

■ POUR LA SCIENCE

Avril 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

L'ENSEIGNEMENT
DES SCIENCES
PAR C. ALLÈGRE,
P.-G. DE GENNES,
J.-M. LEHN, J.-C. YOCCOZ

TCHERNOBYL,
UN AVENIR INCERTAIN

TÉLOMÈRES
ET CANCER

LES EXPLOSIONS
GALACTIQUES

VARIATIONS
DU NIVEAU DE LA MER

BACTÉRIES ET ULCÈRES



**LA LOCALISATION
PAR SATELLITE**

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

**Les impossibles
en physique des particules**

par Michel Spiro

Point de vue

Les comités d'éthique servent-ils la démocratie?

par Philippe Lazar



Présence de l'histoire

Les tables astronomiques

par Denis Savoie

Science et gastronomie

La cuisson des pâtes

L'enseignement des sciences

par Pierre-Gilles de Gennes, Jean-Marie Lehn,

Claude Allègre et Jean-Christophe Yoccoz

Jeu-concours : Billards de mathématicien

Perspectives scientifiques :

Le trait retrouvé

Gènes anciens

Striga et lutte biologique

Le Grand Attracteur débusqué?

Un bruit précieux

Dopamine et comportement

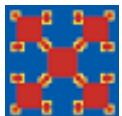
La pollution radio

Vitamines : pas d'abus

Art et culture préhistorique

Surfaces minimales

Les tornades de la turbulence



Visions mathématiques

Quads et quazars

par Ian Stewart



L'expérience du mois

Des pois sans poids

par Shawn Carlson

L'image du mois

Du mouvement dans la roche, par Domingo Aerden



Analyses de livres

– *L'art juif*, par Gabrielle Sed-Rajna

– *L'inscription corporelle de l'esprit*,

par F. Varela, E. Thompson et E. Rosh

– *La chimie dans la société*, sous la direction de G. Bram, F. Chamozi, A. Fuchs, A. Grelon, C. Lanciano-Morandat et L. Mordenti

Tchernobyl : avenir incertain

par Daniel Robeau

Les effets sur l'environnement et la santé de cette catastrophe nucléaire, qui précipita la chute du régime communiste, restent difficiles à évaluer, ce qui alimente les débats entre alarmistes et optimistes.



**Les variations passées
du niveau des mers**

par Jacques Rey
et René Cubaynes

Les nouvelles méthodes d'analyse des couches sédimentaires nous révèlent les montées et les descentes du niveau de la mer au cours des temps géologiques.



La localisation par satellite

par Thomas Herring

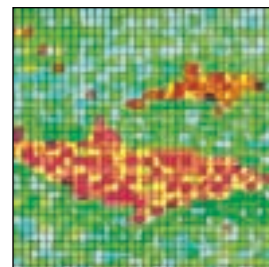
À quelques milliers de kilomètres au-dessus de nos têtes, 24 satellites permettent une localisation à un millimètre près.



**L'imagerie acoustique
dans l'océan**

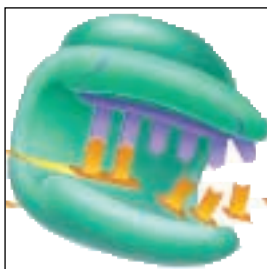
par Michael Buckingham,
John Potter et Chad Epifanio

En enregistrant les réflexions et les diffusions des bruits de la mer sur les objets immergés, on forme des images en couleurs de ces objets sans recourir à des sonars.



Télomères, télomérase et cancer 72par Carol Greider
et Elizabeth Blackburn

La télomérase est une enzyme qui agit sur les extrémités des chromosomes. Détectée dans de nombreux cancers humains, elle serait une cible nouvelle pour les traitements.

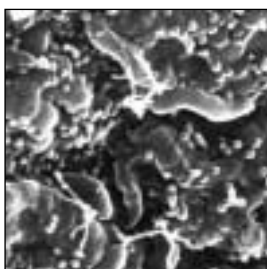
**Des explosions au cœur des galaxies** 78par Sylvain Veilleux,
Gerald Cecil et Jonathan
Bland-Hawthorn

Les flots de gaz brûlants qui s'échappent du centre des galaxies proches seraient à l'origine des étoiles et du milieu intergalactique.

**L'origine bactérienne des ulcères** 86

par Martin Blaser

La bactérie *Helicobacter pylori* infecte l'estomac d'une personne sur trois de par le monde ; elle déclenche souvent des ulcères et des cancers.

**Quarks et simulation numérique** 92

par Donald Weingarten

Des années de calculs numériques ont confirmé la théorie qui décrit les quarks. Simultanément les physiciens ont identifié une nouvelle particule dans des enregistrements anciens.

**L'enseignement des sciences**

Les moyens modernes de transmission de l'information aident-ils l'enseignement des sciences? Dès qu'un nouveau média apparaît, téléphone, radio, télévision, ordinateur, vidéo, CD rom, etc., l'espoir naît : ces nouveaux supports amélioreront, pense-t-on, la transmission des connaissances. Espoir toujours déçu. Qu'est devenue l'Université mondiale imaginée aux premiers temps de la radio et de la télévision? Une utopie. Nous continuons à enseigner par cours magistral, et à apprendre par la lecture.

En revanche, le savoir scientifique augmente. Et nous nous y adaptons. À la Renaissance, pour apprendre les techniques de la multiplication, il fallait aller à l'Université de Bologne suivre les cours des spécialistes de la multiplication. Aujourd'hui les bambins, dès l'école primaire, savent multiplier deux nombres. Toutefois certains résultats se transfèrent moins bien : les lois de la dynamique, léguées par Newton, restent non maîtrisées.

Les théories élaborées par les sciences de la connaissance sont des constats. Leur contribution à une meilleure maîtrise de l'apprentissage n'est pas déterminante.

Aussi la question reste entière. Pouvons-nous optimiser l'enseignement scientifique et faciliter l'assimilation des progrès scientifiques? Nous est-il possible d'améliorer le contenu de la matière enseignée? Quels choix faire? Nous avons interrogé les brillants scientifiques qui ont renouvelé leur discipline, Claude Allègre, Pierre-Gilles de Gennes, Jean Marie Lehn et Jean-Christophe Yoccoz. Les scientifiques améliorent la connaissance en bouleversant les habitudes de pensée ; ils ne procèdent pas autrement dans leur vision d'un renouvellement de l'enseignement, et leurs points de vue sont source d'inspiration. Toutefois la méthode scientifique, par essais et erreurs, peut être douloureusement pénalisante : nous avons vécu ce traumatisme avec l'enseignement des «mathématiques modernes». Les scientifiques interrogés le savent : leur point commun, à travers leurs différences, est le pragmatisme.

Philippe BOULANGER

Le cas favorable

Le crocodile, si habile à happer ce qui bouge et passe à sa portée, semble incapable de voir ce qui est immobile. D'où l'efficacité de la tactique consistant à faire le mort, plutôt qu'à fuir.

On ne sait jamais quelles rencontres on peut faire : ce renseignement, tiré de *L'empreinte des sens* de Jacques Ninio (réédition Odile Jacob, 1996) est bon à retenir. Pourtant, le livre de J. Ninio n'est pas à mettre entre toutes les mains. Imaginons qu'un théoricien tombe dessus. On peut être théoricien et ignorer la zoologie, mais on ne peut pas être théoricien et lire un ouvrage sans en tirer une méthode. Méthode, donc, pour déterminer si tel animal est ou non un crocodile. Allongez-vous à côté, et abstenez-vous de tout mouvement. De deux choses l'une.

– Ou l'animal vous laisse tranquille. Il peut alors s'agir d'un crocodile. Mais il peut s'agir d'un autre animal, un animal inoffensif par exemple. La méthode ne permet pas de conclure. Le théoricien appellera donc ce cas «le cas douteux».

– Ou l'animal vous mange. C'est alors une certitude : l'animal n'est pas un crocodile. Là, la méthode aboutit à une conclusion sûre, montrant ainsi toute sa puissance. Le théoricien appellera donc ce cas «le cas favorable».

Mauvais caractères

Bien plus précis que le nombre de pages, c'est en nombre de signes que les éditeurs mesurent la taille d'un ouvrage. «Un million et demi de signes !», diront-ils par exemple, pour désigner ce que le langage courant appelle un pavé. Curieusement, un espace entre deux mots compte pour un signe, au même titre qu'une lettre ou un... signe de ponctuation. C'est que saisir sur ordinateur une lettre, une virgule ou un espace demande exactement le même travail. Or le signe est une unité de travail.

Dans une grande librairie, quelque 50 milliards de signes vous attendent, vous entourent, tentent chacun d'attirer le regard. Parmi eux d'ailleurs, plusieurs centaines de milliers sont faux, les techniques modernes n'ayant certes pas rendu caduque l'antique et mélancolique constatation des éditeurs : un livre sans coquille, c'est plutôt rare. Cinquante milliards de signes ? Vingt ou trente années de lecture ininterrompue. À eux seuls, les espaces vides entre les mots doivent bien exiger une année.

Une librairie est un temple où de lourdes étagères laissent parfois sortir de confuses paroles. L'homme y passe à travers des forêts de signes qui l'observent avec des regards familiers...

Et cela continue !

Au cours de telle ou telle période, diront par exemple les journaux, la courbe du chômage a été continue. Cette formulation signifie que la croissance n'a pas connu d'interruption. En cela, le terme «continu» n'est pas complètement inapproprié. Cependant, en toute rigueur scientifique, on ne peut pas dire que la courbe du chômage soit continue. Il s'agit d'une courbe monotone.

Faut-il alors se battre pour que les journaux renoncent à l'habitude fautive de dire «continu» ? Non. Il faut se résigner : il n'y a pas de mot satisfaisant. Car le mot «monotone», à son tour, a tout à la fois un sens savant et un sens courant. À supposer que le nombre de chômeurs se mette à diminuer sur une longue période, personne n'aurait le cœur d'appliquer à ce phénomène heureux un qualificatif chargé, par le langage courant, de connotations aussi négatives que celui de monotone.

Quant aux enseignants, qu'ils continuent de lutter contre la tendance estudiantine à confondre «continu» et «monotone».

Le darwinisme selon singeant

Comment préférez-vous Darwin : à la sauce américaine, ou à la française ? L'Américain mêle une conception victorienne du couple à un réductionnisme pur et dur : tout est dans les gènes. Dans *L'Animal moral*, de R. Wright, la bande du livre («L'infidélité est-elle inscrite dans nos gènes ?») en exprime déjà les obsessions :

«Aucun comportement humain n'affecte autant la transmission des gènes que la sexualité. Commandées par les différents états qui gouvernent le sexe, les pulsions propres aux individus du monde entier, Charles Darwin compris, sont arrivées à maturité. Quand Darwin quitte l'Angleterre, il a 22 ans. Comme tous les jeunes gens, il est doté d'une certaine quantité d'hormones.»

«Si, pour l'homme, le grand péril darwinien est le cocufiage et, pour la femme, l'abandon, alors leurs jalousies respectives ne doivent pas être de la même nature.»

Vous préférez les saveurs de chez nous ? Les Français ont réussi à croiser Lacan avec Darwin. Cela a donné naissance à un hybride viable, qui a reçu le nom de Patrick Tort. Il s'exprime ainsi dans l'avant-propos du *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution* (PUF, 1995).

«Le *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution* n'a pas d'antécédent. Aucun essai d'encyclopédie historique et critique embrassant le darwinisme et l'étendue presque inassignable de ses résonances extra-biologiques n'a jusqu'ici été tenté.»

«Cette "condition d'inexistence" rendait souhaitable une telle synthèse, mais ne fut pas toutefois l'instance première à signaler l'urgence de son passage à l'être.»

«La conscience du manque à savoir sur ces matières fut en effet seconde par rapport à celle de la pléthore, devenue insupportable, des convictions vulgaires attachées au nom, à la personnalité scientifique, au discours et à l'œuvre de Darwin.»

L'ère du temps

Un nouveau virus a été découvert chez les théoriciens du cybermonde : le N.E.D. La revue *Écrire & Éditer* (janv.-fév. 1996) l'a mis en évidence.

Le N.E.D., c'est le tic de langage – et de pensée – qui consiste à dire à tout bout de champ «Nous Entrons Dans...» Exemples, tirés de l'échange entre J. Attali et A. Finkelkraut («La guerre du virtuel et du réel», *Le Nouvel Observateur*, 9-15 novembre 1995) :

Nous entrons dans une société du nomadisme des objets, des valeurs, du travail.

Nous entrons dans l'ère de la mobilisation totale.

Nous entrons dans un monde de masques et de labyrinthes.

Nous entrons dans un village planétaire.

Nous entrons dans l'ère de l'écran total.

Nous entrons dans un monde d'une plus grande diversité que par le passé.

Au cours de ce brillant échange, A. Finkelkraut a battu J. Attali par 6 N.E.D. à 4. Qu'importe. Ces penseurs sont l'un et l'autre à la pointe des modes intellectuelles. Je démontre donc que nous entrons dans l'ère du N.E.D. Q.E.D.

LA BOTANIQUE REDÉCOUVERTE



Un ouvrage d'une conception neuve, qui permet à tous d'accéder à la compréhension du monde végétal.

La Botanique redécouverte montre l'acquisition progressive de la diversité et du succès biologique des végétaux modernes.

De nombreux dessins et documents originaux contribuent à faire de *La Botanique redécouverte* un instrument indispensable pour les botanistes, les biologistes, et tous les esprits curieux.

A. Raynal-Roques est professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.

512 pages – 170 F
Code 1610



Bon de commande en p. 98

TRIBUNE DES LECTEURS

Spin et particules

L'illustration de l'article *Le spin du proton* (voir *Pour la Science*, octobre 1995) montre, à l'intérieur d'un proton, trois quarks et dix gluons, dont cinq ont un spin orienté comme celui du proton et cinq ont un spin en sens inverse. Combien y a-t-il réellement de gluons dans un proton ? Comment connaît-on le spin d'un quark ou d'un gluon ?
Bernard POUIT, Soues

Réponse de Vincent Breton

Dans un proton, des gluons sont produits, sont absorbés ou se désintègrent en permanence. L'expérience permet seulement de mesurer des densités moyennes de gluons. Par ailleurs, les quarks ont eu une existence théorique avant que des expériences ne vérifient leur existence. Dans le cadre théorique, le spin des quarks avait nécessairement la valeur 0,5 pour constituer les briques élémentaires des protons ou des neutrons. L'interprétation des expériences qui, à la fin des années 1960, ont révélé les quarks, reposait sur cette hypothèse, confirmée par les expériences ultérieures. Le gluon n'a été mis en évidence dans des expériences qu'à la fin des années 1970. Son spin a été déduit indirectement : il vaut 1.

Science et conscience

David Chalmers compare un cerveau humain et un réseau de puces électroniques (voir *Qu'est-ce que la conscience ?*, *Pour la Science*, février 1996). C'est absurde, car, dans un cerveau, de nouvelles connexions s'établissent sans arrêt, ce qui n'est pas le cas dans un réseau de puces artificielles. En outre, un humain n'est pas seulement un cerveau. Il a de nombreux autres organes : il serait réducteur d'affirmer que la conscience vient seulement du cerveau. La conscience est l'organisme tout entier et tous les phénomènes physiologiques et chimiques qui s'y déroulent.

Cédric ROUX, Montreuil

La première erreur de D. Chalmers est de penser que la science peut rendre «pleinement compte» d'un phénomène. L'épistémologie a depuis longtemps dépassé la position positiviste en reconnaissant le caractère approché et temporaire de toute théorie. Les scientifiques ont abandonné l'espoir de dire la réalité telle qu'elle est et se contentent aujourd'hui de penser qu'ils en donnent une description plus ou moins conforme à l'expérience.

