.

Le *grand méchant logicien* comptabilise les réponses et considère la réponse

majoritaire (il y en a une, puisque le nombre de logiciens capturés est impair). Si le vote majoritaire est correct, les logiciens sont libérés et peuvent aller s'amuser à traiter toutes les énigmes et paradoxes qu'ils trouvent intéressants ; sinon, ils sont condamnés à servir d'esclaves au *grand méchant logicien*, qui les oblige à trouver des applications à la «logique planaire» inventée par lui et qu'il considère comme la trouvaille du siècle.

Chaque logicien se dit : «Puisque la parité du nombre total de croix rouges dépend de celle que j'ai dans le dos, qui a été tirée au hasard, je ne peux rien faire de mieux que voter au hasard. Il en est de même de tous les autres logiciens, et donc globalement nous ne pouvons rien espérer de mieux qu'être libérés une fois sur deux.»

Aussi étonnant que cela paraisse, il existe une méthode de vote que les logiciens peuvent deviner et appliquer et qui leur permettra d'être libérés dans bien plus de la moitié des cas. Quelle est cette méthode ?

Solution

Imaginons que tous les logiciens adoptent la règle suivante :

«Je suppose que j'ai dans le dos une croix de la couleur majoritairement présente devant moi et je vote conformément à la parité de ce décompte. Si je vois sur le dos des autres logiciens autant de croix noires que de croix rouges, je vote sur la parité en faisant l'hypothèse que j'ai dans le dos une croix rouge.»

Pour analyser l'effet d'une telle méthode, distinguons trois cas.

Cas 1. Si l'écart entre le nombre de croix rouges et le nombre de croix noires est supérieur à un (par exemple, six rouges et trois noires), alors les logiciens font en majorité une hypothèse correcte et donc trouvent la bonne réponse. Le vote majoritaire est alors correct et les logiciens sont libérés.

Cas 2. Si l'écart entre le nombre de croix rouges et le nombre de croix noires est de un en faveur des rouges (par

exemple, cinq rouges et quatre noires), alors d'une part tous les porteurs de croix noires (qui voient plus de rouges que de noires) votent faussement, puisqu'ils font l'hypothèse fausse qu'ils portent une croix rouge ; d'autre part, tous les porteurs de croix rouges, qui voient autant de rouges que de noires, votent correctement (puisque, dans un tel cas, ils font l'hypothèse qu'ils portent une croix rouge). Les rouges étant majoritaires, le vote est majoritairement correct et les logiciens sont libérés.

Cas 3. Si l'écart entre le nombre de croix rouges et le nombre de croix noires est de un en faveur des noires (par exemple, quatre rouges et cinq noires), alors tous les porteurs de croix rouges (qui voient plus de noires que de rouges) votent faussement (ils font une mauvaise hypothèse), ainsi que tous les porteurs de croix noires qui voient autant de rouges que de noires (et qui font injustement l'hypothèse qu'ils portent une croix rouge). Donc le vote est erroné (à 100 pour cent). C'est le seul cas où le vote est erroné. Les cas 2 et 3 se compensent et, dans la majorité des situations (grâce au cas 1), les votes des logiciens sont corrects.

Pour évaluer plus précisément le nombre de cas où le vote sera malheureux, considérons le nombre de logiciens m . Ce nombre peut s'écrire $m = 2n + 1$ (car m est impair). Le nombre de cas où le vote est incorrect est le nombre de cas où il y a n croix rouges et $n + 1$ croix noires. Ce nombre est précisément $(2n + 1)!/[n!(n + 1)!]$ (nombre de façons de choisir n éléments parmi $2n + 1$). Il y a 2^m cas possibles au total (deux façons de peindre la croix du premier logicien, deux façons de peindre la croix du deuxième logicien, etc.). Les résultats pour 3, 5, 7, 9, 15 et 25 logiciens sont donnés sur la figure 2.

Plus le nombre de logiciens est grand, meilleure est la méthode, et d'ailleurs on montre que, lorsque m tend vers l'infini, le rapport du nombre de cas défavorables sur le nombre total de cas tend vers zéro.

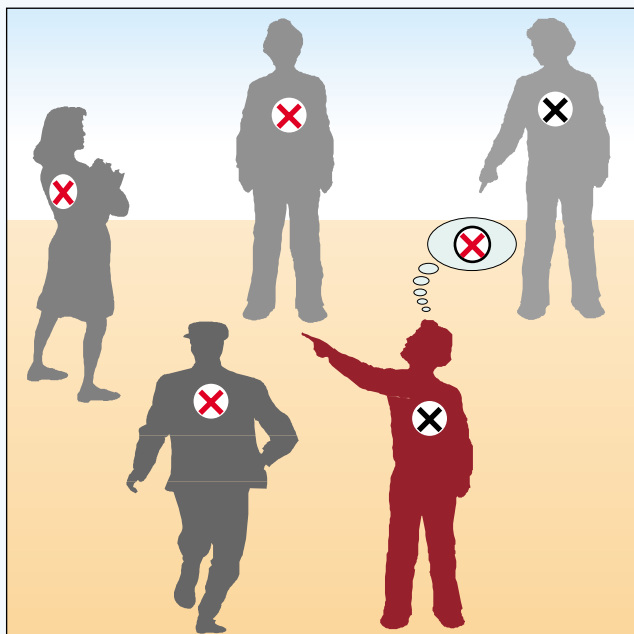
On peut critiquer cette solution en remarquant que les logiciens, s'ils n'ont pas pu s'entendre avant l'épreuve et aussi intelligents soient-ils, n'ont pas de raisons d'adopter tous la même stratégie qui donne un rôle particulier au rouge par rapport au noir. Il est plus raisonnable de penser que la moitié des logiciens à peu près adopte la méthode :

A. «Si je vois devant moi autant de croix noires que de croix rouges, je vote en faisant l'hypothèse que j'ai dans le dos une croix rouge. Sinon, je suppose que j'ai dans le dos une croix de la couleur majoritairement présente devant moi et je vote conformément à cette hypo-

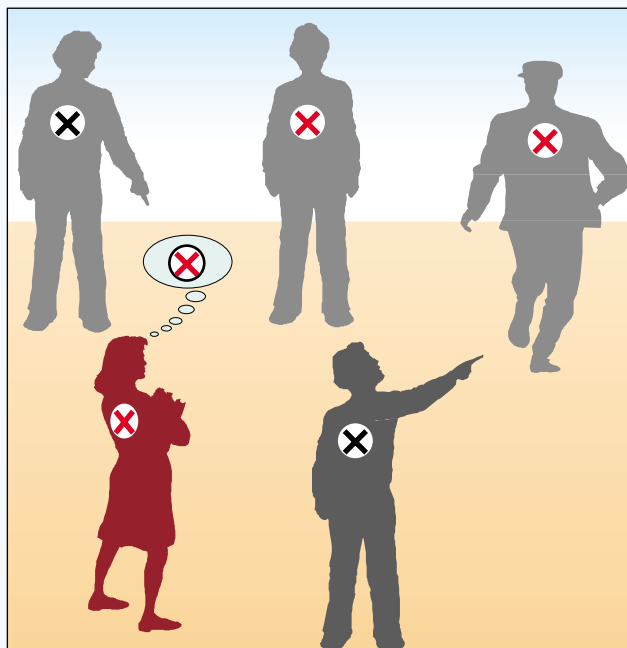
1. LE PROBLÈME DES LOGICIENS

Chaque logicien ignore s'il porte une croix rouge ou noire dans le dos. Les croix ont été choisies au hasard. Chaque logicien doit voter pour indiquer s'il pense que le nombre total de croix rouges est pair ou impair. La réponse majoritaire peut être bonne ou fautive. Si elle est bonne, tous les logiciens sont libérés ; sinon, ils restent emprisonnés.

Est-il possible pour les logiciens de voter de telle façon que plus d'une fois sur deux ils soient libérés ? Oui, en appliquant la règle détaillée ci-dessous.



Je vote en faisant l'hypothèse que j'ai dans le dos une croix de la couleur majoritairement présente, ici une croix de couleur rouge (ici, je me trompe).



Si je vois devant moi autant de croix noires que de croix rouges, je vote en faisant l'hypothèse que j'ai dans le dos une croix rouge (ici, j'ai raison).

- a) Dans 1 cas sur 32, toutes les croix sont rouges. Tous les votes individuels sont corrects. Le vote majoritaire est correct. Au total, 5 votes corrects.
- b) Dans 5 cas sur 32, il y a 1 croix noire et 4 croix rouges. Chacun de ces cas donne 4 votes corrects et 1 vote incorrect. Le vote majoritaire est correct dans les 5 cas. Parmi les 25 votes individuels, 20 votes sont corrects et 5 sont incorrects.
- c) Dans 10 cas sur 32, il y a 2 croix noires et 3 croix rouges. Chacun de ces cas donne 3 votes corrects et 2 votes incorrects. Le vote majoritaire est correct dans les 10 cas. Parmi les 50 votes individuels, 30 votes sont corrects et 20 sont incorrects.
- d) Dans 10 cas sur 32, il y a 3 croix noires et 2 croix rouges. Chacun de ces cas donne 5 votes incorrects. Le vote majoritaire est incorrect dans les 10 cas. Les 50 votes individuels sont incorrects.
- e) Dans 5 cas sur 32, il y a 1 croix rouge et 4 croix noires. Chacun de ces cas donne 4 votes corrects et 1 vote incorrect. Le vote majoritaire est correct dans les 5 cas. Parmi les 25 votes individuels, 20 votes sont corrects et 5 sont incorrects.
- f) Dans 1 cas sur 32, toutes les croix sont noires. Tous les votes individuels sont corrects. Le vote majoritaire est correct. Au total, 5 votes corrects.

COULEUR DÉDUITE	COULEUR RÉELLE	COULEURS VUES	
×	×	×	5 votes corrects
×	×	×	4 votes corrects
×	×	×	1 vote incorrect
×	×	×	3 votes corrects
×	×	×	2 votes incorrects
×	×	×	3 votes incorrects
×	×	×	2 votes incorrects
×	×	×	4 votes corrects
×	×	×	1 vote incorrect
×	×	×	5 votes corrects

Sur les $32 \times 5 = 160$ votes exprimés dans les 32 cas possibles, on a 80 votes corrects, 80 votes incorrects, mais, sur les 32 votes, le vote majoritaire est incorrect dans seulement 10 cas.

thèse», et que l'autre moitié à peu près adopte la méthode symétrique :

B. «Si je vois devant moi autant de croix noires que de croix rouges, je vote en faisant l'hypothèse que j'ai dans le dos une croix noire. Sinon, je suppose que j'ai dans le dos une croix de la couleur majoritairement présente devant moi et je vote conformément à cette hypothèse.»

Que se passe-t-il alors ? Dans le cas 1, rien de changé. Dans le cas 2, il suffit qu'un seul porteur de croix rouge joue *B* plutôt que *A* pour que le vote majoritaire soit mauvais. Et donc, sauf exception, le cas 2 sera défavorable. Le cas 3 est de même défavorable, sauf hasard exceptionnel (1 fois sur 2^n).

Par rapport à notre calcul précédent, il faut maintenant doubler le nombre de cas défavorables. Il n'est plus aussi clair que la méthode soit intéressante. Un petit calcul montre cependant que, si le nombre de logiciens est supérieur à 7, alors la stratégie décrite est favorable aux logiciens. Rien d'important n'est donc changé si les logiciens n'ont pas eu la possibilité de s'entendre préalablement à l'épreuve.

LA JUSTE MAJORITÉ

Reste une question : pourquoi le raisonnement présenté dans l'énoncé est-il faux ? La réponse est liée à une remarque que connaissent bien les hommes politiques français : quand une élection se fait en plusieurs endroits, pour gagner la majorité, il n'est pas nécessaire d'avoir plus de voix que l'adversaire, mais d'en avoir un peu plus dans la majorité des sites. On peut même avoir au total moins de voix que son adversaire et gagner la majorité des élections, donc, par exemple, emporter une mairie dans une ville où l'on a moins de voix que l'opposition (Gaston Defferre, il y a quelques années, par un judicieux découpage des arrondissements de Marseille, avait réussi ce bel exploit).

Dans notre histoire, quand on évalue la probabilité de gagner, c'est comme s'il y avait plusieurs votes (un pour chaque tirage au sort de la répartition des croix rouges ou noires), et il est bien exact qu'une fois sur deux, lors du déroulement de tous les scrutins possibles, la réponse qu'un logicien propose est fautive. Toutefois, cela n'entraîne pas que le vote général est faux une fois sur deux, car lorsque le vote est bon, la majorité est souvent faible, alors que, lorsque le vote est mauvais, ce sont beaucoup de votants qui se sont trompés (dans certains cas, 100 pour cent).

Pour vous convaincre de cela, vous pourrez examiner le cas de cinq logiciens de la figure 1.

2. VOTES MAJORITAIRES MALHEUREUX

NOMBRE DE LOGICIENS	NOMBRE TOTAL DE CAS	NOMBRE DE CAS DÉFAVORABLES	PROBABILITÉ D'ERREUR
3	8	3	37,5 %
5	32	10	31,25 %
7	128	35	27,34 %
9	512	126	24,61 %
15	32768	6435	19,64 %
25	33554432	5200300	15,49 %

En conclusion, dans une série d'élections, pour gagner une majorité de fois, ce qui est important ce n'est pas d'avoir la majorité de tous les suffrages qui sont exprimés au total, mais d'avoir une majorité de fois la majorité, ce qui est bien différent et ce qui est possible, même si, en cumulant les résultats de toutes les élections, on est minoritaire.

Nos logiciens, grâce à leur intelligence, réussissent à avoir raison collectivement plus souvent qu'ils n'ont raison individuellement. Cette remarquable propriété de leur procédé de vote est peut-être celle qu'ont recherchée les concepteurs du *Scrutin majoritaire à deux tours* des élections législatives françaises. Celui-ci, on le sait bien, en défavorisant les partis extrémistes et démagogues, conduit à des résultats où les électeurs choisissent collectivement un bien plus grand nombre de fois de rester modérés qu'ils ne le choisissent individuellement. Ce problème de vote est dû à J. Aspnes, R. Beigel, M. Furst et S. Rudich et m'a été signalé par Gilles Brassard, de l'Université de Montréal.

2. L'ABSURDITÉ DU VOTE AU PLUS FORT RESTE

Examinons comment se déroule un vote au scrutin proportionnel de liste au plus fort reste. Il y a n électeurs et m représentants à élire ; chaque électeur choisit une liste qui comporte m noms. Il est de bon sens de vouloir que les listes ayant reçu le plus de votes aient le plus d'élus.

Dans une première phase du dépouillement, on compte le nombre de bulletins obtenus par la liste *A*, et l'on désigne par a ce nombre. On divise le produit $a.m$ par n , ce qui donne le quotient q et le reste r : $a.m = q.n + r$, et l'on attribue q sièges à la liste *A* (pris bien sûr en tête de la liste classée *A*).

On fait de même pour chacune des autres listes.

L'idée justifiant ce calcul est que, (i) chaque électeur vote pour m représentants, et donc que son bulletin exprime en fait m voix (d'où le calcul de $a.m$) et que, (ii) dès qu'une liste a obtenu n voix, elle gagne un siège (d'où le calcul du quotient $a.m = q.n + r$). Dans la seconde phase, on attribue les postes restants aux listes qui ont les plus forts restes dans l'ordre décroissant des restes calculés. Voici maintenant l'énoncé de l'énigme tirée du Sixième championnat international des jeux mathématiques. Il y a trois listes et sept représentants à élire. Lors du dépouillement, on compte 102 bulletins et l'on attribue deux sièges à la liste *A*, deux à la liste *B* et trois à la liste *C*. On découvre alors une double erreur : d'une part, ce n'est pas sept mais huit sièges qu'il faut pourvoir et, d'autre part, un bulletin était resté dans l'urne en faveur de la liste *A*. Après correction, la liste *A* perd un siège. Cela est paradoxal, puisqu'il y a un siège de plus à pourvoir et un bulletin de plus en faveur de la liste *A*. Sachant qu'il n'y avait ni bulletin blanc, ni bulletin nul, trouvez le nombre de bulletins en faveur de chacune des listes.