On ne peut pas réduire la charge électrique à quoi que ce soit de plus fondamental : cela signifie qu'on ne peut rien dire de sa nature. La charge électrique est simplement un paramètre de la théorie qu'il est indispensable d'introduire pour reproduire les constatations expérimentales. En revanche, lorsque D. Chalmers introduit la conscience comme paramètre d'une théorie psychophysique, il précise qu'elle n'interfère pas avec les lois physiques. C'est donc l'opposé d'une grandeur physique, analogue aux attributs métaphysiques.

La conscience n'est pas un phénomène objectivement mesurable. Elle n'est que perçue subjectivement, et nous inférons la conscience des autres par la similitude de nos comportements. Quelle conscience a un chimpanzé qui répond à son nom ? Il n'y a aucun moyen de le savoir, puisque la notion n'est pas définie par un phénomène extérieur : c'est affaire de conventions. La sensation subjective de la conscience n'apparaît que lorsque le sujet et l'objet coïncident, ce qui est, par essence, hors du propos de la science. En revanche, se demander à quelles conditions un système physique produit des phénomènes objectifs que nous attribuons à la conscience (des paroles qui expriment des sensations ou des créations artistiques) est du plus haut intérêt. Les «problèmes faciles» de D. Chalmers sont de vrais problèmes, mais ils sont difficiles à résoudre. Ce qu'il nomme le «problème difficile» est, en revanche, impossible à résoudre, parce qu'il est posé en termes non scientifiques.

Gilles HENRI, Crolles

Pour l'allaitement

Comme Jack Newman l'évoque dans son article *L'allaitement maternel protège le nourrisson* (voir *Pour la Science*, février 1996), l'Organisation des Nations unies pour l'enfance et l'Organisation mondiale de la santé se mobilisent depuis plus de 20 ans pour redonner à l'allaitement maternel la place perdue au profit du lait artificiel. En France, à l'heure où les réductions des dépenses de santé semblent prioritaires, une action en ce sens serait salutaire (48 pour cent seulement des enfants de huit jours sont allaités par leur mère, au moins partiellement). De nombreux textes, tels le Code international de commercialisation des substituts du lait maternel et une directive européenne, demandent aux états signataires (dont la France) d'encadrer rigoureusement les pratiques commerciales des industries d'aliments infantiles et de s'assurer de l'information des familles des avantages et de la supériorité de l'allaitement maternel.

Nathalie ROQUES, Lyon

Les impossibles en physique des particules

MICHEL SPIRO

À mesure que se poursuit la quête de particules toujours plus élémentaires, la preuve de l'existence de ces particules devient de plus en plus abstraite.

Démocrite, au IV^e siècle avant notre ère, pensa, pour des raisons diffuses, qu'il existait des constituants insécables de la matière. L'idée de Démocrite était bonne, mais il ne savait pas que les particules ultimes sont élusives. Toujours est-il que, dans le langage de la chimie moderne, on a baptisé atomes les éléments chimiques de la classification périodique des éléments.

Revenons un peu en arrière pour mieux définir ce qu'est cette élémentarité. Boyle, au XVII^e siècle précise que les "éléments" (il parle en chimiste) sont des corps d'une telle simplicité que les efforts de l'art sont insuffisants pour les décomposer. Hélas pour la simplicité, l'art du physicien progresse. À mesure que l'on explore la matière, on s'aperçoit que les atomes sont formés d'électrons et de noyaux ; que ces noyaux sont formés d'autres particules, les neutrons et les protons. Que les protons et les neutrons sont constitués de quarks de types différents. Peu de physiciens pensent sérieusement aujourd'hui que les quarks sont les constituants définitivement insécables de la matière.

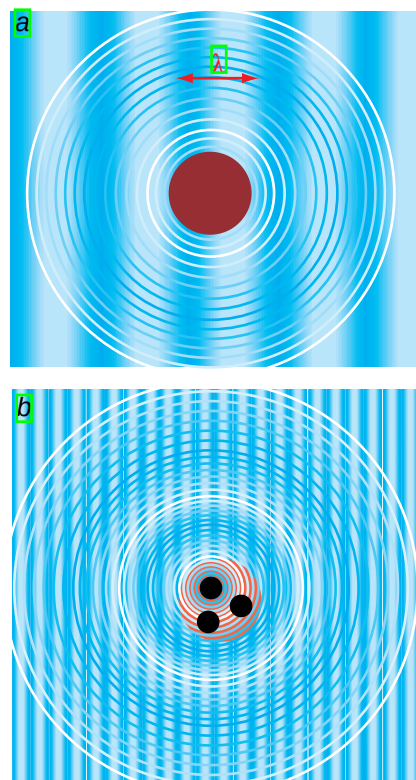
De plus, Einstein a démontré l'équivalence de la matière et de l'énergie et, en conséquence, toute énergie est potentiellement riche de particules matérielles. À de très hautes énergies, on sait créer des particules fugaces qui ne vivent que quelques milliardièmes de seconde en laboratoire.

Pour identifier une particule, on a longtemps cru qu'il fallait l'isoler de ce à quoi elle était liée. Or, il semble que les quarks soient à jamais emprisonnés dans la cage qu'ils constituent eux-mêmes : aussi les indices de leur présence sont-ils indirects. Au contraire, les neutrinos ne se lient à rien, ou presque, et leur étude est très difficile. Imaginez une particule qui n'interagit avec aucune substance connue : comment pourrait-on l'identifier ? Peut-on même penser qu'elle existe ?

Ainsi la recherche des particules élémentaires se heurte-t-elle à deux difficultés : les particules qui se lient trop et celles qui ne se lient pas assez.

QU'EST DEVENUE L'ANTIMATIÈRE ?

Quand l'énergie se matérialise, il se crée des quantités égales de matière et d'antimatière. Près de l'instant zéro du Big Bang, la température était extrême-



A chaque particule on associe une onde, de longueur d'onde inversement proportionnelle à son énergie. On voit qu'une particule cible est « ponctuelle » par rapport à la longueur d'onde avec laquelle on l'éclaire si elle diffuse les ondes incidentes. Les quarks à l'intérieur du proton diffusent les ondes pénétrant dans le proton (b). Encore faut-il pour cela que les ondes soient suffisamment pénétrantes, sinon le proton fait écran (a).

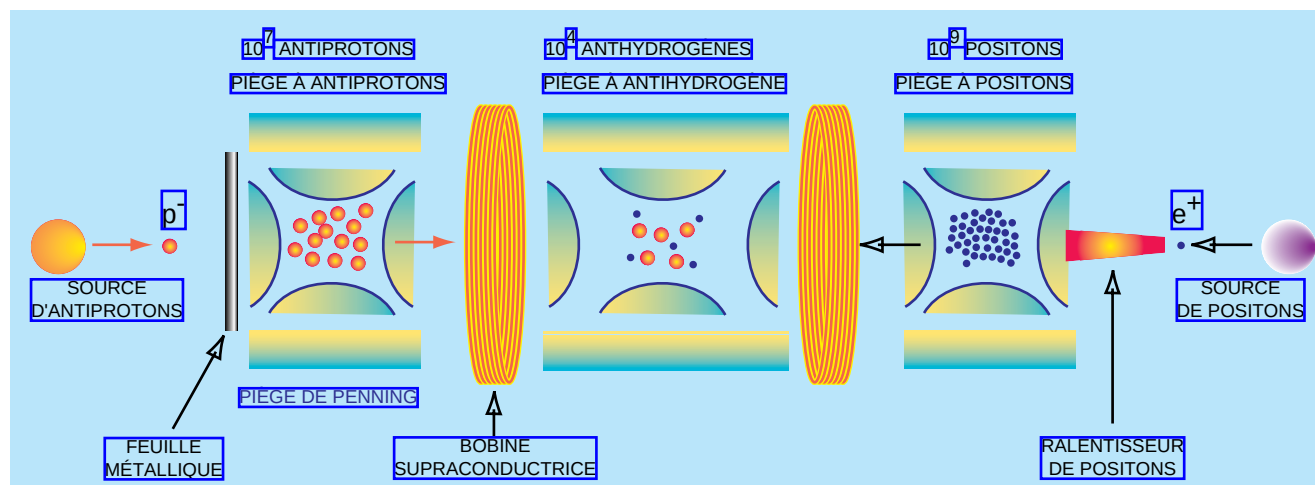
ment élevée et tout était énergie. Lorsque celle-ci s'est condensée matériellement, des masses égales de matière et d'antimatière se sont formées. Le problème est : où est l'antimatière ? Si elle n'est nulle part, pourquoi et comment a-t-elle disparu ?

Neuf atomes d'anti-hydrogène, grand miracle, viennent d'être fabriqués et observés au CERN. Cette réussite est le dernier épisode, en date, d'une longue histoire. Notre vision de l'antimatière est issue des équations : Paul Dirac, à la fin des années 1920, élabore une équation qui unifie, dans une certaine mesure, la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Les solutions de cette équation font apparaître la matière ordinaire, mais pour chaque particule de matière, il existe une solution symétrique, une antiparticule, c'est-à-dire une image dans le monde de l'antimatière. Ces antiparticules ont des caractéristiques « miroirs » des particules : elles ont la même masse, mais toutes les charges, les charges électriques ou les charges quantiques plus abstraites, sont opposées ; lorsqu'une particule et une antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent et leur matière se transforme en énergie. Aussi la matière, dont semble fait l'Univers, ne peut coexister avec l'antimatière sous peine d'annihilation.

Les physiciens ont alors cherché si ces antiparticules existaient dans l'Univers. La recherche porte d'abord sur les rayons cosmiques, ces particules d'origine extragalactique : dans les années 1930, on y trouve des anti-électrons, baptisés positons, et leurs propriétés correspondent à ce que prévoit la théorie. En effet, placés dans un champ magnétique, les électrons des rayons cosmiques tournent dans un sens par rapport au champ magnétique ; les positons ont exactement les mêmes caractéristiques, sauf leur charge, et ils tournent dans l'autre sens.

Dans les années 1950, on détecte l'antiproton. Comme les physiciens ne le voient pas dans les rayonnements cosmiques, il faut le créer. Pour ce faire, ils envoient un proton de très grande vitesse sur un autre proton ; l'énergie de la collision se transforme en énergie, puis cette énergie se retransforme en matière à travers la relation d'Einstein $E = mc^2$, produisant un antiproton et un proton.

La course aux antiparticules se poursuit ensuite, et les physiciens repèrent l'antineutron, dans les années 1960, puis l'antidéutérium formé d'un antiproton et d'un antineutron, et bien d'autres antinoyaux. Les mesures indiquent que les forces nucléaires entre les constituants de l'antimatière sont les mêmes qu'entre les constituants de la matière.



Pour déceler les différences spectroscopiques entre la matière et l'antimatière, les physiciens du CERN proposent de stocker dans un piège à anti-hydrogène environ 10 000 atomes d'anti-hydrogène. Grâce aux techniques optiques ultrafines, les niveaux d'énergie du positon

en orbite autour de l'antiproton seraient mesurés à une précision de 10^{-18} , effet d'une éventuelle disparité matière-antimatière. Ces mesures, à la frontière du possible, élucideraient peut-être les énigmes liées à l'omniprésence de la matière dans l'Univers.

En est-il de même des lois de l'électromagnétisme? Dans les atomes, des électrons orbitent autour du noyau. L'atome le plus simple, c'est l'atome d'hydrogène, avec un proton et un électron. Pouvait-on créer un anti-atome d'hydrogène fait d'un antiproton et d'un anti-électron? La difficulté est qu'on ne sait fabriquer ces antiparticules qu'en très petit nombre, et la réalisation de neuf anti-atomes n'a été possible que grâce à toute la machinerie qui existe au CERN.

Cet exploit n'est-il qu'un premier pas vers la réalisation d'antimatière? Un gramme d'antimatière correspond à 6.10^{23} atomes et le saut quantitatif est considérable, peut-être impossible. Les physiciens espèrent produire suffisamment d'anti-atomes d'hydrogène, quelques milliers, et les piéger dans des puits électromagnétiques avec des faisceaux laser pour étudier en détail les niveaux d'énergie de ces atomes d'anti-hydrogène. Alors nous verrons si les niveaux d'énergie des anti-atomes d'hydrogène sont les mêmes que ceux des atomes d'hydrogène.

L'énigme de l'antimatière créée au début de l'Univers est persistante : c'est une des plus importantes questions cosmologiques. Si dans l'Univers, il y a des anti-étoiles ou de la matière interstellaire faite d'antimatière, il y aurait des annihilations caractéristiques et on verrait les produits de ces annihilations ; on ne les a jamais observés.

Certains astrophysiciens pensent qu'il pourrait exister des antigalaxies «quelque part», totalement isolées des autres galaxies. Un satellite va être lancé : il verra si, dans les rayons cosmiques, il existe des traces d'anticarbone ou d'anti-oxygène. Comme ce sont les étoiles qui fabri-

quent le carbone et l'oxygène, ni le Big Bang ni les rayons cosmiques n'ont engendré de quantités appréciables de carbone et d'oxygène. Donc si l'on observait des rayons cosmiques faits d'anticarbone ou d'anti-oxygène, on saurait qu'ils ont été fabriqués par des anti-étoiles et cela serait la preuve de l'existence d'anti-étoiles.

La brisure de symétrie, une petite fluctuation initiale, qui aurait fait basculer l'Univers à sa création dans le camp de la matière, est inconnue. C'est pour cela qu'il est important de fabriquer des milliers et des milliers d'atomes d'anti-hydrogène ou d'anti-atomes pour voir s'il n'y a pas une petite différence dans les lois de physique entre l'antimatière et la matière? Un tel écart constituerait une piste pour éclairer pourquoi l'Univers est fait de matière et non pas d'antimatière.

Il suffirait d'une toute petite dissymétrie, de l'ordre du milliardième, entre les quantités de matière et d'antimatière formées lors du Big Bang pour expliquer à la fois l'absence d'antimatière et la faible abondance de la matière par rapport au rayonnement. La majeure partie des protons et des antiprotons se seraient annihilés, donnant cet excès de photons et il ne resterait qu'un petit résidu de matière. Nous serions un résidu. S'il n'y avait pas ce tout petit excès de matière par rapport à l'antimatière, toute la matière et l'antimatière se seraient annihilées, et il n'y aurait que des photons dans l'Univers.

QU'EST-CE QUE VOIR UNE PARTICULE?

Une particule élémentaire est une particule qui résiste à toute analyse en termes de sous-structures : même avec les micro-

scopes géants que sont les accélérateurs de particules, on ne distingue pas de sous-structures à l'intérieur. Les microscopes géants, au lieu d'utiliser des photons, utilisent des électrons ou d'autres particules ; ils ont permis dans les 30 dernières années de mettre en évidence les quarks au sein des protons et d'étudier leurs interactions. L'accélérateur d'électrons de 27 kilomètres de circonférence au CERN permettra de sonder les protons et leur intérieur, les quarks ; un jour ou l'autre on trouvera peut-être une sous-structure à ces quarks.

Le sens du mot «voir», en physique des particules, prend une extension à mesure que l'on diminue la longueur d'onde des particules, massives ou non, qui permettent d'éclairer la structure interne de la matière. On ne peut voir une particule que si on la sonde par une longueur d'onde de l'ordre de grandeur de sa taille. C'est ainsi que l'on voit les quarks à l'intérieur des protons : les électrons très énergétiques, produits dans les accélérateurs de particules, pénètrent à l'intérieur des protons et sont diffusés par les quarks. Cette diffusion dénote la présence de ces particules.