Solution

En procédant par tâtonnement, on découvre qu'il y a 21 bulletins pour *A*, 34 pour *B* et 48 pour *C*. En effet, cela répond bien au problème.

Lors du premier calcul (un siège et un bulletin oublié), on obtient : $20 \times 7 = 1 \times 102 + 38$; $34 \times 7 = 2 \times 102 + 34$; $48 \times 7 = 3 \times 102 + 30$, ce qui donne donc deux sièges pour *A* (un directement, puis un par la règle du plus fort reste), deux pour *B* et trois pour *C*.

Lors du second calcul, on obtient : $21 \times 8 = 1 \times 103 + 65$; $34 \times 8 = 2 \times 103 + 66$; $48 \times 8 = 3 \times 103 + 75$, ce qui donne donc un siège pour *A*, trois pour *B* (deux directement, puis un grâce aux restes) et quatre pour *C* (trois directement, puis un grâce aux restes).

Malgré le siège supplémentaire à pourvoir et le bulletin ajouté en faveur de la liste *A*, celle-ci, après correction, a perdu un siège !

3. LE VOTE PAR TÉLÉPHONE

Cinq personnes dans cinq pays différents doivent voter pour ou contre une certaine motion. Il leur est impossible de se déplacer, et elles doivent donc exprimer leur choix par téléphone (ou par courrier électronique). Elles ne veulent faire intervenir aucun tiers, même pas pour compter les votes de chacun, et souhaitent absolument que les votes res-

tent confidentiels (autant que lors d'un vote à bulletins secrets avec une urne s'il avait été possible). Chacune d'entre elles doit pouvoir calculer le résultat du vote. Comment doivent-elles s'y prendre? On fera l'hypothèse que les cinq personnes, parfaitement honnêtes, ne tentent pas de tricher et qu'elles savent toujours qui leur a envoyé un message (aucun anonymat n'est donc possible dans les communications).

Solution

Chacune des cinq personnes A, B, C, D et E choisit un nombre entier (respectivement a , b , c , d , et e) qu'elle prend multiple de 6 si elle veut voter OUI ou multiple de 6 plus 1 (comme $31 = 6 \times 5 + 1$) si elle veut voter NON. La somme $N = a + b + c + d + e$ sera donc de la forme «un multiple de 6, plus le nombre de voix NON» (par exemple, $604 = 6 \times 100 + 4$ signifie «4 NON»).

Chaque participant choisit maintenant une décomposition arbitraire de son nombre sous la forme d'une somme de cinq nombres entiers :

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5,$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5, \text{ etc.}$$

Chacun communique aux quatre autres un des quatre termes de sa décomposition. Par exemple, A recevra les nombres b_1 , c_1 , d_1 et e_1 , B recevra a_2 , c_2 , d_2 et e_2 , etc. La personne A additionne le nombre a_1 qu'elle n'a pas communiqué, aux quatre qu'elle a reçus et obtient $N_1 = a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1$; la personne B additionne $a_2 + b_2 + c_2 + d_2 + e_2 = N_2$, etc. Remarquez que $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = a + b + c + d + e = N$.

Les participants se communiquent alors N_1 , N_2 , N_3 , N_4 et N_5 et calculent chacun de leur côté la somme $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = N$.

Si N est «un multiple de 6», c'est que tous ont voté OUI ; si N est «un multiple de 6 plus 1», c'est qu'il y a eu un vote NON ; si N est «un multiple de 6 plus 2», c'est qu'il y a eu deux votes NON, etc.

Si toutes les opérations se déroulent normalement, aucun des participants au vote ne dispose d'informations sur le vote des autres, en dehors de celles déduites normalement du résultat. En effet, connaître la valeur de b_1 (ce qui est la seule chose que A connaisse du vote de B) ne fournit aucune indication sur le reste de la division par 6 de $b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5$, et donc A ne connaît rien du vote de B. Par symétrie, aucun participant ne peut tirer quoi que ce soit concernant le vote des autres des informations qu'il a eues entre les mains.

Nous avons supposé que les participants étaient honnêtes, mais il est inté-

3. LE VOTE PAR TÉLÉPHONE

Comment 5 personnes peuvent-elles voter une motion par téléphone en préservant le secret du vote ?

Pour voter OUI, choisir un multiple de 6 (par exemple 60)

Pour voter NON, choisir un multiple de 6 plus 1 (par exemple 37)

A vote OUI : il choisit 60 qu'il décompose en $3 + 12 + 30 + 7 + 8$

B vote NON : il choisit 37 qu'il décompose en $3 + 11 + 11 + 6 + 6$

C vote OUI : il choisit 30 qu'il décompose en $10 + 2 + 8 + 5 + 5$

D vote NON : il choisit 19 qu'il décompose en $3 + 3 + 3 + 9 + 1$

E vote OUI : il choisit 42 qu'il décompose en $10 + 11 + 12 + 8 + 1$

(les décompositions sont arbitraires et laissées au choix de chacun)

La somme est $60 + 37 + 30 + 19 + 42 = 188 = 31 \times 6 + 2$.

Le 2 indique le nombre de NON.

Les nombres de la colonne 1 sont envoyés à A, qui les additionne

$$3 + 3 + 10 + 3 + 10 = 29 = N_1$$

Les nombres de la colonne 2 sont envoyés à B, qui les additionne

$$12 + 11 + 2 + 3 + 11 = 39 = N_2$$

Les nombres de la colonne 3 sont envoyés à C, qui les additionne

$$30 + 11 + 8 + 3 + 12 = 64 = N_3$$

Les nombres de la colonne 4 sont envoyés à D, qui les additionne

$$7 + 6 + 5 + 9 + 8 = 35 = N_4$$

Les nombres de la colonne 5 sont envoyés à E, qui les additionne

$$8 + 6 + 5 + 1 + 1 = 21 = N_5$$

Les nombres N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , N_5 sont rendus publics.

La somme $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$ est calculée. Le résultat est $188 = 6 \times 31 + 2$, et ainsi chaque participant connaît le résultat du vote sans connaître le vote des autres participants.



ressant de savoir si le système proposé est robuste aux tentatives de tricheries.

Deux possibilités de tricherie sont à envisager. Lorsque les cinq personnes font connaître les nombres N_1 , N_2 , N_3 , N_4 et N_5 , si l'une d'entre elles, par exemple E, connaît les quatre autres résultats avant d'indiquer le sien, elle peut tricher en choisissant d'indiquer pour N_5 un nombre qui donne une somme $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$ conforme au résultat qu'elle souhaite. Ce risque est facile à écarter : il suffit, lors de l'échange des nombres N_1 , ..., N_5 , de procéder en deux temps. D'abord A communique N_1 à B uniquement, B communique N_2 à C uniquement... E communique N_5 à A uniquement. Ensuite les nombres sont communiqués à tous. Personne, au moment où il divulgue son nombre, ne connaît tous les autres, donc personne ne peut forcer N à être comme il le désire.

Une autre tricherie est à envisager : un des participants pourrait choisir un nombre qui soit «un multiple de 6 plus 2», ce qui revient pour lui à voter deux fois NON. Toutefois, ce type de tricherie se retournera contre le tricheur si les quatre autres participants choisissent le NON, car alors il y a un total de 6 NON, apparaissant comme un vote à l'unanimité pour le OUI (puisque la somme $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$ est un multiple de 6). Un tel résultat serait contraire au désir du tricheur (qui veut faire gagner

le NON). De plus, cette tricherie serait détectée par chaque participant puisque, ayant voté NON, il s'attendra à découvrir, lors du dépouillement, un NON au moins. Lorsqu'une telle tricherie est découverte, les participants, s'ils acceptent de lever le secret du vote, donc de communiquer les nombres qu'ils ont utilisés, sont en mesure de savoir qui a triché. Cette tricherie est donc doublement risquée pour le tricheur : il peut faire gagner le OUI et il est susceptible de se faire repérer. On pourra raisonnablement supposer que personne ne se laisse tenter.

Jean Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

James ASPNES, Richard BEIGEL, Merrick FURST et Steven RUDICH, *The Expressive Power of Voting Polynomials*, 23rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1991, pp. 402-409.

Douglas BLAIR et Robert POLLACK, *La logique du choix collectif*, in *Pour La Science*, p. 104-111, octobre 1993.