On ne voit pas les objets par eux-mêmes, mais ce qu'ils produisent lors de certains types d'impact. Les quarks peuvent être tellement secoués par les particules incidentes qu'ils produisent des jets de particules et «voir les quarks» signifie alors mesurer l'émission de particules issues de ces quarks. Le sens du mot «voir» devient plus abstrait.

L'idéal pour voir les quarks serait de constituer des jets de quarks et les précipiter sur d'autres quarks. Hélas cela semble impossible avec les théories actuelles de confinement des quarks : selon la chromodynamique quantique,

plus vous tirez sur un quark pour le faire sortir du proton, plus la force de rappel est grande. Mais à des énergies extrêmes ou dans les conditions de densité ou de température très grandes, il se pourrait que les quarks soient libérés. Au début de l'Univers, les quarks et les gluons n'étaient pas confinés à l'intérieur des protons.

Toutefois, pour qu'une particule existe, pour qu'on puisse la voir, il faut qu'elle interagisse. Si des particules n'interagissent pas, ou très peu, elles peuvent échapper à toute observation et le sens du mot «exister» devient très compliqué. Ainsi les propriétés des neutrinos, qui n'interagissent que très peu avec la matière, nous sont inconnues. Voir une particule, c'est aussi déterminer ses propriétés...

LA MASSE MANQUANTE

Une énigme de l'Univers est liée à cette observation de particules. Les mouvements des objets les uns par rapport aux autres dans l'Univers obéissent à la loi de la gravitation universelle ; à partir de la dynamique des objets, elle détermine la quantité de masse nécessaire pour que les objets restent liés. Ainsi, dans notre Galaxie, les étoiles tournent autour du centre de la galaxie ; en utilisant les lois de Newton et de Kepler, on calcule la masse totale de notre Galaxie. Or dans notre Galaxie, la masse visible des étoiles et de la poussière interstellaire n'est que dix pour cent de la masse qu'il faut pour maintenir les objets ensemble : 90 pour cent de la masse de notre Galaxie échappe à toute détection.

Peut-être cette masse n'interagit-elle pas, mais alors elle ne permettrait pas d'expliquer pourquoi les objets stellaires sont liés. Il se pourrait que la masse manquante soit constituée de planètes encore invisibles. Il n'est pas exclu non plus que la masse manquante soit le fait de particules élémentaires qui n'interagissent essentiellement que par les forces gravitationnelles. Ce pourraient être les neutrinos s'ils ont une masse, ou des particules que l'on n'a pas encore découvertes dans les accélérateurs... Les trous noirs, une autre possibilité, ne sont détectables que par des effets indirects, par exemple un effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire de courbure des rayons lumineux. Tout ce qui pourrait avoir une masse est un candidat.

LA NAISSANCE DE LA MASSE

Les masses des particules restent un grand mystère : pourquoi les particules ont-elles une masse ? Et comment la pré-

voir ? La théorie la plus satisfaisante actuellement, le modèle standard, rend compte de toutes les propriétés observées des particules : leurs interactions et leur comportement lorsqu'elles entrent en collision.

Toutefois on ne sait pas calculer leur masse. La solution viendra peut-être d'un chaînon manquant, prévu par le modèle standard, qui s'appelle la particule de Higgs, du nom du physicien anglais Peter Higgs. Aux tout premiers instants de l'Univers, les particules sont sans masse et c'est lorsque leur énergie décroît en dessous d'une valeur liée à la masse de la particule de Higgs (probablement une centaine de giga-électronvolts), un dixième de seconde après la création de l'Univers, que les particules acquièrent leur masse. Le modèle standard prévoit aussi comment cette particule de Higgs doit se désintégrer en des particules connues, par exemple les bosons Z et W. L'étude de ces désintégrations permettra à la fois de se convaincre de l'existence de cette particule et de mesurer sa masse.

Il n'est pas certain que le modèle standard soit l'explication définitive. Il se pourrait que la structure des particules de Higgs soit un peu plus complexe que celle prévue dans le modèle standard minimal, et qu'il existe plusieurs particules de Higgs, mais dans l'ensemble, on sait assez bien comment on doit les rechercher. Heureusement qu'on le sait assez bien parce qu'on s'attend à ce que sur les milliards de collisions que produira le futur collisionneur à hadrons du CERN on puisse n'extraire que quelques particules de Higgs : une aiguille dans une meule de foin. Pour cette recherche, quelques deux à trois mille physiciens travaillent sur la détection de la particule de Higgs dans un effort mondial sans précédent.

LA GRANDE UNIFICATION, AVEC LA MASSE

Un vrai impossible actuel est l'unification de la gravitation aux trois autres forces d'interaction. Le médiateur de la gravitation est le graviton que l'on n'a pas trouvé ; peut-être ne le trouvera-t-on jamais. On essaie actuellement de voir les ondes gravitationnelles. Un projet franco-italien, Virgo, devrait voir le jour vers l'an 2000 pour détecter des ondes gravitationnelles qui viendraient de catastrophes dans l'espace, de collisions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons par exemple.

Une onde gravitationnelle induit des changements des longueurs dans l'espace. La longueur d'un objet varie légè-

rement, très légèrement, quand passe une onde gravitationnelle. Imaginez un objet d'une longueur égale à la distance entre la Terre et la Lune : la variation de la longueur au passage de l'onde de gravitation sera inférieure à la taille d'un atome...

Cette notion de masse d'une particule ne traduit que notre ignorance de ce qui se passe à l'intérieur. Pour la charge électrique il n'en est pas autrement. La théorie de la renormalisation montre qu'à chaque niveau de complexité, on arrive à dégager des lois physiques pratiquement indépendamment de ce qui se passe en dessous. On sait bien que derrière cette complexité, il y a des constituants plus élémentaires, mais on arrive à se débarrasser de cette physique en prenant un petit nombre de paramètres, dégagés des lois, qui résument ce qui se passe à des échelles plus petites. Ainsi la température et la pression intègrent notre connaissance des lois qui régissent les collisions entre atomes. Similairement la masse, la charge électrique d'une particule élémentaire, cache notre ignorance des phénomènes à une échelle plus petite.

LA DÉRAISONNABLE EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES

Nos connaissances sur les particules élémentaires reposent sur des modèles mathématiques d'une grande finesse. Yang, prix Nobel de Physique, a écrit : «On ne sait pas comment, mais la Nature choisit un petit sous-ensemble des magnifiques mathématiques créées par l'Homme. C'est ce sous-ensemble que les théoriciens de la physique essaient d'exploiter».

Plus les siècles passent, plus l'efficacité conjointe de la physique et des mathématiques semble se consolider à travers des expériences dont on prévoit le résultat et qui font apparaître d'autres choses, lesquelles ouvrent des pistes pour aller encore plus loin dans la recherche mathématique. La déraisonnable efficacité des mathématiques reste une énigme, un mystère, du domaine de la métaphysique.

Michel SPIRO est Chef du service de physique des particules au Commissariat à l'Énergie Atomique à Saclay.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 10 avril 1996, à 9 heures.

Les comités d'éthique servent-ils la démocratie?

PHILIPPE LAZAR

A la suite de la première fécondation *in vitro* pratiquée en France, les pouvoirs publics ont pris, en 1983, la décision de créer un Comité consultatif d'éthique des sciences de la vie et de la santé, chargé de «donner son avis sur les problèmes moraux soulevés par la recherche dans les domaines de la médecine, de la biologie et de la santé». Parmi ses modalités d'intervention, il devait – responsabilité tout à fait originale pour une instance officielle – organiser chaque année une conférence publique sur «les questions importantes se rapportant à ses travaux». Un pas important était ainsi accompli dans le sens de l'association de la population tout entière à la réflexion éthique. Le comité s'est fort bien acquitté de la mission qui lui était ainsi confiée d'informer les citoyens, prenant notamment l'heureuse initiative d'inviter des élèves et des étudiants à assister aux Journées annuelles d'éthique et faisant à cette occasion un remarquable effort de présence dans plusieurs villes autres que la capitale.

Onze années plus tard, la loi du 29 juillet 1994 recrée, à peu près dans les mêmes termes, un comité portant le même nom que le précédent. Mais, différence majeure, cette loi stipule que le comité doit désormais non seulement exprimer des avis, mais aussi «publier des recommandations». Il est donc chargé – et cela de sa propre initiative! – de guider les citoyens sur ce qu'il convient de faire et de ne pas faire en matière d'utilisation des découvertes biomédicales. Par une subtile nuance de rédaction, un pas vers ce qu'il faut bien appeler une certaine forme de normalisation a été ainsi accompli, sans que l'on en mesure parfaitement, semble-t-il, toutes les implications.

Personne ne peut nier qu'il est, dans une société, des situations dans lesquelles il convient que la collectivité nationale établisse le droit, c'est-à-dire définisse ce que sont les transgressions de comportement non admises et passibles de sanctions. La loi est l'instrument démocratique qui permet de le faire, sous l'autorité de la représentation nationale. Confier la tâche de préparer ces interdits à un comité de Sages constitue indéniablement une



Philippe Lazar.

atteinte, même si elle n'est que partielle, aux prérogatives légitimes du Parlement.

On peut se demander si, plus profondément encore, l'initiative en question ne contredit pas la notion même de réflexion éthique *en tant que telle*. Qu'est-ce, en effet, qu'une réflexion collective de cette nature? N'est-elle pas, avant tout, la confrontation de points de vue *différents* face à une situation nouvelle, engendrée par des progrès de la connaissance qui suscitent des interrogations d'ordre moral? Et n'est-ce pas la *maïeutique* qui permet, à partir de ces interrogations, de parvenir à des décisions individuelles ou collectives qui constituent le cœur même de cette réflexion partagée?

Dès lors, est-il judicieux de gommer, pour partie, le processus social qui permet, à partir d'opinions quelquefois radicalement opposées, de parvenir à des compromis acceptables entre les citoyens, à une tolérance réciproque fondée sur un effort de compréhension en profondeur du point de vue de l'autre? N'y a-t-il pas un grave danger pour la démocratie à atténuer ainsi le rôle du *débat* entre les citoyens, cet élément fondateur du contrat social?

POUR UNE ÉTHIQUE PAR LE DÉBAT

D'autres évolutions étaient-elles possibles et sont-elles encore concevables? Il faudrait pour cela que le Comité national d'éthique change délibérément de modalités de fonctionnement et revienne à ce qui devait constituer sa fonction essentielle : éclairer les citoyens sur les *problèmes* posés et non leur «souffler» des solutions toutes faites. Il suffirait, à cette fin, qu'il fasse *systématiquement* instruire de façon contradictoire chaque dossier par au moins deux groupes indépendants de rapporteurs, puis qu'il rende publiques leurs conclusions respectives en mettant en valeur à la fois leurs probables convergences et leurs inévitables divergences. Il créerait ainsi, pour les citoyens et leurs représentants légitimes, un espace de libres débats, issu de ses propres réflexions, à l'image même des nouvelles libertés potentielles de pensée et d'action qu'apporte en permanence le mouvement de la science.

Le débat d'éthique n'a pas pour objet de «contenir» les avancées du savoir. Il offre, tout au contraire, une exceptionnelle occasion de faire partager par les citoyens les joies, les difficultés et les responsabilités qu'elles engendrent. Il peut contribuer à la promotion de l'ambitieux projet de société que nous assignait naguère Jacques Monod : promouvoir une véritable «éthique de la connaissance». Il ne saurait, dans cette perspective, être institutionnellement accaparé par des «spécialistes», quels que soient leur compétence et leur désir de bien faire.

Est-ce là une utopie? On peut certes le penser, mais les utopies de cette nature ne sont-elles pas le fondement même de l'espace politique et social que l'on appelle, précisément, la *démocratie*?

Philippe LAZAR est directeur général de l'INSERM.

Philippe LAZAR, *L'éthique biomédicale en question*, éditions Diana Lévi.

Les tables astronomiques

DENIS SAVOIE

Les Tables pruteniques, qui datent du XVI^e siècle, furent performantes, grâce à quelques concours de circonstances heureux.

La prévision de la position des astres dans le ciel est l'objectif des astronomes depuis l'Antiquité. Pour ce faire, il leur fallait établir des modèles prédictifs des mouvements planétaires, fondés sur leurs observations. Au II^e siècle avant notre ère, l'astronome et mathématicien grec Hipparque inaugure la grande période de l'astronomie grecque grâce à ses modèles géométriques et à ses observations. Au II^e siècle de notre ère, Ptolémée reprend ce travail et perfectionne le modèle d'Hipparque.

Observant la révolution des planètes dans le ciel, Ptolémée en déduisait leurs périodes de révolution et les variations par rapport à ces périodicités. L'*Almageste* de Ptolémée est l'une des œuvres les plus gigantesques de l'histoire des sciences : y sont accumulées des milliers de valeurs, issues de calculs trigonométriques, et donnant les positions des planètes et de centaines d'étoiles au fil des siècles.

Au XII^e siècle, l'Occident découvre les tables planétaires dans la traduction de l'*Almageste*. Le développement de l'astronomie, stimulé par l'intérêt des notables pour l'astrologie, suscite la production de nouvelles tables astronomiques. Aux XII^e et XIII^e siècles, ces tables sont généralement traduites de l'arabe.

Puis, vers 1320, apparaissent dans les milieux astronomiques parisiens des tables commandées par le roi Alphonse X de Castille : ce sont les Tables alphonsines. Comme les autres, elles ne sont que colonnes de chiffres, et doivent leur succès au « mode d'emploi » qui en facilite l'interprétation. L'engouement est tel qu'à partir du XIV^e siècle, elles supplantent toutes les autres. Si leur utilisation est plus aisée, leur précision n'est guère meilleure que celle des tables précédentes : les valeurs

numériques sont recopiées et les erreurs se répètent.

En 1543, Copernic publie *De revolutionibus*, qui contient également des tables astronomiques. Dans cet ouvrage, la Terre cesse d'être le centre de l'Univers ; elle y est remplacée par le Soleil. Reprenant les données de l'*Almageste*, Copernic effectue un changement de repère : il remplace la Terre fixe par le Soleil et met la Terre et les planètes en mouvement autour du Soleil. Pour établir ses tables, Copernic se contente d'un

nombre d'observations très réduit, et ne porte aucun jugement critique sur les observations de ses prédécesseurs. Il choisit des observations qui ont une importance historique ou d'autres qui ne s'éloignent pas trop de ses propres résultats.

Ainsi, pour établir l'excentricité de l'orbite terrestre (le décalage entre le centre de l'orbite terrestre et le Soleil), il n'utilise que trois observations : une faite par Ptolémée, une par Albategnius, un astronome arabe du IX^e siècle, et une qu'il réalise en 1515. Ces trois valeurs sont assez voisines, mais semblent indiquer une diminution de l'excentricité : Copernic construit une loi de variation de l'excentricité compatible avec ces trois points, et il en déduit des valeurs intermédiaires – fausses, puisque l'excentricité ne varie pas comme il l'imagine. Copernic établit un système planétaire où presque tous les paramètres orbitaux varient en fonction du temps. Il s'efforce de justifier tous les écarts entre les observations et sa théorie.

Dans le système de Copernic, les planètes décrivent des cercles autour du Soleil. En réalité, le système copernicien est encombré d'épicycles (de petites trajectoires circulaires superposées au mouvement général), fluctuations minimes qui ont pour objet de compenser les irrégularités apparentes.

Copernic reste prisonnier de l'astronomie ptoléméenne, car il fait une confiance absolue aux observations de ses prédécesseurs. Il complique sa belle mécanique, pour adapter son modèle aux observations, sans imaginer qu'elles peuvent être entachées d'erreurs. La notion d'erreur expérimentale est inconnue.

L'année 1551 marque un tournant dans l'histoire des tables planétaires. C'est l'année de la publication des Tables pruteniques, dues à l'astronome allemand Erasmé Reinhold. Ce sont les premières fondées sur l'hypothèse de Copernic. Bien que Reinhold ne semble pas avoir cru à l'hypothèse héliocentrique, il passe sept années de sa vie à recalculer, à compléter et à corriger les données publiées dans le *De revolutionibus*. La précision de ses tables est 1 000 fois supérieure à celle des tables de Copernic. Il prétend que l'on peut désormais prévoir la position des étoiles et des planètes sur des siècles.

Cette affirmation était erronée, car les erreurs, minimes lorsque les tables furent établies, devaient s'amplifier inéluctablement au cours du temps.

NICOLAI COPERNICI
Mensis pruthenice.

Numeri conu- na.	Prothia phases econu- na.	Scrup. propor- tionum	Paralla- xeror- bit.	Excentri- parallaxe or.
Gra. Min.	Gra. Min.	Min. Sec.	Min. Sec.	Min. Sec.
1 357	0 32	0 0	1 8	0 8
6 354	1 5	0 2	2 16	0 17
9 351	1 37	0 7	3 24	0 35
12 348	2 8	0 15	4 31	0 53
15 345	2 39	0 28	5 38	0 41
18 343	3 10	0 42	6 45	0 50
21 339	3 41	0 57	7 52	0 59
24 336	4 11	1 13	8 58	1 8
27 333	4 42	1 34	10 5	1 16
30 330	5 10	2 1	11 11	1 25
33 327	5 38	2 31	12 16	1 34
36 324	6 6	3 2	13 22	1 43
39 321	6 32	3 32	14 20	1 52
42 318	6 58	4 1	15 31	2 1
45 315	7 23	4 37	16 35	2 11
48 312	7 47	5 16	17 39	2 20
51 309	8 10	6 2	18 42	2 30
54 306	8 32	6 50	19 45	2 40
57 303	8 53	7 39	20 47	2 50
60 300	9 12	8 30	21 49	3 0
63 297	9 30	9 27	22 50	3 11
66 294	9 47	10 25	23 48	3 22
69 291	10 2	11 28	24 47	3 34
72 288	10 19	12 31	25 44	3 46
75 285	10 32	13 38	26 40	3 59
78 282	10 42	14 40	27 35	4 11
81 279	10 50	15 4	28 29	4 24
84 276	10 56	16 24	29 21	4 36
87 273	11 1	17 45	30 12	4 50
90 270	11 5	18 8	31 0	5 5

Mensis

1. Les tables astronomiques, telle celle-ci de Copernic, indiquaient des listes de valeurs numériques permettant de calculer la position de toutes les planètes quelle que soit la date.

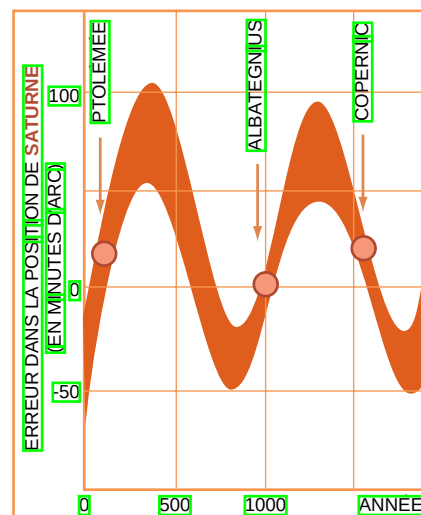
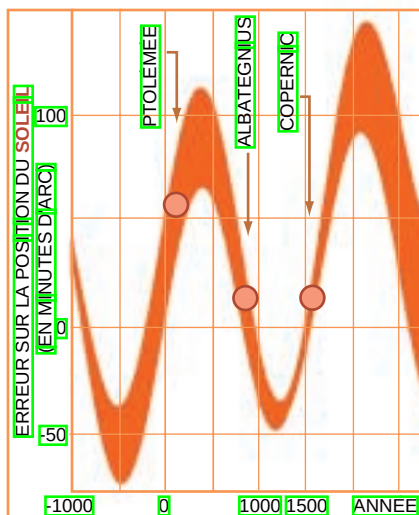
UN NOUVEL EXAMEN DES TABLES PRUTÉNIQUES

Pour analyser les théories planétaires anciennes, notamment les Tables pruténiques, on retrace la façon dont les auteurs les ont établies : nous avons cherché à décrire le modèle cinématique de chaque planète et à en retrouver les constantes et les paramètres fondamentaux. Nulle part, Reinhold ne donne directement les valeurs qu'il utilise, ni ses calculs ; de surcroît, il emploie des valeurs différentes de celles de Copernic.

Après avoir élucidé la façon dont sont construites ces tables, après avoir isolé chaque paramètre orbital et étudié son évolution dans le temps, nous avons rassemblé toutes ces données sous forme informatique. Ensuite, nous avons comparé le mouvement des planètes établi par Reinhold et celui issu des théories planétaires élaboré par le Bureau des longitudes, dans les années 1980, et qui est d'une grande précision sur de longs intervalles de temps : les Tables pruténiques – autrement dit tout l'échafaudage de Copernic – étaient vouées inexorablement à se détériorer en moins d'une centaine d'années. Une mauvaise approximation de la précession des équinoxes et l'ignorance de la grande inégalité de Jupiter et de Saturne, en sont partiellement responsables.

L'axe de rotation de la Terre change de direction au cours du temps, de sorte que le point de référence des coordonnées des astres bouge par rapport aux étoiles d'un angle de 50 secondes par an ; c'est la précession des équinoxes. Or, Copernic est convaincu que ce mouvement de précession n'est pas uniforme et lui attribue une variation dont les effets sont perceptibles sur de longs intervalles de temps. Or, cette correction dégrade périodiquement toutes les positions des corps célestes et, dans la seconde moitié du XVI^e siècle, l'écart entre les prévisions astronomiques et les observations croît.

En comparant les données issues des Tables pruténiques avec les résultats fournis par les théories modernes, on constate que l'erreur principale commise sur la position du Soleil dans le ciel (due à la correction erronée de la précession des équinoxes) évolue avec une période de quelque 1 700 ans (voir la figure 2). Les positions les plus correctes correspondent aux époques où Ptolémée, Albategnius et Copernic ont fait leurs observations (Copernic adapte son modèle pour qu'il en soit ainsi !). D'autres facteurs se conjuguent pour dégrader les prévisions à long terme, et les modèles cinématiques s'écartent progressivement de la réalité.



2. Reinhold, dans ses Tables pruténiques, donnait le moyen de calculer la position des astres, plusieurs centaines d'années à l'avance. Pour évaluer la précision de ces prévisions, l'auteur a comparé les positions indiquées par ces tables avec celles qu'indiquent les modèles astronomiques d'aujourd'hui. Pour ce faire, il a fait la différence entre les positions des astres d'après Reinhold et d'après les modèles actuels, sur de longs intervalles de temps. Si les prévisions de Reinhold avaient été correctes, la différence serait nulle. On constate que les erreurs sur la position du Soleil (à gauche) et sur celle de Saturne (à droite) sont périodiques. Les mesures de Ptolémée, au II^e siècle, d'Albategnius, au IX^e siècle et de Copernic, en 1515, sont cohérentes, car Copernic s'est efforcé d'adapter son modèle à ces observations.

La planète Mercure présente les plus fortes erreurs, puisque les positions diffèrent parfois de plus de dix degrés de la réalité. Heureusement ces écarts se produisent à des moments où la planète n'est pas observable de la Terre ! Si, pour Vénus, les erreurs restent inférieures à quatre degrés, de telles incertitudes interdisent toute prévision d'un passage de ces planètes devant le Soleil.

Jupiter et Saturne intéressaient particulièrement les astrologues des XVI^e et XVII^e siècles : ils prétendaient que les conjonctions de Jupiter et de Saturne étaient des phénomènes essentiels, qui rythmaient toute l'histoire du monde et annonçaient de grands événements. Les tables astronomiques qui permettaient de les prévoir précisément détrônaient les autres. Or, les mouvements de ces planètes sont assez bien traités par les Tables pruténiques. Cela s'explique notamment par le fait que Jupiter et Saturne étant des planètes lentes, les erreurs des modèles ne se manifestent que lentement.

Par ailleurs, les résultats étaient perturbés par la «grande inégalité de Jupiter et de Saturne». Copernic ignorait cette anomalie, mais, depuis, on a constaté des ralentissements pour Saturne et des accélérations pour Jupiter. Ces perturbations, dont la période est proche de 900 ans, sont responsables d'anomalies de grande amplitude, mais Copernic a eu de la chance : les accélérations et les ralentissements de ces planètes étaient faibles, lorsqu'il fit ses observations, entre 1514 et 1529.

Les mathématiciens déduisaient des tables astronomiques, notamment des Tables pruténiques, les éphémérides qui indiquaient, pour chaque jour de l'année, la position des astres. Puis, les astrologues interprétaient ces éphémérides, et leurs almanachs étaient une liste de recommandations ou d'interdictions, destinées aux paysans notamment (Napoléon III, mesurant l'effet désastreux de ces almanachs, en interdira la publication).

L'adoption des Tables pruténiques par les astronomes européens du XVI^e siècle a contribué à légitimer le système héliocentrique en prouvant la qualité des prévisions astronomiques de Copernic. Toutefois, quand on y regarde de plus près, on constate que les prévisions se dégradent irrésistiblement et parfois rapidement.

Travail de Titan, ces tables ont été utilisées pendant près de 80 ans. Elles domineront jusqu'en 1627, année où paraissent les Tables rodolphines de Kepler. Fondées sur le mouvement elliptique des planètes autour du Soleil, débarrassées des encombrants épicycles, et élaborées d'après les nombreux relevés de Tycho Brahé, qui avait compris qu'il fallait renouveler le stock des observations, ces nouvelles tables seront utilisées pendant la plus grande partie du XVII^e siècle.

Denis SAVOIE a préparé une thèse sur les Tables pruténiques, à l'Observatoire de Paris.

Al dente

Comment cuire les pâtes alimentaires.

Comment cuire les pâtes? Qui-conque se contente de plonger des spaghettis dans l'eau chaude, pendant huit minutes environ, n'obtient pas un bon résultat. Bien que simple, la cuisson des pâtes pose de nombreuses questions. Le sel tout d'abord : doit-il être mis dans l'eau de cuisson et pourquoi? L'huile qui, dit-on, doit être ajoutée à l'eau de cuisson, est-elle vraiment nécessaire? Et les pâtes elles-mêmes : peut-on en préparer chez soi d'aussi bonnes que dans l'industrie? Enfin comment éviter que les pâtes collent?

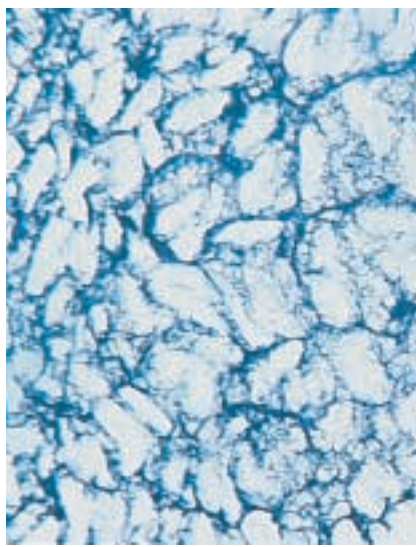
Chez soi, on prépare rapidement de bonnes pâtes en mélangeant de la farine (de blé, à laquelle on peut ajouter de la farine de maïs, de châtaigne...), un peu de sel, de l'eau, de l'huile et des œufs. Un long malaxage donne du corps à la pâte, qu'on lamine et qu'on découpe, avant de la cuire pendant trois à six minutes. Lors de cette cuisson, les grains d'amidon de la farine gonflent en absorbant de l'eau (ils s'«empêsent») pendant que les protéines de l'œuf et de la farine forment un réseau insoluble qui enserrera les grains d'amidon, limitant leur lessivage dans l'eau de cuisson. Pour ces pâtes domestiques, le collant est évité par l'augmentation de la proportion d'œuf ; si le réseau de protéines est formé avant que l'amidon ne s'empêse, les pâtes restent fermes et ne collent pas ; si, au contraire, l'empesage de l'amidon intervient avant la formation du réseau protéique, une partie de l'amidon (surtout une de ses deux sortes de molécules, nommée l'amylose) diffuse dans l'eau de cuisson, enrichissant la surface des pâtes en amylopectine (l'autre sorte), qui fait coller. Après égouttage, un bon morceau de beurre ou une large rasade d'huile d'olive évite aux pâtes, maintenues chaudes, de coller dans l'assiette.

Pour étudier la fabrication industrielle des pâtes, Pierre Feillet, Joël Abecassis, Jean-Claude Autran et leurs collègues du Laboratoire INRA de technologie des céréales, à Montpellier, ont exploré la biochimie de la cuisson des pâtes. Ils cherchent à déterminer les protéines qui communiquent aux pâtes leur bonne qualité culinaire.

L'industrie prépare les pâtes à partir de blé dur. En l'absence d'œuf, le réseau de protéines est formé par les protéines de la farine et, plus précisément, du gluten. Ce gluten s'observe par malaxage

de farine et d'eau : après une longue trituration, la masse obtenue, mise sous un filet d'eau courante, n'est pas totalement lessivée ; la matière élastique restante est composée des protéines du gluten. Ce gluten est plus abondant dans les blés durs que dans les blés tendres. Aussi des laboratoires tels que celui de Montpellier se préoccupent de la composition et de la variabilité génétique des protéines des blés durs, ainsi que des procédés de fabrication des pâtes qui favorisent la formation du réseau protéique.

La qualité d'une pâte industrielle s'apprécie par sa couleur jaune-ambéré et par sa qualité culinaire, c'est-à-dire son apti-



Sur cette coupe d'un spaghetti observé au microscope, Daniel Gallant (INRA-Nantes) a coloré en bleu le réseau de protéines.

tude à ne pas coller après cuisson et, même, après une légère surcuisson. Pour satisfaire cette demande de l'industrie, les sélectionneurs ont donc mis au point des blés durs possédant un gluten ferme et élastique. Les chercheurs de Montpellier ont montré que ce dernier caractère était associé à la présence d'une protéine particulière, nommée gliadine gamma 45, qui n'est en fait que l'indicateur de variétés de blés durs riches en gluténines de faible masse moléculaire.