Gilles COHEN, *Mathématiques du citoyen : élections piège à...* Matheux, in *Tangente*, n° 30, pp. 12-15, janvier-février 1993.

Nicholas FALLETTA, *Le livre des paradoxes*, chapitre 5, éditions Belfond, 1985.

Illusions musicales

SHAWN CARLSON

Des sons pour explorer le fonctionnement du cerveau.

Au cours de l'été 1893, Arthur Nikisch, qui est alors le chef d'orchestre le plus célèbre d'Europe, fait irruption chez Pyotr Ilich Tchaïkovski : il n'aime pas le finale de la sixième symphonie (la *Symphonie pathétique*) de Tchaïkovski, et il réclame un changement.

Les passages incriminés ne sont effectivement pas orthodoxes : Tchaïkovski répartit, en alternance, le thème principal et l'accompagnement entre les premiers et seconds violons ; chaque groupe doit jouer une note sur deux de chaque thème. Nikisch veut que Tchaïkovski, qui prépare alors la pièce pour

la première, réarrange le mouvement, de sorte que les premiers violons ne jouent que le thème principal, et les seconds violons l'accompagnement.

Pourquoi Nikisch était-il si opposé à la partition de Tchaïkovski ? Il est tentant de croire qu'ayant commencé les répétitions, sa colère musicale soit née d'une particularité que les acousticiens ont récemment découverte.

Aujourd'hui la partition originale ne dérange plus, car les premiers et seconds violons sont rassemblés dans l'orchestre ; les deux thèmes semblent provenir du même endroit. Toutefois, il y a un siècle, l'organisation des

orchestres était différente : les premiers violons se trouvaient à la gauche du chef d'orchestre, et les seconds violons à sa droite. Debout au centre, Nikisch a peut-être été assailli des deux côtés par deux ensembles disjoints de sons qui ne s'intégraient pas en un tout harmonieux. J'écris « il a peut-être été assailli », parce que (et c'est là la facette particulière de la perception) tout le monde n'entend pas la musique de la même façon : selon Diana Deutsch, de l'Université de San Diego, la manière dont nous percevons certaines configurations de sons dépend de notre langue maternelle et de notre dominance latérale (droitier-gaucher). Même le dialecte semble déterminant : les personnes du Midi, par exemple, entendent certains arrangements de sons différemment des personnes d'Alsace.

Les mesures contestées de la *Symphonie pathétique* sont un exemple de configurations sonores ambiguës. Le cerveau de la plupart d'entre nous assemble les voix des violons pour former les mélodies voulues par Tchaïkovski. Cependant, le génie singulier de Nikisch pour la direction d'orchestre suggère qu'il distinguait avec une précision extraordinaire les configurations sonores ; il ne se laissait peut-être pas duper par l'illusion.

Aujourd'hui, on peut utiliser ces illusions afin d'explorer le fonctionnement du cerveau. Jusqu'à présent, seule une poignée de psychoacousticiens pouvait faire des expériences, mais D. Deutsch vient de réunir quelques illusions auditives sur un disque compact (Philomel Records, Box 12189, La Jolla, CA 92039-2189 ; téléphone : 001-800-225-1228 ; fax : 001-619-453-4763 ; sur Internet : <http://www.philomel.com> ; 14,95 dollars plus 4,95 dollars de frais de port).

J'ai récemment visité le laboratoire de D. Deutsch et j'ai fait l'expérience de ces illusions. Mon initiation a commencé par l'illusion de l'octave. Dans un casque stéréophonique, j'ai écouté une configuration simple : deux notes séparées par une octave étaient émises dans le casque, d'abord la note grave dans l'écouteur gauche et la note aiguë dans l'écouteur droit, puis la note aiguë dans l'écouteur gauche et la note grave dans l'écouteur droit, et à nouveau la confi-



© Chris-Bett/Manit



© Dover Publications



© The Museum of Modern Art

1. Le chef d'orchestre Arthur Nikisch (en haut) réécrit une partie de la *Symphonie pathétique* de Tchaïkovski, de sorte que le premier violon joue *fa, mi, ré, do, si*, et le deuxième *si, la dièse, sol dièse, mi dièse, mi*. La partition originale (ci-dessus) de Tchaïkovski (à droite) fait jouer *si, ré, sol dièse, do, mi dièse* par le premier violon, et *fa, la dièse, ré, mi dièse, si* par le second. L'objection de Nikisch pourrait avoir pour origine un caractère particulier de la perception humaine des sons.

© Chris-Bett/Manit



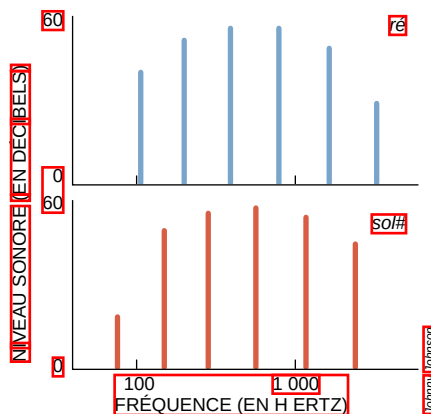
guration initiale, etc. J'ai eu l'impression d'une alternance entre une note haute unique, toujours perçue par l'oreille droite, et une note basse unique toujours perçue par l'oreille gauche. Quand j'invertissais les écouteurs du casque, l'impression ne changeait pas.

D'après D. Deutsch, cela signifie que je suis un vrai droitier, dont l'hémisphère gauche du cerveau est dominant. La plupart des signaux captés par l'oreille droite sont envoyés à l'hémisphère cérébral gauche, où les neurones déchiffrent leur tonalité, tandis que l'hémisphère droit traite essentiellement les signaux de l'oreille gauche. Ensuite, un ensemble indépendant de neurones analyse l'origine spatiale des sons. Les neurones utilisent la fréquence pour localiser les sons ; ils attribuent la source à l'oreille qui reçoit la tonalité la plus aiguë. Ce mécanisme engendre le paradoxe : le cerveau attribue l'origine du son à l'oreille dominante, de sorte que c'est de cette oreille que semble venir le son aigu.

Les personnes dont les hémisphères sont plus équilibrés que les miens (la plupart des gauchers et quelques droitiers) entendent cette illusion assez différemment. Les gauchers ont la même probabilité d'entendre le son aigu dans les deux oreilles, et une probabilité deux fois supérieure aux droitiers d'entendre des configurations plus complexes où soit les notes changent de tonalité, soit le son le plus aigu alterne entre les deux oreilles.

Quand on réduit le volume sonore dans l'écouteur de droite, on diminue la stimulation de l'hémisphère gauche et, ainsi, on déplace l'équilibre vers l'hémisphère droit. Pour un certain volume, l'illusion change, même pour les plus droitiers des droitiers. La même procédure devrait permettre aux gauchers de percevoir l'illusion (l'expérience n'a pas encore été faite), et l'on mesure la dominance hémisphérique à la différence de volume entre les deux écouteurs nécessaire pour modifier la perception du sujet.

Pour faire l'expérience, choisissez d'abord un volume sonore modéré ; puis réglez la «balance» de l'amplificateur jusqu'à ce que la perception semble s'inverser. À l'aide d'un audiomètre (que vous pourrez vous procurer dans un magasin spécialisé ou que vous pourrez bricoler à l'aide d'un microphone et d'une autre chaîne stéréophonique), mesurez l'intensité dans chaque écouteur. Répétez la procédure avec plusieurs personnes et faites la moyenne des résultats ; puis tracez l'histogramme de cette moyenne pour une trentaine de droitiers (ou de gauchers), et vous découvrirez quelque chose de fonda-



2. On construit des paires de tons ambigus par combinaison de plusieurs notes. Ici les sons ré et sol dièse, d'octave ambiguë, sont constitués de six ré et de six sol dièse sur plusieurs octaves.

mental sur la manière dont les cerveaux des droitiers (ou des gauchers) sont structurés.