D'autre part, les chercheurs ont exploré les conditions optimales de fabrication des pâtes et ils ont montré que le séchage des pâtes vers la température de 90 °C prépare la formation d'un réseau de protéines qui s'insolubilise plus rapi-

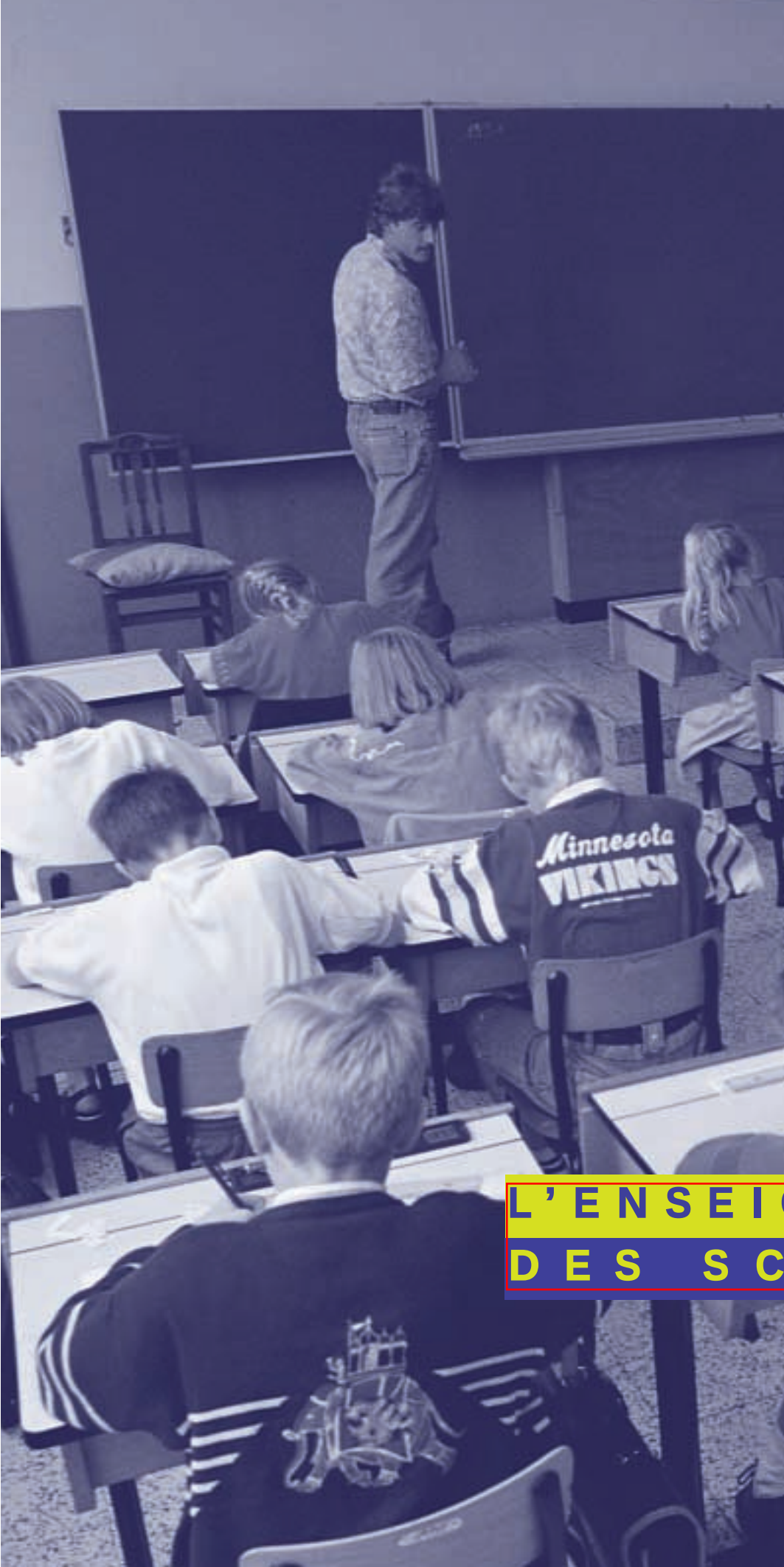
dement, à la cuisson. La haute température doit être appliquée en fin de séchage, afin de ne pas endommager les grains d'amidon. Le malaxage et le tréfilage, dans une vis d'Archimède sous pression, doivent également respecter ces grains. L'application de hautes températures (90 °C) agit sur la couleur, parce qu'elle inactive les enzymes (lipoxygénases) qui détruisent les pigments jaunes et celles (peroxydases) qui développent le brunissement.

Comment cuire les pâtes, à la lumière de ces travaux? Notons tout d'abord que la proportion de protéines doit être élevée. Si l'on n'utilise pas du blé dur, on devra ajouter des œufs, ou bien triturer ou laminer soigneusement la pâte, afin de développer le réseau de gluten, en présence d'une quantité d'eau suffisante pour hydrater les protéines et permettre leur liaison. Quelle que soit leur composition, les pâtes doivent être jetées dans l'eau bouillante, de sorte que le temps de cuisson soit réduit et que la délitescence soit diminuée. L'huile ajoutée à l'eau de cuisson est-elle utile? Des expériences qui consistent à cuire trop longtemps des spaghettis dans de l'eau additionnée ou non d'huile n'ont pas montré de différences sur le collant quand les pâtes ne traversaient pas l'huile de la surface de l'eau, en fin de cuisson. L'huile est surtout utile parce qu'elle enrobe les pâtes quand celles-ci sont sorties de l'eau, en fin de cuisson, de sorte qu'il revient au même d'ajouter un bon morceau de beurre ou une rasade d'huile d'olive dans le plat de service.

Enfin l'eau de cuisson a son importance. À l'INRA de Nantes, Jacques Lefebvre a montré que l'amidon perd moins d'amylose dans l'eau de cuisson si celle-ci contient des protéines : on pourra donc cuire les pâtes dans un bouillon riche. L'équipe de Montpellier a aussi montré que la cuisson dans une eau minérale s'accompagne d'un accroissement progressif de la délitescence et du collant, tandis que les pâtes cuites dans une eau légèrement acide (par exemple additionnée d'une cuillerée à soupe de vinaigre ou de jus de citron, ou encore une eau de pluie) conservent un état de surface satisfaisant, même après surcuisson. En effet, une légère acidité de l'eau (pH égal à 6) permet aux protéines de se trouver sous une forme électriquement neutre, de sorte qu'elles s'associent davantage, formant un réseau capable de piéger l'amidon.

Hervé THIS

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



Comment
doit-on enseigner
les sciences, à l'école,
puis au collège
et au lycée?
Pour la Science participe
au débat sur une réforme
de l'enseignement
en présentant
les points de vue
de Pierre-Gilles de Gennes,
de Jean-Marie Lehn,
de Claude Allègre et
de Jean-Christophe Yoccoz.
Aucun de ces chercheurs
n'enseigne sa discipline
à des élèves de l'école
primaire ou du secondaire,
mais ils ont accepté
de regarder d'un œil critique,
indépendamment les uns
des autres, l'enseignement
des sciences. Leurs points
de vue sont parfois
contradictoires :
c'est la preuve que
le débat est nécessaire.

L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

PIERRE-GILLES DE GENNES

Je me suis intéressé aux polymères, aux cristaux liquides, aux colloïdes, etc. Aujourd'hui, je me préoccupe aussi d'éducation ; je ne suis pas content de notre système éducatif, de ses filières de formation et de ses critères.

Les enfants du XIX^e siècle appartenaient en majorité à une civilisation agricole : élevés dans la nature, ils apprenaient à travailler de leurs mains, à observer, à développer leur sens pratique. L'école de Jules Ferry apportait un complément abstrait mais utile. Les enfants de la fin du XX^e siècle vivent en majorité dans des villes ; ils ont perdu le contact avec la nature. La télévision diminue leur potentiel d'observation, et ils n'ont plus l'occasion de travailler de leurs mains. Pourtant l'école reste aussi abstraite que du temps de Ferry. Il faut corriger le déséquilibre.

Les systèmes informels d'éducation, musées, télévision éducative, etc. ne pallient pas les insuffisances, car la visite d'un musée, par exemple, surprend plus qu'elle ne fait comprendre. Elle éveille la curiosité, mais appelle un autre travail, sans guide, autonome. Je ne crois pas à l'éducation par la télévision, et je pense même que la télévision éducative a des effets pervers : le spectateur est dans une position passive, on ne le fait pas chercher. Pour bien comprendre le monde, il faut un investissement personnel.

Il n'est pas besoin de moyens matériels pour éveiller le sens de l'observation, du concret, de la recherche. Au lieu d'utiliser l'argent à visiter des villes – encore des villes! –, on pourrait l'employer pour organiser des promenades naturalistes, chasser des fossiles, collectionner des insectes ou des plantes, etc.

Ce premier problème va de pair avec un rejet de l'édu-

cation scientifique par les jeunes de 14 ou de 15 ans. On pense, en France, que ce rejet est en partie dû à l'utilisation des sciences, notamment des mathématiques, comme outil de sélection. Doit-on supprimer les examens? Non : je suis fermement en faveur des examens, même dans les classes du creux adolescent. Je crois qu'on a été trop laxiste et que l'exemple des pays nordiques est dangereux. Je souhaite des examens aussi bien en français, en histoire, qu'en mathématiques ou en physique. Ces examens ne doivent pas nécessairement faire le lit de la sélection, mais ils s'imposent pour beaucoup de raisons et, notamment, pour que le travail fait en classe soit pris au sérieux : on ne peut cautionner une sorte de folklore où tout le monde est accepté, où tout le monde est bon et génial. Si un dessin n'a pas été réalisé avec soin, on ne doit pas l'afficher à côté de ceux qui ont été soignés. Les professeurs et les enfants doivent avoir la liberté de s'organiser, mais je crois qu'il faut aux élèves des clignotants qui les avertissent de leurs insuffisances ou de leurs incompréhensions. C'est vrai à tous les niveaux, de l'école à l'université.

Qu'enseigner? Un groupe de pression puissant, au sein de l'Éducation nationale, pense que l'école doit expliquer les techniques modernes. Le programme de physique, en Seconde, présente les amplificateurs opérationnels, les haut-parleurs, un certain nombre d'appareils de ce genre. C'est, à mon avis, une catastrophe, car on parle de joules et de watts sans savoir ce qu'est une énergie, une force, un travail : on met la charrue avant les bœufs. On lutte contre le trop abstrait en enseignant les amplificateurs : quelle vision restreinte du sens pratique! Ce qui est aujourd'hui proposé confond la technique et la science. Je ne fais pas de hiérarchie entre les deux, car elles sont également indispensables, mais on ne peut former à l'esprit scientifique en enseignant seulement la technique (l'inverse est également vrai).

D'autre part, il faut trouver un juste milieu entre un enseignement trop qualitatif et un enseignement excessivement formel. Je peux faire une leçon d'une heure, très qualitative, sur les polymères d'usage courant, à des étudiants de troisième cycle d'université, mais j'essaie de ne pas le faire ainsi : les étudiants pensent, à tort, que ce n'est pas sur du qualitatif qu'ils seront interrogés à l'examen ; ils écouteront d'une oreille passive, sans mémoriser, sans comprendre que, plus tard, quand ils arriveront dans l'industrie des polymères, ils feront de graves erreurs s'ils ne savent pas distinguer un polymère cristallisable d'un polymère non cristallisable, un polymère utilisable pour du textile d'un polymère inutilisable... En pratique, j'alterne des moments formels et des moments qualitatifs, afin que l'attention soit soutenue. Je pense que le professeur de lycée doit avoir un peu la même stratégie, mais je crains qu'il ne soit accablé par la sélection, les programmes et l'anxiété des parents, de sorte que les parties abstraites occupent une majorité du temps. Je conçois que ces parties soient plus faciles à contrôler, mais l'accumulation des abstractions est dangereuse.

J'AI DEMANDÉ
DU MATÉRIEL
PÉDAGOGIQUE
POUR ÉTUDIER LA GRAVITÉ
TERRESTRE ET LE RECTORAT
M'ENVOIE DES POMMES!



Revenons positivement à la question : qu'enseigner? J'ai sur mon bureau un petit système composé de deux plaques de plexiglas parallèles et dont les côtés sont fermés par du ruban adhésif, sauf dans un des coins supérieurs ; en introduisant un mélange de sucre blanc et de sucre roux, des physiciens observent des avalanches, voient des stratifications blanc/roux se produire et explorent une physique inconnue. Ce système (qui coûte moins de cent francs) serait excellent pour une option expérimentale en Première S. Naturellement on ne demandera pas à des élèves de lycée de faire un travail de recherche sur ces systèmes, mais ils pourraient découvrir quelques faits simples.

On ne pourra modifier le système existant que si l'on agit simultanément sur plusieurs communautés : les professeurs, les fonctionnaires de l'Éducation nationale, les créateurs des programmes, les associations de parents d'élèves... Très souvent, un de ces milieux est prêt à une

réforme tandis que les autres ne le sont pas, et le projet échoue. La sensibilisation des élèves et des parents est fondamentale. Certains enseignants ont accueilli avec réticence l'option sciences expérimentales, installée en Première, mais les parents me semblent constituer l'obstacle le plus puissant au changement : ils craignent que leurs enfants ne «perdent leur temps» avec cette option.

Aujourd'hui je suis frappé de voir que l'angoisse remonte vers les plus jeunes, peut-être en raison de l'augmentation du chômage. Dans certaines classes poussées, les élèves de Terminales en arrivent à se comporter comme des élèves de classes préparatoires! Un fossé se creuse entre des lycées passifs et des lycées de bachotage. Ce n'est pas bon.

Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique, est directeur de l'Ecole supérieure de physique et de chimie industrielles.

JEAN-MARIE LEHN

Aut-il enseigner la chimie au collège et au lycée? Bien sûr! Le monde où nous vivons est composé de molécules et d'atomes. Nous n'avons quelque espoir de comprendre le monde que si nous explorons le monde moléculaire : c'est l'objet de la chimie. Faudrait-il enseigner cette discipline de préférence aux arts ou aux lettres? Les arts expriment l'un des aspects de la créativité humaine, les sciences un autre ; elles sont donc indispensables ; la culture sans science serait obscurantiste, régressive.

Les écoles, collèges et lycées doivent faire un choix difficile, car le nombre d'heures d'enseignement est limité. Naturellement l'art stimule la créativité, mais la créativité scientifique doit être d'autant plus encouragée qu'elle est fondée sur la curiosité naturelle des enfants. Si vous donnez une montre à un enfant, il la démontrera pour essayer de comprendre son fonctionnement. Pourquoi ne pas utiliser ce penchant spontané de notre espèce pour enseigner les sciences?

Dans la même veine, je regrette que les appareils scientifiques périmés soient jetés à la casse : pourquoi ne pas les confier aux écoles et aux collèges, afin que les enfants les démontent. Ils y trouveront un prisme? Ils s'en serviront, aidés par leur professeur, pour explorer les lois de Descartes, pour refaire les expériences de Newton. Ils y trouveront des piles? Ils les utiliseront pour récupérer le bioxyde de manganèse à partir duquel ils prépareront de l'oxygène. Ainsi répondra-t-on doublement à la question «comment ça marche?» : en montrant la constitution des appareils et en faisant marcher la tête avec les mains.

Quelle dose de chimie administrer? La chimie doit-elle avoir une place égale à celle de la physique ou des mathématiques? Je ne veux pas faire de comptes d'apothicaires, mais je constate que la chimie, aujourd'hui, a une portion excessivement congrue alors qu'elle intervient dans l'essentiel des activités humaines, indus-

trielles en particulier : le textile, la pharmacie, l'électronique, etc. Tout est chimie, puisque tout est matière.

A partir de quel âge les enfants doivent-ils apprendre la chimie? Je n'ai moi-même découvert la chimie qu'en classe de Terminale, mais la présentation des transformations moléculaires à de très jeunes enfants peut leur donner une sensation nouvelle : en faisant réagir deux poudres de couleurs différentes pour obtenir une troisième couleur, on opère une transformation intrinsèque de la matière.

Que présenter à ces jeunes? Le programme actuel me semble aberrant de formalisme. On devra commencer par la pratique de la discipline, présenter des transformations spectaculaires, sensibles : changements de couleur, changement d'odeur, changement de saveur. Puis, en utilisant la curiosité spontanée des élèves, on leur présentera plus en détail les objets chimiques. On insistera sur la chimie, science architecturale : les molécules sont de petites constructions que l'on édifie à l'aide de briques, comme un jeu de construction.