PARADOXES SONORES

Poursuivez par exemple vos études avec le paradoxe du triton de D. Deutsch. Ce paradoxe utilise des sons engendrés par ordinateur et construits à partir d'une même note (ré, par exemple) : chaque son est composé par la superposition de cette note jouée simultanément sur cinq octaves (voir la figure 2). Un tel son est ambigu : les sujets perçoivent le son comme un ré, mais n'arrivent pas à déterminer l'octave à laquelle il appartient. Le paradoxe se produit lorsqu'un deuxième son, construit de la même manière, est joué immédiatement après le premier. Cette deuxième note est choisie à six demi-tons (soit six touches de piano, en tenant compte des touches noires, soit un intervalle triton) de la première : un ré serait suivi d'un sol dièse. Comme aucune des deux notes ne contient d'information sur l'octave, on ne perçoit pas bien laquelle des deux est la plus aiguë. Certaines personnes jugent que le sol dièse est plus bas que le ré ; d'autres l'entendent plus haut.

Selon D. Deutsch, la sensation que l'on a dépend du pays d'où l'on vient. En outre, les enfants entendent généralement comme leur mère. Apparemment, la langue que l'on a entendue en grandissant détermine la façon dont le cerveau traite ces tons.

De tels effets ont été rarement explorés. Comment les habitants des différentes régions du Globe réagissent-ils ? Différentes générations donnent-elles différentes réponses ? On l'ignore. Aussi, en enregistrant les réactions de vos amis au paradoxe du triton, vous

contribuerez à l'avancement de la science.

L'illusion que je préfère, dans le disque de D. Deutsch, est celle que nous nommerons «high-low» («haut-bas»). D. Deutsch a d'abord enregistré les mots «high» et «low» ; puis elle a constitué une piste stéréo continue où les deux mots alternent rapidement entre les deux haut-parleurs. On croit alors entendre des phrases, mais les mots ne sont pas reconnaissables.

Après quelques secondes d'écoute de cette étrange cacophonie, le cerveau commence à imposer un ordre périodique à ce chaos. Par exemple, j'ai cru entendre des mots et des phrases distincts : d'abord «blank, blank, blank» (soit blanc, blanc, blanc) ; puis «time, time, time» (temps, temps, temps). Puis «no time» (pas le temps), «long pine» (grand pin), et «any time» (n'importe quand). Je fus ensuite étonné d'entendre une voix d'homme qui ne venait que de l'écouteur de droite ; avec un accent australien caractéristique, elle disait «Take me, take me, take me» (Emmène-moi).

Cette illusion révèle-t-elle des pensées inconscientes ? Je vous engage à faire l'expérience. Vous pouvez, notamment, mesurer le temps que vos cobayes mettront à entendre des mots de votre choix après que vous les aurez suggérés. N'hésitez pas à m'envoyer vos résultats.

Revenons maintenant à Tchaïkovski, qui mourut quelques mois après avoir rencontré Nikisch, ayant refusé d'obtempérer. Nikisch réécrivit les passages contestés et créa, de ce fait, une version particulière de la *Symphonie pathétique*. Quelques chefs d'orchestre modernes continuent d'utiliser sa partition révisée. Ils se privent de l'illusion sonore voulue par le Maître.

La Society for Amateur Scientists et D. Deutsch ont mis au point un cofret d'expérimentation pour aider les amateurs à contribuer à la psychophysologie. Il comprend le disque présenté dans l'article, une cassette audio pour tester les aptitudes perceptives, des instructions détaillées et des feuilles de collecte de données qui permettent de réaliser des expériences originales et de collaborer avec l'équipe de l'Université de San Diego. Le coût est de 24,95 dollars, plus 5 dollars de port, à l'ordre de la Society for Amateur Scientist, 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117. Des informations supplémentaires sont données sur le site Internet <http://www.thesphere.com/SAS/>

Parasitisme en série

Les pucerons ont, comme la plupart des insectes, tout un cortège d'ennemis. Parmi ceux-ci figurent les parasitoïdes, hyménoptères aphidiines ou aphelinides. Ils ont un rôle évident dans la limitation des populations d'aphides. Quelle que soit la famille à laquelle ils appartiennent, l'objectif de ces habiles pourfendeurs est le même : pondre un œuf dans un puceron hôte.

Toutefois leur stratégie d'approche diffère. Les *Aphidius* (voir la figure 1), à l'ovipositeur court, optent pour l'attaque de front ; palpation prudente des antennes d'abord, puis estocade rapide après retournement de l'abdomen. Les *Aphelinus* (voir la figure 2), à l'ovipositeur plus long, après une reconnaissance de l'hôte, font volte-face... et pondent à reculons ! Deux manières pour arriver au même but.

Le puceron offrira le gîte et le couvert à la larve parasite qui accomplira tout son cycle à l'intérieur de son hôte. Peu avant la nymphose, elle tissera un cocon (*Aphidius*) qui donnera à l'enveloppe épargnée du puceron un aspect parcheminé, momifié, totalement dévoré à l'intérieur (voir la figure 3).

L'histoire pourrait bien se terminer ainsi, mais certains parasitoïdes sont spécialisés dans l'hyperparasitisme : en fait, ce sont des parasites de parasites. Les *Asaphes* (voir la figure 4) introduisent leurs œufs dans un puceron momifié, donc déjà parasité. La larve effectue son cycle aux dépens du parasite primaire. Serait-il le dernier de la série ?... Eh bien non, il existe aussi des parasites d'hyperparasites !... Fractale !

Bernard CHAUBET





Physique

Les palmes de M. Schutz

Éditions de l'Archipel, 1997.

Un film, actuellement dans les salles, a été réalisé par Claude Pinoteau, d'après une pièce de théâtre de Jean-Noël Fenwick, qui a connu un grand succès (un livre vient d'en être tiré ; il est publié par les éditions de l'Archipel).

Il s'agit d'un agréable divertissement autour de la science, mais il ne faut pas y chercher de vérité historique. Il nous rappelle opportunément que Pierre et Marie Curie ont été jeunes, aussi. Leurs personnages sont joués par deux excellents acteurs, Charles Berling et Isabelle Huppert ; leurs traits de caractère, tels qu'ils apparaissent dans leurs biographies, ont été notablement forcés, de manière à faire rire et à emporter l'adhésion du public. M. Schutz, le directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, est remarquablement joué par Philippe Noiret, mais son personnage n'a rien à voir, comme nous l'expliquerons plus loin, avec le véritable Paul Schutzenberger, qui fut le premier directeur de l'ESPCI. Il a été inventé par J.-N. Fenwick pour constituer le moteur principal de l'intrigue, puisque, dans la pièce comme dans le film, c'est l'ardent désir de M. Schutz d'obtenir les palmes académiques qui le conduit à obliger Pierre et Marie Curie à découvrir le radium.

Dans cette joyeuse parodie, chargée à la fois de comique et d'émotion, apparaissent brièvement deux lauréats du prix Nobel de physique, Georges Char-

pak et Pierre-Gilles de Gennes (ce dernier est le directeur actuel de l'École où travaillèrent effectivement les Curie), habillés en livreurs de pechblende, le minéral d'uranium. Ils se sont certainement amusés, mais n'ont pas cherché à donner une caution scientifique au film.

Car l'essentiel de l'histoire est faux, comme le reconnaît d'ailleurs J.-N. Fenwick dans la postface de son livre. Seuls sont justes les costumes, l'allure des locaux et de certains appareils, le fait que Pierre et Marie Curie ont effectivement découvert le radium à l'École de physique et de chimie, et le fait que Marie Curie se soit livrée à un travail exténuant pour commencer à isoler.

Les dates et la chronologie sont inexactes. De même, pour les circonstances dans lesquelles Marie Sklodowska, qui deviendra Madame Curie, fait la connaissance de Pierre Curie : c'est chez des amis polonais qu'elle rencontre pour la première fois le jeune physicien, au printemps de 1894.

D'autre part, Henri Becquerel n'a jamais parlé d'hyperphosphorescence. C'est un physicien anglais, Silvanus Thompson, compétiteur de Becquerel, qui utilisa ce terme. Le physicien du Muséum pensait simplement qu'il avait affaire à une phosphorescence invisible de très longue durée, d'origine inconnue.

D'autre part, c'est Becquerel, et non les Curie, qui a découvert en mai 1896, que le rayonnement pénétrant qu'il observait était dû à l'élément uranium.

La personnalité du chimiste Gustave Bémont, qui collabora avec les Curie, est bien autre que celle qui apparaît dans le film. La raie optique intense, émise par le radium, fut mise en évidence par le chimiste et physicien Eugène Demarçay.