A quelles molécules s'intéressera-t-on? Se limitera-t-on à la chimie inorganique, dans les petites classes, et réservera-t-on la chimie organique pour les classes supérieures? Cette distinction devient inutile si l'on considère la chimie sous l'angle de la construction architecturale. La possibilité, pour les atomes de carbone, d'établir quatre liaisons avec des atomes voisins fait de la chimie organique un champ qui peut être présenté de façon simple. Je n'exclus pas que l'on présente également des molécules inorganiques : pourquoi se priver d'évoquer le





sel de cuisine ou d'autres molécules de notre environnement : celles qui font le parfum des oranges ou des roses, celles qui font le goût des pommes vertes. Ou même certaines molécules telles que l'aspirine, qui permettent de jeter des ponts entre plusieurs disciplines.

L'approche architecturale devra être complétée par une présentation des propriétés macroscopiques des objets microscopiques que sont les molécules. L'expérience du lait de chaux qui se trouble quand on souffle dedans est pleine d'enseignements : il faudrait un acte de foi extraordinaire pour croire que les molécules sont responsables du trouble, car que voit-on ? Au mieux, si l'on a la patience de laisser sédimenter le précipité, on récupère une poudre blanche qui, au microscope, se révèle constituée de petits grains blancs : que sont ces grains et quel est leur rapport avec les molécules dont on parle ? À l'école, l'instituteur pourrait utiliser cette expérience comme thème, autour duquel il broderait : il serait amené à évoquer la solubilité des corps (un phénomène qui suscite toujours des questions), il parlerait de gaz comme le dioxyde de carbone, il parlerait de la craie, il régénérerait le dioxyde de carbone en attaquant cette dernière par du vinaigre... Les enfants n'admettront l'idée des molécules que si

l'on cerne celle-ci progressivement. On ira inductivement du gros vers le petit, en refaisant des expériences de l'histoire de la chimie. Je ne suis pas seul à penser que les leçons de choses contenaient dans leur esprit beaucoup de ce qu'il convient de refaire.

Quel rôle doit être celui des enseignants ? L'enseignement doit être renoué par l'emploi des ordinateurs et des réseaux. Si l'on admet que les connaissances se transmettent de façon efficace à la manière platonicienne, par des questions qui font dire par l'élève ce que l'on veut lui enseigner, on a un nouvel objectif didactique, qui pourrait se fonder utilement sur l'utilisation d'ordinateurs, de leurs banques d'informations et de leur interactivité.

Enfin l'enseignement actuel est aberrant de formalisme, même pour des élèves des grandes classes du secondaire. Les faits chimiques ne doivent pas être utilisés uniquement pour faire des exercices de mathématiques, jusqu'à ce qu'ennui s'ensuive. Les professeurs de mathématiques peuvent utiliser le formalisme chimique, s'ils en ont envie, comme illustration de leurs cours, et les professeurs de chimie peuvent en montrer le fonctionnement pour enseigner à formaliser un problème, c'est-à-dire, en fait, pour présenter la méthode scientifique. Mais la mise en équations mathématiques de la chimie doit être secondaire à ce stade.

Il y a bien trop à faire pour ne pas se focaliser sur le formalisme : c'est un grand plaisir de comprendre que la chimie révèle des cohérences de la nature, des régularités, des lois. Considérons par exemple la fonction alcool. Chaque alcool est particulier, mais tous les alcools ont quelque chose de commun, un comportement semblable. Et la chimie est avant tout créative dans son essence, permettant de transformer la matière dans son intimité.

Texte établi à partir d'un entretien avec Jean-Marie Lehn, prix Nobel de chimie, professeur au Collège de France et à l'Université de Strasbourg.

L'éducation scientifique renouvelée

CLAUDE ALLÈGRE

L'enseignement peut être, doit être, dès le collège, ancré au réel.

Toute rénovation de l'enseignement des sciences est prise dans un étau polygonal. Faut-il enseigner toutes les avancées de la Science ou se limiter à quelques méthodes choisies ? Faut-il aborder les sciences dans une vision axiomatique finie ou présenter les

questions dans leur mouvance historique et incertaine ? Faut-il commencer par les mathématiques dans une hiérarchie comtienne pour examiner ensuite comment elles débrouillent l'écheveau des autres disciplines ? Il

ne fait pas de doute que le lecteur devinera, dans ces alternatives, où vont mes préférences, mais je souhaiterais les argumenter, surtout en ce qui concerne le contenu de l'enseignement.

D'abord le contenu est-il si important ? Richard Feynman, citant Gibbons, s'interrogeait : « L'enseignement est rarement très efficace, sauf quand de rares et heureuses dispositions d'esprit des élèves font qu'il est presque superflu. » Cette affirmation, pour provocatrice qu'elle soit, me semble démobilisante et fautive. La crise actuelle de l'enseignement français, car crise il y a, montre que l'importance exagérée, voire la primauté, du raisonnement abstrait oriente mal les jeunes esprits. Tous les exercices intellectuels n'ont pas la même valeur éducative, tous les enseignements n'ont pas la même pertinence. Une abstraction biaisée est pernicieuse : la que-

relle des universaux, philosophiquement importante au Moyen Âge, préparait mal les écoliers à comprendre les enseignements de Bruno ou de Galilée.

Car il faut, en permanence, faire des choix, l'éducation ne pouvant procéder par empilement. C'est un truisme et une triste réalité que de répéter que le nombre d'heures de cours au lycée et au collège, et aussi à l'université, est beaucoup trop élevé. Pourquoi cette inflation ? Parce que les scientifiques, murés dans leurs engouements et la perpétuation des critères passés, ne savent pas préconiser des enseignements plus formateurs et mieux adaptés. Adaptés à quoi, me direz-vous ? À l'étude de la réalité. La géométrie descriptive avait ses beautés, mais les études des réalités architecturales sont mieux appréhendées aujourd'hui par les programmes informatiques. Exit la descriptive, elle n'a plus d'intérêt qu'historique. Nous sommes une des premières générations qui doit éliminer des pans entiers de sciences, en raison de l'augmentation de nos connaissances.

Je prônerai une « remise à zéro » des compteurs et une interrogation détaillée sur les sujets qui sont le mieux à même d'exciter la curiosité de l'enfant. Car la naïveté de l'enfant l'incite à l'optimisme, et c'est très bien ainsi. Le jeune esprit est attiré par le difficile, il attend de l'enseignement une explication du monde. Si l'enseignement ne satisfait pas sa curiosité, il fuira vers un désintérêt, puis vers un irrationnel plein de bruit et de fureur.

Au collège, un enseignant de sciences, de toutes les sciences, et un enseignant de mathématiques différent, seraient mieux à même de suivre le développement des jeunes intellects. En complémentarité mais en distinction.

L'enseignant des sciences montrerait d'abord ce que nous savons des processus de la vie : il exposerait, à travers les fossiles, la diversité du vivant et la théorie de l'évolution telle qu'énoncée par Darwin, aborderait la notion d'espèces par l'interfécondité, les lois de Mendel et les aléas de la reproduction. La montée en puissance du questionnement et la découverte des limites actuelles de la connaissance se feraient naturellement. L'heure n'est plus aux idéologies et aux systèmes complets : la science n'est pas omnipotente. Mais elle n'est pas impuissante.

En quatrième, après l'exposé des lois biologiques, l'introduction de l'ADN en tant que code sera une première synthèse attendue et perçue, car elle succédera à l'analyse de l'évolution.

La description du ciel étoilé, de ses composants (planètes, étoiles, galaxies) et de ses évolutions calendaires illustrerait des idées forces de la mécanique de Newton, la structure et les dimensions du monde. Évidemment sans équations. L'intuition des lois de la mécanique n'est pas innée, il s'en faut, mais la compréhension initiale de ces lois ne passe pas nécessairement par leur écriture mathématique. L'enseignement de la mécanique quotidienne peut être appréhendé par des interrogations et des expériences, par le récit des erreurs aristotéliennes (la force ne crée pas le mouvement), par la déclinaison des intuitions d'Archimède, vérifiables sur des exemples simples (l'avion, le bateau) dont l'interprétation n'est pas immédiate. L'optique pourrait commencer par les interférences pour indiquer très tôt ce qu'est une onde, et la physique par les expériences de Galilée de la tour ou du plan incliné et du pendule.

Dans la même veine de diversité féconde, je souhaiterais que la chimie soit enseignée dès le collège par la manipulation de modèles d'atomes en bois. La chimie est une combinatoire où des éléments simples se combinent à l'infini en des substances variées : les modèles montrent comment la géométrie et la combinaison des atomes engendrent les structures des matériaux qui nous entourent.

L'enseignement des systèmes serait formateur : un organisme vivant, un écosystème, les cycles de l'atmosphère, des eaux et des continents sont des systèmes bouclés dont on peut appréhender l'organisation à travers des lois simples de la mécanique, de la chimie et de la physique. Les phénomènes naturels constituent une bonne approche pour amener les enfants à poser les questions sur le comment et le pourquoi. Et naturellement, tout cela complété par une incitation à l'observation et à l'expérience.

La technologie peut attendre : je ne souhaiterais pas que soient enseignées des notions techniques non étayées par la compréhension préliminaire du fondamental. Un tel enseignement, trop opératoire et algorithmique, habitue les enfants à suivre des recettes plutôt qu'à comprendre un fonctionnement. Avez-vous essayé de régler votre nouveau magnétoscope en suivant le mode d'emploi, sans comprendre la fonctionnalité des opérations ?

En revanche, l'apprentissage de l'observation et de l'expérience devra être enseigné très tôt. La description doit être liée à l'expression écrite et à l'acquisition du vocabulaire précis sur les plantes, les roches, les phénomènes. L'observation devra être appuyée sur un support théorique. L'expérience sur la chute des corps, le principe d'Archimède, devra inculquer la répétitivité et la notion d'erreur.

Et les mathématiques dans tout cela ? Elles ont une place de choix, mais pas la place primordiale. La durée des cours mathématiques serait de moitié inférieure à celle des sciences. Je verrai, dès le collège, un cours de probabilités fondé sur des expériences avec des dés et des cartes qui illustrerait, avec l'enseignement de la biologie, les incertitudes du monde. J'aimerais un enseignement intuitif de la géométrie, un premier examen de la notion de fonction fondé sur des exemples (surtout pas des fonctions linéaires) associés à des commentaires qualitatifs et un début de formalisation algébrique. Au lycée, on introduirait les matrices comme des tableaux de nombres, le calcul différentiel à partir des différences finies, et l'abstraction de l'algèbre serait développée doucement. Sur ces bases, on pourrait enseigner des idées mathématiques-physiques riches, telles que le chaos et les oscillateurs couplés.

Cette description non exhaustive tend à donner l'esprit et la finalité d'un tel programme : ancrer les explications du complexe sur des mécanismes intellectuels et des connaissances maîtrisés. *Pauca sed matura* disait Carl Friedrich Gauss... Serait-il utopique de débattre enfin de ce qui est important en sciences ?

Claude Allègre, Prix Crafoord, est professeur à l'Institut universitaire de France, à l'Université Paris VII.

JEAN-CHRISTOPHE YOCOZ

Ne crions pas haro sur le baudet : on critique l'enseignement des mathématiques à l'école, au collège et au lycée, mais je tiens à élever une voix contraire : je suis essentiellement content de l'enseignement que j'ai reçu, car il était globalement bien fait, tant en mathématiques que dans les autres disciplines. C'était sérieux, rien n'était absurde. J'essaierai de montrer que certaines contraintes de l'enseignement empêchent l'enseignement des mathématiques de différer trop de ce qu'il était hier et de ce qu'il est aujourd'hui.

Ceux qui critiquent la manière dont l'enseignement est organisé sont souvent des utopistes, qui sous-estiment le temps nécessaire aux élèves pour assimiler les notions fondamentales. Le cas des proportions, des pourcentages, est intéressant : pour manipuler cette notion, difficile mais indispensable, il faut du temps. Une fois qu'on maîtrise – opérationnellement – la notion, on a le sentiment d'avoir passé un temps excessif sur un point mineur, mais il existe une grande différence entre la connaissance et la maîtrise. C'est ce que dit le proverbe chinois : «J'écoute, j'oublie ; je vois, je me souviens ; je fais, je comprends.» Faire, c'est plus long qu'entendre et que voir. Le savoir-faire ne s'acquiert qu'au prix de longues répétitions, données à des classes entières, et non à des individus. Dans un monde idéal, utopique, on pourrait accélérer l'enseignement de ces notions, en donnant un enseignant par élève ; c'est impossible, et les instituteurs ou les professeurs ont la difficile tâche de communiquer un savoir opérationnel à des classes tout entières. En général, ils font remarquablement leur travail. Plus concrètement, les mathématiques, élémentaires ou non, sont comme la langue : il faut ançonner les tables de multiplication pour les retenir, et il ne suffit pas de voir une fois l'orthographe d'un mot pour savoir l'écrire correctement. C'est une évidence qu'on oublie : la répétition s'impose dans l'enseignement, et cette nécessité coupe les ailes à bien des idées audacieuses. Il faut être pragmatique.

Répétition, certes, mais pas répétition à l'identique : un ordinateur qui dirait sans cesse la même chose aux élèves ne serait pas un bon pédagogue. C'est l'art de l'enseignant, à l'école comme à l'université, de présenter plusieurs fois les mêmes notions, en changeant de point de vue. Le cas de l'algèbre linéaire, par exemple, a un parfum qui ressemble à celui de la proportion : plus cette partie indispensable des mathématiques est enseignée tôt, plus le travail en université est facilité, car l'expérience montre qu'il faut au moins quatre ou cinq ans pour que les étudiants soient capables de dominer cet outil, à la base de bien d'autres mathématiques.

Quelle doit être la place des mathématiques dans l'enseignement ? C'est un débat très actuel : des voix se sont élevées contre la place «exagérée» qu'on leur accorderait et contre la stérilisation des esprits que causerait leur formalisme. Pourtant, de même que nous ne pouvons vivre sans apprendre à parler notre langue, nous devons savoir quelques mathématiques. C'est ce que disait Galilée : «La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans l'intermédiaire desquels il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot.» Rappelons-nous également l'abbé de Condillac : «Nous ne pensons qu'avec le secours des mots. L'art de raisonner se réduit à une langue bien faite.» Comme eux, je constate que la vie courante nous assène des chiffres, pas toujours de façon honnête. Pour vivre dans ma Cité, je dois être familiarisé avec les chiffres, avec les méthodes pour les interpréter. Les mathématiques ne sont pas une science formelle réservée à une élite : chacun a intérêt à savoir que deux augmentations successives de dix pour cent ne font pas une augmentation de 20 pour cent.

Lors d'une réunion de la Commission Fauroux, dont je fais partie, un représentant de l'industrie s'est ému que beaucoup de travailleurs n'aient pas intégré ce type de notions, élémentaires du point de vue des mathématiques. Et ce qui est vrai pour les nombres l'est aussi pour les figures : la géométrie élémentaire doit être enseignée, car c'est un outil pour vivre au quotidien.

Dans le fond, la critique de l'enseignement des mathématiques confond souvent deux aspects : la définition des programmes et le rôle des mathématiques comme instrument de sélection. Je crois qu'on peut difficilement rognier sur les programmes, qui sont moins ambitieux qu'on le dit (d'ailleurs, les universitaires se plaignent souvent de la formidable mise à niveau qu'ils ont à faire), et je protesterais énergiquement contre une diminution du programme de mathématiques dans le secondaire. Les programmes ne me semblent pas trop lourds ; s'ils étaient moins ambitieux, on risquerait de finir avec une coquille vide.

Au total, après avoir écouté les rapports qui sont présentés dans le cadre de la Commission Fauroux, j'ai l'impression que l'école primaire ne fonctionne pas si mal, et je craindrais de bouleverser l'enseignement qui y est donné. Le département d'évaluation et de prospective du ministère de l'Éducation nationale, outil précieux d'évaluation, a indiqué que le taux d'illettrisme est d'environ 15 pour cent en classe de sixième. J'admets que des efforts soient nécessaires, mais je me méfie du chiffre brut. Je comprends que les élèves maîtrisent insuffisamment la langue, la géométrie et le calcul, mais j'ai l'impression que l'école primaire fonctionne bien. Les collèges, eux, sont l'endroit où la fracture se manifeste le plus. Le problème est social ; ce

n'est pas un problème d'enseignement, et il faut des réponses spécifiques à des problèmes spécifiques. Je redoute les panacées pédagogiques, et j'aimerais d'ailleurs que l'on cesse d'en chercher.

Dans le premier cycle universitaire, également, les problèmes ne pourront être résolus par des solutions universelles. Un grave problème est celui de l'encadrement : en Droit, certains amphithéâtres réunissent 1 000 étudiants. C'est excessif ! En sciences, le problème est moins aigu, et l'encadrement des étudiants est mieux assuré. Je crois qu'il faut se diriger vers un premier cycle universitaire où la rupture avec le lycée soit moins brutale, où le suivi des étudiants soit vraiment assuré et qui offre une réelle pluridisciplinarité.

Dans le détail des programmes, maintenant, un examen de ce que l'on m'a enseigné et de ce que l'on enseigne à mon fils, qui est en classe de sixième, me montre ce que j'aimerais que l'on introduise, et aussi ce qu'il faut éviter. La théorie des ensembles, qui m'a été présentée longuement, a disparu : c'est un bien. En revanche, je regrette que l'algèbre linéaire ait disparu, car elle est indispensable. La géométrie est fondamentale, parce qu'elle donne une représentation du monde dans l'espace.

Je ne propose naturellement pas une géométrie trop sophistiquée, enchaînement de théorèmes fins, mais surtout des manipulations pratiques. Encore un truisme qu'il faut répéter : la compétence acquise est plus importante que le savoir emmagasiné. Il faut dominer le plan, l'espace, etc. et disposer de quelques définitions de base.

Naturellement un pont doit

être jeté entre la géométrie et les nombres. L'archétype d'un tel pont est donné avec les coordonnées cartésiennes, mais aussi, on l'oublie, avec la notion de mesure des longueurs, par exemple. C'est aujourd'hui enseigné assez tôt, ce qui est bien. Plus tard dans l'enseignement, on montrera, de même, que les nombres complexes peuvent être à la fois considérés comme des nombres et comme des points du plan.

J'ai déjà évoqué l'algèbre linéaire ; j'insiste pour signaler qu'elle est à la base de la maîtrise du calcul différentiel. Quand on sait que les problèmes de physique se formalisent souvent par des fonctions de plusieurs variables, on comprend son importance : cette algèbre est précisément le calcul avec de telles fonctions. En outre, ces fonctions se présentent sous la forme d'équations différentielles et d'équations aux dérivées partielles, souvent insolubles. Aussi le physicien est fréquemment obligé de remplacer les fonctions réelles par des approximations linéaires.

Comment les mathématiques doivent-elles être enseignées ? Il ne faut certainement pas verser dans un formalisme excessif. On doit donner des objets mathématiques une intuition qui n'a pas toujours à être étayée par des théorèmes précis. D'un côté, je crois formateur d'imposer une rigueur logique, mais je suis également

partisan de faire des maths «avec les mains». D'ailleurs les mathématiciens nomment arbitrairement trivial ce qu'ils n'estiment pas devoir justifier. Ce «trivial» dépend du niveau, de l'âge mathématique des élèves.

Inversement on doit s'attacher à donner aux élèves une idée claire de ce qu'est une démonstration. On ne doit pas réduire les mathématiques à des démonstrations, car ce serait contraire à leur dynamique quotidienne, à leur pratique, mais la rigueur, épaulée par l'intuition, fait beaucoup pour donner un outil intellectuel puissant. Ce que j'avance là me semble vrai même à l'université : dans mes cours, même en licence ou en maîtrise, j'alterne les parties formelles et les parties de mathématiques avec les mains, qui donnent les idées, et je fais une séparation précise entre ce qui est démontré et ce qui est suggéré. Un bon dosage est l'art de l'enseignement ; c'est ce qui est excessif qui est ridicule.

Venons-en à la question cruciale : comment intéresser les élèves ? Signalons tout d'abord que le même problème se pose en mathématiques ou en lettres : certaines techniques de conjugaison doivent être apprises et assimilées. À un niveau élémentaire, la conjugaison peut sembler sans intérêt, mais elle constitue une des bases

HEUREUSEMENT QU'IL N'Y A PLUS
DE SÉLECTION PAR LE LATIN
J'AURAIS ÉTÉ RECALÉ !

du maniement de la langue. De même, en mathématiques, les proportions, déjà évoquées, font partie de ces outils indispensables pour arriver ensuite à des mathématiques intéressantes. On peut certainement montrer des mathématiques intéressantes, mais il faut en payer le prix : on ne peut économiser l'enseignement des techniques. Comme Archimède l'avait dit au roi de Syracuse : il n'y a pas de voie royale. Je ne sais pas résoudre ce conflit mieux que ne le font les instituteurs et les professeurs : ils alternent les parties techniques et les parties intéressantes, d'une façon qui ne m'a généralement pas lassé quand j'étais à l'école, puis au collège et au lycée.

Enfin, mentionnons le problème déjà souligné de la sélection par les mathématiques. Remarquons tout d'abord que la communauté mathématique a un point de vue ambivalent. Elle est gênée qu'on lui ressasse ce refrain «Ah vous êtes mathématiciens ? Vous savez, moi je n'y comprends rien.» D'autre part, si la communauté mathématique française est une des meilleures du monde, c'est que le système de détection et d'encouragement des talents fonctionne très bien. Or ce résultat découle notamment de la sélection des élèves par les mathématiques. À vrai dire, cela ne me gêne pas que l'on sélectionne les élèves par les mathématiques, mais j'admets mal que cette sélection soit la seule. Dans le temps, la sélection par le latin permettait d'équilibrer la sélection par les mathématiques. C'était, d'une certaine façon, préférable, parce qu'avec les mathématiques seulement, on ne repère qu'un seul type de talent. Il faudrait plusieurs instruments de mesure.

Jean-Christophe Yoccoz, médaille Fields, est professeur à l'Université Paris-Sud.

Le trait retrouvé

Des tracés sur les murs confirment que les constructeurs gothiques utilisaient des méthodes exposées dans le manuscrit de Villard de Honnecourt.

Villard de Honnecourt a laissé à la postérité un carnet de 66 pages, datant du XIII^e siècle, document unique sur les techniques des constructeurs du Moyen Âge. Près d'une vingtaine d'édifices religieux, dont la très belle collégiale de Saint-Quentin, située, comme Honnecourt, dans le Vermandois, ont été attribués à Villard, mais sans qu'il existe aucune preuve.

L'architecte Pierre Bénard, en 1864, Robert Branner vers 1970, et François Bucher, plus tard, relevèrent des tracés gravés sur les murs de certaines chapelles, notamment une rose, ressemblant à la principale rose de Chartres, dont je fis en 1989 un relevé exact, et le plan d'un pilier, qui rappelaient des dessins du fameux manuscrit. En 1995, la médiéviste Ellen Shortell me signala l'existence, au pied d'une paroi sur laquelle elle releva des tracés d'arcs gravés dans la pierre, d'une petite spirale (figure g) identique à celle représentée, à côté d'une clef d'arc, sur un croquis de Villard (figure b). M'étant rendu sur place pour relever cette gravure, j'examinai, de plus près, les murs d'autres chapelles. Dans la première chapelle Sud, ayant dégagé l'étroit espace situé derrière l'autel des objets au rebut qui l'encombraient, je sentis, en caressant la pierre, des incisions continues.

La surface ayant été débarrassée délicatement – à l'aide d'un blaireau – des efflorescences de salpêtre qui la couvraient, un ensemble de tracés apparut, présentant trois arcs concentriques, le plus grand ayant un rayon de 129 centimètres. Un autre arc, de même rayon que le grand arc, et symétrique, formait avec celui-ci un arc brisé dont le sommet et les naissances étaient disposés selon un triangle équilatéral, proportion harmonieuse, fréquente dans l'architecture gothique du XIII^e siècle. Avec l'aide de Bernard Delaire, de la Société académique de Saint-Quentin, je fis, après avoir suivi les incisions avec la pointe d'un fusain tendre, un relevé en vraie grandeur (figure j). Des joints horizontaux et verticaux refaits interrompent, par endroits, la continuité des traits incisés. Sur une trentaine de centimètres à droite, deux arcs distants de quatre millimètres témoignent d'une correction.

Mais le plus remarquable était sur la droite, au bas du panneau (photographie i et figure j) une série de huit traits rapprochés, normaux aux trois arcs de cercle et convergeant vers leur centre commun. J'avais là, sous les yeux, l'application d'un procédé exposé dans le manuscrit de Villard (figure d) qui figure entre deux faces convergentes d'un vousoir, deux échelles parallèles portent un même nombre de divisions égales. Le commentaire est «par chu tail on vosoires par escandelons», c'est-à-dire «ainsi, on taille les vousoirs par échelons». En joignant par des droites les divisions correspondantes de chaque échelle, le maçon traçait des convergentes, permettant de tailler des vousoirs d'épaisseurs différentes, selon les besoins. Ce système évite la recherche du centre de la courbe, parfois inaccessible.

PRATIQUE DES CROQUIS

Ainsi sur les parois d'une église, nous voyons en application plusieurs croquis techniques du manuscrit. À une époque où n'existait ni support pratique et économique pour les plans ni moyen de les reproduire, le plus pratique était d'afficher, de façon indélébile, sur les murs, les modèles que les compagnons devaient exécuter. C'est ce qu'explique un des croquis de Villard où une sorte de socle ou de fondation montre qu'il s'agit d'une paroi verticale (figure e) ; sur ce croquis, le tracé de plusieurs arcs, comme à Saint-Quentin, est expliqué par la légende : «par chu tail om le mole don grant arc dedens III» (c'est-à-dire «Ainsi on taille le modèle d'un grand arc, (avec) trois (autres) dedans») ; il est précisé ensuite : «pies de tere», que je pense être une erreur de transcription pour «près de terre», indiquant que ces tracés se faisaient au sol, sur une paroi verticale, et non sur une aire horizontale, d'utilisation peu pratique dans l'encombrement du chantier.

L'autre confirmation que nous trouvons, à Saint-Quentin, des usages évoqués par Villard, c'est la spirale, méthode pour tracer des arcs brisés de même courbure, permettant la standardisation des cintres et des vousoirs d'une même

travée (figure f), ou de toute une série d'arcs dans un bâtiment (l'utilisation des spirales est confirmée par la série de spirales superposées, gravées sur une pierre retrouvée à Chartres).

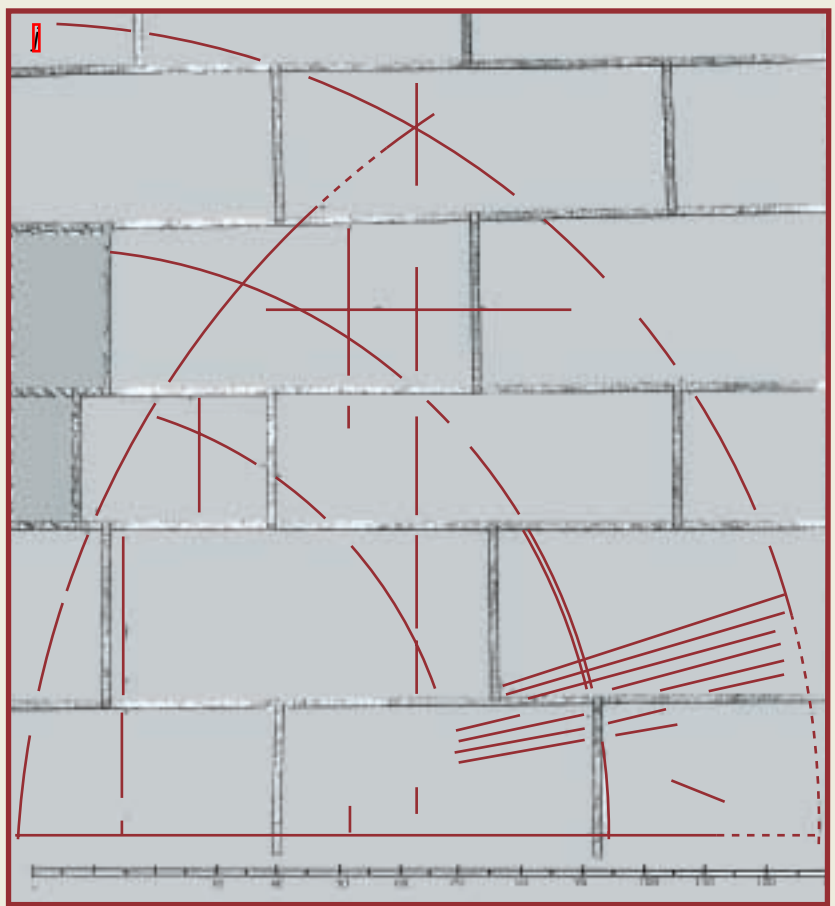
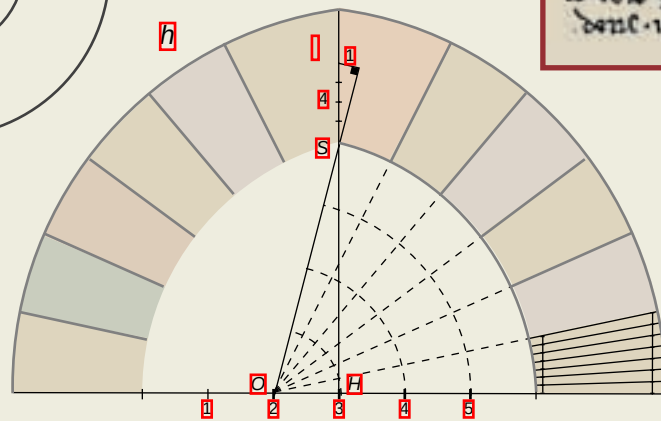
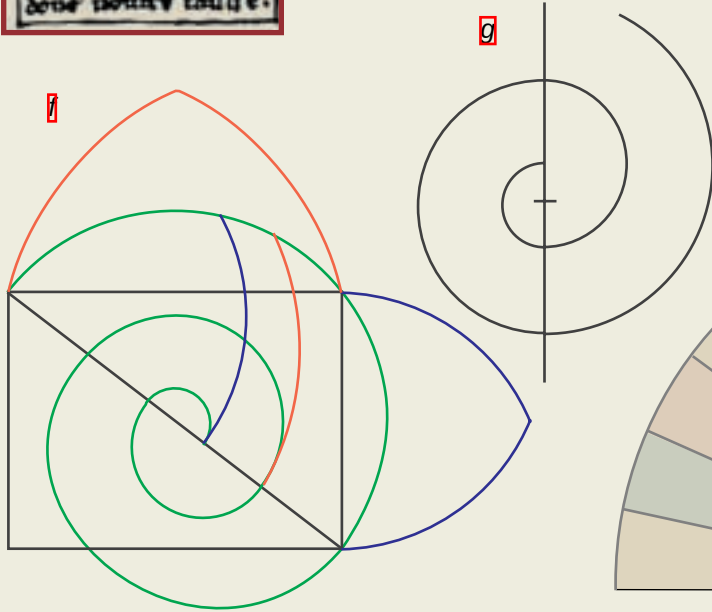
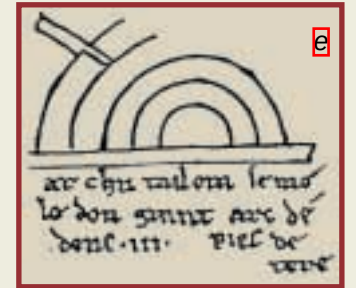
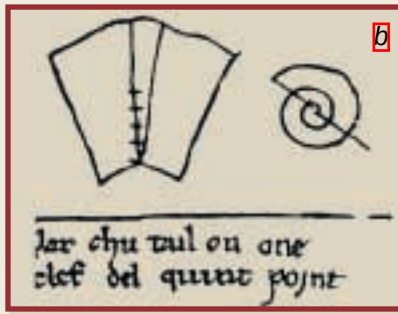
Le souci de standardisation des courbes des constructeurs est marqué par le croquis, maintes fois reproduit, du manuscrit de Villard, montrant trois arcs tracés avec la même ouverture de compas (figure c).