Jamais les Anglais et, notamment, Ernest Rutherford, n'ont contesté la découverte de la radioactivité et du radium. En revanche, il y eut, de 1901 à 1904, une controverse entre Pierre Curie et Rutherford sur le phénomène nommé radioactivité induite, et sur la nature de l'émanation, nom donné par le savant britannique à un gaz qui semblait s'échapper continuellement des sels de thorium et de radium. Pierre Curie finit d'ailleurs par se rallier à l'interprétation de Rutherford, qui était correcte.

Naturellement la garde du radium assurée par des militaires à l'École de physique et de chimie est une fantaisie.

Quelques mots, enfin, sur le véritable Paul Schutzenberger, qui naît à Strasbourg en décembre 1829. Il fait en parallèle des études de chimie et de médecine. Il enseigne pendant onze ans à l'École de chimie de Mulhouse, où il effectue de nombreux travaux sur les matières colo-

rantes dans l'industrie. Il découvre notamment l'acide hydrosulfureux, un précieux réactif. Il est alors, également, agrégé de chimie médicale à la Faculté de médecine de Strasbourg.

Après être devenu, à Paris, le préparateur du chimiste Antoine Balard, qui avait découvert le brome, il lui succède comme professeur au Collège de France, en 1876. Il réalise de nombreuses recherches, aussi bien en chimie minérale qu'en chimie organique ; il est particulièrement connu pour son étude des matières albuminoïdes et de leur constitution. Il publie un remarquable *Traité de chimie générale*, et devient membre de l'Académie de médecine en 1884, et de l'Académie des sciences en 1888.

En 1881, il devient le premier directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris. C'est lui qui autorise Marie Curie à travailler auprès de son mari, professeur à l'École, après leur mariage, en 1895. La jeune scientifique étudiait à l'époque l'aimantation des aciers trempés. Schutzenberger meurt à Paris en juin 1897 : il n'aura pas vu le début des recherches de Marie et Pierre Curie sur les rayons de Becquerel et les nouvelles substances radioactives.

Pierre RADVANYI

Botanique

Les plantes protégées d'Île-de-France

Gérard Arnal. Éditions Parthénope.

Les arbres qui cachent la forêt

Didier Carbiener. Edisud, 1995.

Il peut paraître singulier de rapprocher ces deux ouvrages. Le premier, dont la présentation et la brillante illustration en font presque un livre d'art, est accessible au «grand public», tout en satisfaisant le naturaliste le plus exigeant ; il présente méthodiquement la flore légalement protégée, rare et menacée, et les moyens de sa préservation, au sein d'une seule région, l'Île-de-France. Le second, au sous-titre significatif («la gestion forestière à l'épreuve de l'écologie»), est plus technique ; son objectif est à la fois plus restreint (la forêt) et plus général (la forêt française et son aménagement). Pourtant ces deux livres originaux et remarquables à plus d'un titre



Le vrai Paul Schutzenberger.

traitent de façon complémentaire de la préservation des biotopes participant à nos paysages végétaux, dont la diversité est un des attraits de notre pays, ainsi que de la conservation de notre flore.

Ces problèmes d'actualité sont l'un des objectifs de la directive «habitats», adoptée à l'unanimité par le Conseil des Ministres de la Communauté européenne, en mai 1992. Cette directive, qui engage notre pays, vise à la création d'un réseau de sites, nommé *Natura 2000*, nécessaire à la conservation de la biodiversité animale et végétale. Selon les instructions officielles, la première étape serait d'établir un inventaire du patrimoine naturel de chaque pays. Les principes de gestion conservatoire de ces biotopes ne doivent intervenir que dans une seconde phase, s'achevant en 2004 ; ils reposeront nécessairement sur une concertation entre les partenaires publics et privés. Lors des réunions en vue de cette concertation, prévues dans chaque département sous l'autorité du préfet, les deux ouvrages cités ne peuvent manquer d'éclairer le débat et de susciter la réflexion.

La phase d'inventaire vient de s'achever dans la quasi-totalité des autres pays de la Communauté européenne, qui ont envoyé à Bruxelles leurs listes de *Natura 2000*. En France, cette liste a été réalisée par les Conseils scientifiques régionaux du Patrimoine naturel, mis en place par le Ministère de l'environnement. En accord avec ses partenaires européens, le Ministère français avait fixé à décembre 1996 la fin de cette première phase : le retard français avait été justifié par la grande diversité phytogéographique de notre territoire métropolitain. Cette date fut respectée.

Toutefois, mal expliquée par les pouvoirs publics, la première phase de *Natura 2000* a été contestée par de nombreux groupes de pression. On a cru, ou fait croire, que ces territoires seraient soumis à des contraintes telles que l'interdiction de la chasse, de la pêche, voire de l'exploitation forestière. Ces mêmes craintes, bien entendu infondées, ont conduit le Premier Ministre, en juillet 1996, à geler l'application de la directive. Si ce blocage était définitif, il anéantirait trois années de travail intense, entièrement bénévole, de plus d'une centaine de naturalistes, professionnels ou amateurs, et il laisserait de côté un document qui rassemble, sur le patrimoine naturel européen, des données validées par les plus hautes instances scientifiques.

Dans l'attente d'un déblocage, l'ouvrage de G. Arnal est fondé sur une partie essentielle des informations recueillies, prouvant l'intérêt et la précision de ces données et justifiant le choix des sites formant le réseau français *Natura 2000*. Le corps



L'un des hauts lieux de la flore francilienne : les falaises dominant la Seine, près de la Roche-Guyon (Val-d'Oise).

du livre présente 202 espèces végétales légalement protégées dans l'Île-de-France : pour chacune, une très bonne photographie prise *in situ* est accompagnée de données précises sur les caractères morphologiques de la plante, le niveau de menace qui pèse sur elle, son statut de protection. Des cartes de répartition montrent les localités où ces espèces sont présentes encore aujourd'hui, soulignant le recul dramatique de la plupart et l'extinction de 35 d'entre elles depuis 1980.

Les plantes citées sont regroupées selon 13 grands types de milieux (des eaux libres aux forêts thermophiles) ; chacun de ces ensembles, illustré de photographies à la fois belles et démonstratives, est l'objet de commentaires sur son déterminisme écologique, sa conservation et sa répartition.

La même préoccupation de préservation du patrimoine apparaît dans l'ouvrage de D. Carbiener : cet éminent forestier propose d'étendre à tout le territoire français la gestion écologique dont il a précisé les concepts et qu'il a mis en œuvre dans la forêt rhénane. Évoquant les rapports de l'homme et de la forêt au cours de l'histoire, il montre le passage progressif de la gestion plus ou moins empirique aux pratiques mises en œuvre dans la plupart des forêts. Encore récemment, ces pratiques visaient surtout à obtenir une production ligneuse maximale, en privilégiant, notamment en plaine, la futaie régulière (arbres de même espèce et de même âge dans chaque parcelle forestière) et l'extension des plantations de conifères (enrésinement). À cet égard, il déplore les méfaits de la gestion classique, souvent obsédée par la productivité. Pourtant

les exemples et citations datent des années 1970 ; depuis, les esprits ont évolué, notamment avec la publication, en 1993, d'une circulaire du Ministère de l'agriculture qui édicte des règles en vue de la conservation de la biodiversité.

Cet ouvrage fait un sort à nombre d'idées reçues. Il invite à ne pas confondre forêts et boisements : les premières, biologiquement complexes et aux multiples potentialités, les seconds, souvent plantations monospécifiques, sans autre valeur que la production de bois. Il conteste que la forêt ne puisse subsister en équilibre en l'absence du forestier : dans les réserves intégrales de Fontainebleau, le renouvellement du peuplement arboré est spontané dans les trouées naturelles. En revanche, il fait justice du rôle de «poumon de la Terre» que seraient les forêts âgées en équilibre (mais leur défrichement libère bien entendu des gaz à effet de serre). Il démontre enfin que les futaies régulières sont des écosystèmes simplifiés, monocultures fragiles, dont l'exploitation impose au milieu vivant et aux sols des contraintes écologiques brutales. Ces futaies n'ont pas, et de loin, la biodiversité maximale, qu'il s'agisse des hêtraies de Haute Normandie, pourtant superbes, ou des plantations d'épicéas qui ont fait disparaître de grandes étendues de la chênaie morvandelle.

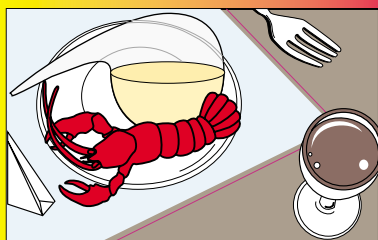
Sous climat tempéré, la gestion de la forêt en futaie irrégulière, préconisée par l'auteur, préserve la diversité des essences et du sous bois ligneux ou herbacé ; elle imite la structure et les capacités d'autorégulation d'une forêt qui serait restée «naturelle». Ce mode de traitement n'est pas antiéconomique : moins

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur France Info
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 1^{er} juillet 1997.



fragile (au tempêtes et aux parasites), respectueuse du sol et de sa fertilité, la futaie irrégulière est pratiquée de longue date sous le nom de futaie jardinée dans les forêts du Haut Jura, par exemple. Elle est aujourd'hui appliquée à la forêt péri-urbaine de Strasbourg, forêt aux fonctions variées, conciliant l'économie, la conservation de la biodiversité et l'accueil d'un public nombreux. Ne serait-ce pas la forêt de l'avenir ?

Les deux ouvrages présentés sont donc complémentaires ; ils s'appuient sur une réflexion écologique de qualité dont les décideurs à tous niveaux devraient tirer parti.

Marcel BOURNÉRIAS

Physique

Universalités et fractales

Bernard Sapoval. Éditions Flammarion, 1996.

Le thème des fractales a inspiré un grand nombre d'ouvrages. On y trouve, à une extrémité, des livres qui mettent en avant «le plaisir des yeux». Il peut s'agir d'images numériques produites à partir de solutions de problèmes mathématiques non linéaires, dont l'ensemble de Julia ou l'attracteur de Hénon sont des exemples classiques, ou encore d'images de fractales dans la nature, où il convient de tenir compte des limitations dans les échelles de taille sur lesquelles se produit une similitude d'échelles. De nombreux autres ouvrages s'adressent à tel ou tel champ de recherche : la biologie, la géologie et, bien entendu, les mathématiques et la physique. L'ouvrage de Bernard Sapoval cite d'ailleurs, dans une bibliographie sélectionnée, pas moins de 10 titres en français, et 20 en anglais, qui vont de «très accessibles» à «très difficiles».

Ce préambule pourrait laisser penser qu'il n'y a guère de place ou de besoin d'un nouvel ouvrage, et pourtant si ! Le livre de B. Sapoval a sa place et est suffisamment original, par la question même qu'il pose en sous-titre du livre et auquel il apporte des réponses très illustrées : s'agit-il de *Jeux d'enfants* ou de *Délits d'initiés* ?

N'allons pas plus loin que la couverture, puisque nous y sommes, et regardons d'un peu plus près l'image de la déformation d'un tambour fractal dont la membrane, au lieu d'être tendue sur un cadre circulaire, est limitée par un contour au dessin complexe fractal, constitué de

motifs d'échelles différentes imbriquées les unes dans les autres. Les résonances de ce tambour, au lieu de faire apparaître les structures étendues classiques (fonctions de Bessel), sont localisées, avec des zones très déformées à côté de zones plus calmes. (Une expérience du même type, que j'avais faite avec Stéphane Roux, utilisait, elle, une membrane de tambour qui était percée aléatoirement de façon à faire apparaître une géométrie fractale sur l'ensemble de sa surface plutôt qu'à sa périphérie.)

Le problème créé par B. Sapoval et son équipe de l'École polytechnique s'inscrit bien dans la réflexion du fameux problème résolu par V. Kac : peut-on entendre la forme d'un tambour ? Que voilà un problème pour «initiés», loin des «jeux d'enfants» avec un tambour ! Pourtant ce problème renvoie au réel, aux vibrations de ces extraordinaires matériaux solides que sont les aérogels, si peudenses et «pleins de vides» en quelque sorte, qui sont constitués d'un filet de molécules allongées aux mailles de tailles très variables. Il intervient dans des modèles de marées : si l'on considère la grande irrégularité des profils de côtes, on peut comprendre que les mouvements de masses océaniques pourrnt, suivant les zones côtières, faire apparaître des marées d'amplitudes variables. L'irrégularité voulue dans la construction d'une digue avec des structures d'échelles différentes permet d'amortir efficacement les vagues qui l'attaquent (B. Sapoval aurait pu mentionner, à ce propos, la très belle gravure d'une digue construite au XVIII^e siècle à partir d'une hiérarchie de triangles inscrits les uns dans les autres ; cette gravure, à l'École des Ponts et Chaussées, a servi de logo fractal à cette école). L'acoustique même d'une salle, conditionnée par les résonances acoustiques, pourra être modifiée par la forme détaillée des murs et des obstacles dont une surface fractale pourrait constituer un cas limite. Et, pour rester dans le chapitre où ces nombreuses applications de ces tambours fractals sont décrites, on y trouvera des citations de L'Odysée... et de Poirot-Delpech.

Car ce livre est avant tout un livre aimable et cultivé. Il l'est aussi par son regard critique et amusé sur ce qu'il décrit et qui est très agréablement illustré. Il l'est parce qu'il maintient à un niveau de culture scientifique simple les nécessaires commentaires mathématiques et physiques. Il l'est enfin parce qu'il nous ouvre la porte vers de nombreux champs disciplinaires, qui vont de l'astrophysique à la physique ou à la finance (pas si éloignés, puisque certains scientifiques sérieux s'exercent actuellement à la «physique», très fractale je vous l'assure !).

Ce livre est préfacé par Benoît Mandelbrot, à qui l'on doit d'avoir «transmis le virus fractal» à bien des scientifiques des sciences de la nature et de la vie, comme ce fut le cas pour B. Sapoval. Le livre rend bien compte de «l'épidémie», qui reste cependant bénigne pour peu qu'on conserve un regard suffisamment lucide et critique sur ses applications. C'est bien aussi ce que fait ce livre.

Etienne GUYON

Histoire des sciences

Histoire générale des techniques

Sous la direction de Maurice Daumas. Presses universitaires de France, 1996.

Tous ceux qui ont eu l'occasion de s'intéresser, même occasionnellement, à l'histoire des techniques connaissent le travail monumental (cinq gros volumes de 500 à 800 pages chacun) que Maurice Daumas (1910-1984) a coordonné, entre 1962 et 1979. C'est cette *Histoire générale des techniques* que les PUF rééditent dans leur collection Quadrige.

Chaque volume est composé de chapitres dus à une quarantaine d'auteurs différents, dont, bien sûr, Daumas lui-même. Dans la préface générale et dans les introductions des divers volumes, celui-ci explique les motivations du travail collectif dont il fut le maître d'œuvre : il s'agissait, en 1962, de rompre avec une tradition qui faisait de l'histoire des techniques un «satellite de l'histoire économique et sociale», jusque là écrite par des économistes et des sociologues, qui reprenaient tous un fond de connaissances considérées à tort comme sûrement établi. Daumas parle même d'«anecdotes contestables et de fausses interprétations reprises par les ouvrages» d'alors.

Daumas constate qu'il n'existe pas alors d'ouvrage d'ensemble en langue française qui fasse le point sur les faits certains et apporte les précisions techniques nécessaires pour faire comprendre la nature du perfectionnement de la connaissance et des inventions qui se sont succédées. L'*Histoire générale des techniques* veut mettre à la disposition d'un «public relativement étendu» des informations générales de base et inté-

resser des «lecteurs de formations si diverses». Il insiste à plusieurs reprises pour signaler que son *Histoire* privilégiera la description des techniques et de leur évolution, et gommara les contextes politiques, économiques, sociaux et culturels du progrès technique. Ceux-ci, qui ne seront toutefois pas négligés, comme le montrent les trois chapitres consacrés aux «techniques de production et facteurs humains» qui terminent l'ouvrage, ne seront jamais privilégiés au point d'étouffer l'établissement des «faits certains».

Le plan de l'ouvrage évolue avec les périodes étudiées : dans le premier volume (des origines au ^{xv}^e siècle), le découpage chronologique et géographique qui est adopté fait ressortir le génie créateur de chaque civilisation avant le début des temps modernes. Ensuite, cette méthode d'exposition ne paraît plus satisfaisante : une structure d'exposition par grand domaine d'activité est mise en œuvre dans les quatre volumes suivants, qui sont organisés autour de grands thèmes : Les premières étapes du machinisme, ^{xv}-^{xviii}^e siècle, L'expansion du machinisme, 1725-1860, Les techniques de la civilisation industrielle : énergie et matériaux, Les techniques de la révolution industrielle : transformation, communication, facteur humain.

Tout au long de ces cinq volumes, Daumas et ses collaborateurs offrent une documentation étendue, fondée sur l'établissement précis des faits, mais aussi des éléments de synthèse utiles. Daumas revient ainsi, dans les introductions de chaque volume, et parfois avec une redondance qui ne gêne pas, sur ses conceptions. À l'opposé de Bertrand Gille, autre grand historien des techniques, il conteste la notion de «révolutions techniques» par lesquelles s'effectuerait la transition entre «systèmes techniques». Daumas n'envisage que des «mutations» ; dans un ouvrage posthume, *Le cheval de César ou le mythe des révolutions techniques*, paru en 1991, il écrit : «Depuis l'origine de l'humanité, le progrès des techniques s'est poursuivi d'une façon régulière, à peu près sans faille» ; discutant finement le concept de «révolution industrielle», qu'il utilise, il dénonce la confusion entretenue avec celui de «révolution technique» qu'il refuse. Dans ce qui est peut-être un clin d'œil aux activités militantes sociales et politiques de sa jeunesse, il parle de «révolution permanente» pour exprimer son sentiment que la révolution industrielle, née en Angleterre pendant la seconde moitié du ^{xviii}^e siècle, se poursuit et n'approchera de son terme que lorsque tous les peuples du monde, et pas seulement les plus privilégiés, y auront pris part.

ARCH!MEDE

Le magazine scientifique d'ARTE



AU MOIS DE JUIN :

Mardi 3 juin à 20 h :

La malédiction du *Tyrannosaurus rex*.

Mardi 10 juin à 20 h :

Le temps terrestre.

La concentration des athlètes.

Histoire du savon.

L'algue tueuse.

Les montagnes russes.

Mardi 17 juin à 20 h :

La buée.

La fabrication des armes préhistoriques.

La naissance de l'Univers.

L'effet de serre

L'imagerie mentale et le sport.

Mardi 24 juin à 20 h :

Thérapie *in utero*.

Entendre des couleurs.

La photographie scientifique.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)
<http://www.arte-tv.com>

arte

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-46-34-21-42
<http://www.pourlascience.com>

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, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. 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, Pierre Charles-Dominique, Yves Gaudemer, Andrey Geim, Guy Hervé, Evelyne Host-Platret, Jean-Jacques Hublin, David Husson, Marie-Thérèse Landousy, Claudine Lehman, Philippe Machetel, Daniel Michelet, Claude Olivier, Guy Paulus, Michel Servant, Jean-Jules Verne.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, 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 : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE 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 des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

Cette *Histoire* est avant tout une excellente histoire événementielle, s'attachant en premier lieu à rendre compte des faits, mais toujours accompagnée de mises en situations et de réflexions stimulantes. Son utilisation me semble indispensable pour examiner l'histoire d'une technique particulière, mais aussi pour aborder les études plus «externalistes» et très synthétiques, telle l'*Histoire des techniques* de Gille (éditions Gallimard, 1978), souvent présentée comme complémentaire. Signalons également le petit livre, brillant et original, de Bruno Jacomy, *Une histoire des techniques* (éditions du Seuil, 1990), qui se présente comme une approche «culturelle» de l'histoire des techniques.

Après des études à la Faculté des sciences de Paris, Daumas est entré au laboratoire municipal de la ville de Paris, et s'y est consacré, plusieurs années durant, à des travaux de chimie analytique et de chimie industrielle, avant de se tourner vers l'histoire des sciences, puis des techniques. On peut penser que ses activités scientifiques et techniques n'ont pas été sans influence sur les conceptions qu'il y a défendu : primat du fait et précision de la documentation.

Sa somme est agréable à lire : il m'est fréquemment arrivé qu'ayant ouvert au hasard un des volumes, je ne l'ai refermé qu'après avoir eu le plaisir de découvrir les éléments d'une «belle histoire» vers laquelle je me proposai de revenir. Plus sérieusement, l'ouvrage peut être utilisé de plusieurs façons. On peut y chercher, pour une période donnée, des notions sur une activité technique précise ou des indications sur l'état du progrès technique ; on peut aussi tester l'ouvrage en examinant les pages consacrées à une activité. C'est ce que j'ai fait pour ma discipline : la chimie.

Les articles consacrés aux pratiques techniques chimiques des anciennes civilisations, l'Antiquité méditerranéenne et tout particulièrement la Mésopotamie, la Chine, l'Inde, l'Amérique précolombienne sont captivants, même si la documentation, toujours précise, ne dissimule pas les lacunes de notre connaissance de ces périodes reculées. Les parties consacrées au Moyen Âge et aux xv^e et xvi^e siècles, en Occident, sont rédigées par Gille, les autres par Daumas, notamment les chapitres importants consacrés à la montée de la grande industrie chimique, de 1725 à 1960. L'influence réciproque des activités scientifiques et techniques d'un même champ d'activité, thèse chère à Daumas, est bien illustrée par ce survol de la chimie. L'auteur insiste à plusieurs reprises sur la nécessité d'abandonner le schéma simpliste qui voudrait que, d'époque en époque, l'évolution des techniques ait été

conduite par le progrès des connaissances scientifiques : l'empirisme des «arts chimiques», jusqu'à la fin du xviii^e siècle, était, par la force des choses, indépendant de «théories chimiques». Ainsi on fabriquait le vitriol (acide sulfurique), l'eau forte (acide nitrique), l'esprit de sel (acide chlorhydrique), moteurs de la grande industrie chimique, bien avant la révolution chimique de la fin du xviii^e siècle.

Pour autant, l'industrie chimique ne se priva pas d'utiliser les découvertes théoriques des chimistes du xix^e siècle : ainsi la préparation des colorants de synthèse, après quelques réussites empiriques, telle la préparation de la mauvéine, en 1856, ou celle de la fuchsine, en 1859, nécessita rapidement, comme le montra la synthèse de l'alizarine, en 1869, la prise en compte de la théorie de la structure chimique, elle-même fondée sur la théorie atomique, alors débattue. Puis la montée en puissance de la chimie industrielle, bien mise en valeur dans le livre, résulte de l'avènement de la chimie moderne : combien la gamme des dérivés de la cellulose est étroite, quand on la compare, par exemple, à celle des hauts polymères, obtenus industriellement par synthèse catalytique !

La réalisation matérielle des cinq volumes est fort convenable : les livres, brochés mais solides, devraient résister à des consultations fréquentes. La réduction du format, depuis l'édition originale, n'a pas diminué la lisibilité du texte et des nombreuses figures qui l'accompagnent. L'appareil critique est resté intact, et seules ont disparu les illustrations hors texte qui étaient en couleur. Le prix de cet excellent ouvrage (590 francs) devrait permettre d'en faire un outil de documentation et de culture générale personnel, et non plus un ouvrage de bibliothèque.

Pour terminer, quelques remarques concernant deux œuvres de Daumas actuellement introuvables et qui mériteraient un meilleur sort : *L'acte chimique* est un ouvrage remarquable, qui est aujourd'hui introuvable. L'éditeur qui le réimprimera fera non seulement une œuvre utile, mais peut être même une bonne affaire.

Comme je félicite ici les PUF d'avoir ressuscité l'*Histoire générale des techniques*, je suis à l'aise pour m'interroger sur les arcanes éditoriales de ce grand éditeur qui a fait disparaître de la collection *Que sais-je ?* le livre de Daumas *Les grandes étapes du progrès technique*, paru en 1981. Cet épatant petit livre est un modèle d'initiation concise et intelligente à l'histoire du progrès technique. Qu'attendent les PUF pour le rééditer en l'état ou pour envisager une refonte qui en respecterait l'esprit ?

Georges BRAM