La troisième confirmation, et la plus intéressante, c'est l'emploi du procédé des «escandelons» pour tracer les vousoirs (figure h). En ce qui concerne les vousoirs de clef qui, pour les arcs brisés, doivent être taillés à la demande, Villard nous indique (figure b) comment faire, en reportant l'angle qui correspond à la proportion de l'arc choisi sur le vousoir standard, sans qu'il soit besoin de rechercher le centre de la courbe, comme le montre un croquis de Villard (figure a), ce qui est souvent impossible sur la paroi de traçage dont la surface est limitée. Cet angle est défini par le rapport entre le rayon de l'arc et la distance entre le centre d'un des deux arcs qui forment l'arc brisé et l'axe de celui-ci (figure b). Est figurée ici une clef de «quint point», comme sur le croquis de Villard (figure c). Le rayon de l'arc est l'hypoténuse OS d'un triangle rectangle OSH dont le petit côté est la distance séparant l'axe du centre de l'arc brisé. La connaissance de ce rapport suffit pour tailler les deux demi-clefs.

Ainsi les parois de ces chapelles présentent des exemples de plusieurs procédés exposés dans le manuscrit de Villard, la spirale figurant, comme sur celui-ci, un discret rappel de méthode, au bas de tracés d'exécution. C'est la confirmation de procédés simples et pratiques employés à cette époque, par des constructeurs qui, par ailleurs, comme le montrent d'autres dessins du manuscrit (voir Dossier «Arts et sciences au Moyen Âge», *Pour la Science*, et «Villard de Honnecourt, la pensée technique au XIII^e siècle», *Picard éditeur*.) maîtrisaient dans des cas plus complexes, la stéréotomie, le «Trait».

Que ces gravures relevées sur les murs soient anciennes est plausible, car qui se donnerait la peine de faire aussi soigneusement et précisément de telles épures, si ce n'était pour faire exécuter ces éléments ? Cependant, que ces procédés correspondent à ceux décrits dans le manuscrit de Villard ne signifie pas que celui-ci les ait, personnellement, tracés, ni qu'ils lui soient exactement contemporains. L'essentiel est d'y voir confirmer des méthodes des constructeurs du Moyen Âge, indiquées dans le manuscrit de Villard de Honnecourt.

Roland BECHMANN



Gènes anciens

De l'ADN végétal conservé dans la diatomite depuis huit millions d'années.

Pour retracer l'histoire de la vie et de l'évolution, les biologistes comparent les espèces animales et végétales fossiles avec les espèces actuelles. Depuis quelques années, l'étude de l'ADN, support du patrimoine génétique, a complété des comparaisons morphologiques : de l'ADN fossile a été extrait d'insectes de 130 millions d'années conservés dans de l'ambre jaune, et d'une feuille de magnolia de 17 millions d'années retrouvée dans l'argile de Clarkia, aux États-Unis. Nous avons découvert un nouveau milieu qui préserve l'ADN pendant plusieurs millions d'années : la diatomite.

En Ardèche, il y a environ huit millions d'années, des dépôts sédimentaires de diatomite se sont formés dans des lacs de cratères volcaniques du massif du Coiron. Ces dépôts sont constitués des squelettes siliceux d'algues microscopiques,

les diatomées. La silice est un milieu stérile, antiseptique et acide, comparable à celui des tourbières : les couches de diatomite ont préservé des organismes fossiles, végétaux et animaux, sous forme de momies naturelles. Les tissus mous (peau, poils, viscères) et même la couleur des insectes ont été conservés.

A partir de feuilles momifiées, nous avons extrait de l'ADN de chloroplastes, les organites des végétaux contenant la chlorophylle. Par la méthode d'amplification des gènes, nous avons multiplié les fragments d'ADN qui correspondent à un gène nommé *rbcl*. Les séquences de nucléotides (les éléments de base de l'ADN) de ce gène, pour les plantes actuelles, sont répertoriées dans des bases de données qui permettent de réaliser des comparaisons avec les gènes que nous amplifions.

De l'ADN extrait et multiplié à partir d'une feuille de châtaignier a donné une séquence qui correspond au gène *rbcl* de l'actuel châtaignier *Castanea sativa*, avec 99,6 pour cent de similarité. Les séquences amplifiées à partir d'échantillons prélevés sur des feuilles fossiles d'autres espèces ne correspondent pas à ces espèces.

D'OU VIENT VRAIMENT L'ADN

Ces différences sont-elles réelles ? D'autres travaux d'extraction d'ADN très ancien ont fait l'objet de controverses : l'amplification des gènes est sensible à la contamination par des matières organiques actuelles, et l'ADN multiplié par cette technique n'est pas toujours de l'ADN fossile. Si un gène amplifié à

partir d'un fossile a une très grande similarité avec son analogue actuel, c'est que l'espèce a peu évolué (c'est vrai pour les végétaux depuis huit millions d'années)... ou que l'échantillon a été contaminé.

Nous avons toutefois écarté l'hypothèse d'une contamination, sur le site ou en laboratoire : parmi les séquences génétiques obtenues, l'une correspond à la ravenelle, une plante de milieu subtropical qui pousse aujourd'hui à Madagascar. Il est peu probable que des spécimens subsistent en Ardèche.

En outre, nous avons amplifié sélectivement le gène *rbcl* des diatomées, dont le squelette compose le sédiment fossilifère, et nous avons obtenu deux séquences, l'une proche de celle de la diatomée *Cylindrotheca* et l'autre de l'algue *Pylaiella*. La contamination par des diatomées modernes est très improbable : les diatomées ont besoin, pour se développer, de lumière et d'humidité, conditions qui ne sont pas réunies dans le sédiment ni au laboratoire. L'ADN que nous avons amplifié semble bien vieux de huit millions d'années.

Nous avons ensuite appliqué la méthode d'amplification des gènes à des échantillons de diatomite qui ne contenaient pas de fossiles, en recherchant le gène *rbcl* d'espèces d'arbres. Nous avons effectivement obtenu des fragments du gène *rbcl* d'arbres, dont une séquence similaire au cèdre, à 99,8 pour cent. L'ADN fossile ne provient pas toujours des feuilles fossiles, mais aussi de la diatomite, prélevée involontairement avec les échantillons. Lors de la formation du dépôt, l'ADN aurait formé avec la silice, qui constitue les squelettes des diatomées, un complexe chimique qui aurait empêché sa dégradation par l'oxygène ou par l'eau.

Outre des feuilles d'arbre, la diatomite du massif du Coiron contient de nombreux fossiles d'animaux d'espèces aujourd'hui éteintes. Il est aujourd'hui possible d'y rechercher de l'ADN et de mieux comprendre leurs relations avec les espèces actuelles.

Bernard RIOU, Musée paléontologique de La Voulte-sur-Rhône
Jean-François MANEN, Conservatoire et Jardin botaniques de Genève



De l'ADN a été extrait d'une feuille de châtaignier fossile de huit millions d'années, conservée dans de la diatomite, dans le massif du Coiron, en Ardèche (en bas). Jusqu'à présent, seuls des insectes

conservés dans de l'ambre jaune (en haut) et des feuilles de magnolia (au milieu) fossilisées dans des argiles ont fourni des séquences génétiques plus anciennes.

Striga et lutte biologique

Des insectes et des champignons contrecarrent la prolifération d'une plante parasite africaine.

Pour lutter contre les fléaux africains, comme les criquets, les moustiques ou les plantes parasites, la lutte biologique est la plus satisfaisante du point de vue écologique. Des chercheurs français et canadiens ont montré, en laboratoire, l'efficacité et la spécificité de deux agents biologiques contre le *Striga*, une plante parasite des cultures locales. Le *Fusarium oxysporum* est un champignon qui empêche la germination des graines et le développement de la plante, tandis que le *Smicronyx* est un coléoptère qui prévient la prolifération du *Striga* en se nourrissant de ses graines directement dans le fruit.

Parasite africain des cultures vivrières (sorgho, mil, maïs...) connu depuis des siècles, le *Striga* est un fléau depuis une vingtaine d'années : les sécheresses prolongées ont fragilisé les céréales qui ont plus de mal à lutter contre le parasite. On connaît une quarantaine d'espèces de *Striga* parmi lesquelles le *Striga hermonthica* est le plus virulent. Dans les pays africains où l'agriculture est encore extensive (comme le Sahel), ce parasite menace les populations de famine. Ne pouvant voir les graines microscopiques, les paysans africains pensent que le *Striga* est un envoyé des dieux, et le laissent se ressemer sur place ; aussi la prolifération est-elle explosive, chaque plant produisant entre 10 000 et 50 000 graines.

Malgré d'importantes recherches, l'éradication totale du parasite semble utopique. Il est donc nécessaire de diminuer efficacement le taux d'infestation des champs cultivés en tirant profit de multiples axes de lutte : changement des habitudes culturelles au travers de l'éducation des populations locales, lutte physique, chimique et biologique.

La sélection de variétés de céréales résistantes au *Striga* est prometteuse en théorie mais, sur le terrain, la variabilité génétique du parasite est telle que la résistance n'est pas stable. Parmi les autres méthodes testées, certaines

ne réduisent pas suffisamment le taux d'infestation des champs (germinations suicides, faux hôtes), d'autres sont trop onéreuses pour être utilisables en Afrique. Par exemple, la méthode de la «solarisation», qui consiste à recouvrir le sol d'un film de plastique durant la période la plus chaude de l'année, tue les graines en chauffant le sol par effet de serre. Cette technique, très efficace puisqu'elle débarrasse également le sol d'autres mauvaises herbes, n'est envisageable que sur des parcelles expérimentales. Pour supprimer les graines, l'utilisation d'ennemis naturels paraît plus prometteuse.



Plant de *Striga hermonthica* avec deux fruits. En bas, un fruit sain et, en haut, un fruit qui a développé une galle. Le *Striga* produit cette excroissance sous l'influence de *Smicronyx*, de petits coléoptères qui se nourrissent des graines du fruit.

Après inventaire des ennemis naturels du *Striga*, l'insecte le plus efficace est le *Smicronyx*, un petit coléoptère fréquemment observé en Afrique. Quelle est l'efficacité de cet insecte ? Josiane Paré et Isabelle Pronier, de l'Université Jules Verne de Picardie (Amiens), ont répondu en partie à cette question en montrant que dans une capsule de

Striga colonisée par le *Smicronyx*, moins de dix pour cent des graines subsistaient : l'insecte se nourrit des graines encore jeunes. Le *Smicronyx* avait été introduit en Éthiopie en 1978, mais en 1988, alors que l'on pensait qu'il s'y était établi, il avait totalement disparu. Les résultats obtenus inciteront les chercheurs à le réintroduire et à favoriser sa prolifération.

LE CHAMPIGNON TUEUR ET LE PARASITE

Le *Fusarium oxysporum* est un champignon présent en Afrique de l'Ouest. Depuis sa découverte sur des plants de *Striga* en 1977, des recherches ont été menées pour étudier son pouvoir destructeur notamment par M. Ciotola et ses collègues, de l'Université McGill au Québec.

Les expériences ont porté sur 205 souches de champignon prélevées sur des plants de *Striga hermonthica* malades au Burkina, au Nigeria et au Mali. On étudie l'effet du *Fusarium* sur la croissance de la plante parasite et on s'assure que le champignon parasite n'a pas d'effets néfastes sur différentes céréales, et enfin, on précise sa viabilité et sa toxicité.

Les expériences ont montré que l'une des souches de *Fusarium oxysporum* réduisait considérablement la croissance du *Striga hermonthica*. Dans un pot, sur un substrat de paille de sorgho inoculé avec le champignon, des graines de sorgho ainsi que des graines de *Striga* ont été disposées. Une proportion importante (64 pour cent) des graines de *Striga* qui germaient et avaient commencé à parasiter le sorgho était détruite par le *Fusarium*. De plus, sur d'autres céréales et légumineuses courantes en Afrique (millet, maïs, arachide, niébé) inocuées avec du *Fusarium*, aucun effet retardateur ni aucune évolution de la maladie n'ont été observés. Finalement, après une période de 18 mois, le champignon survivait dans toutes les cultures.

Pour s'assurer que ces expériences en laboratoire reflètent l'activité du champignon dans les conditions naturelles, l'équipe canadienne va introduire le *Fusarium* en Afrique, après avoir vérifié que d'autres cultures comme le riz et la patate douce n'en souffrent pas. Avant d'avoir des résultats précis quant à l'efficacité de ces méthodes sur le terrain, il faudra attendre quelques années. Longue attente... Toutefois, si ces deux méthodes sont efficaces, elles pourraient convaincre une opinion déçue des résultats des expériences passées de lutte biologique. □

Le Grand Attracteur débusqué?

Des astronomes ont observé une immense concentration de matière derrière la Voie lactée.

Le Grand Attracteur désigne un point du ciel austral qui attire les galaxies environnantes. Depuis sa découverte, en 1987, aucune des recherches entreprises pour débusquer le responsable de cette attraction n'avait permis de trouver la condensation principale. Avec une équipe internationale d'astronomes, nous venons d'observer, caché par la Voie lactée, un amas de galaxies très massif près de la région du Grand Attracteur.

Le long ruban lumineux qu'est la Voie lactée masque un quart du ciel extragalactique. Dans cette région, les superamas, grandes structures où s'agglutinent les galaxies et les amas de galaxies, n'étaient pas visibles. Il fallait explorer cette région du ciel.

Derrière la Voie lactée, alors qu'on connaissait seulement 260 galaxies brillantes, 10 000 sont maintenant répertoriées. Un vieil instrument, destiné initialement à comparer des plaques photographiques pour trouver des étoiles variables, permet d'inspecter les plaques

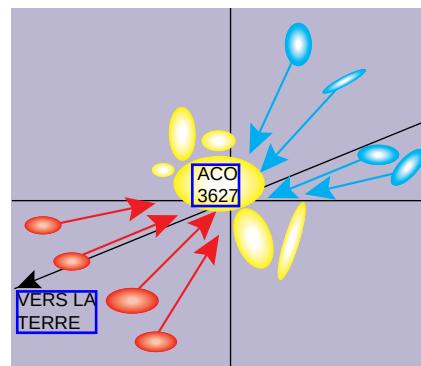
en les agrandissant 50 fois sur un écran. On distingue ainsi les galaxies des étoiles, par leurs contours irréguliers. L'œil reste le meilleur outil d'analyse dans cette zone très encombrée par les étoiles de notre Galaxie. Cependant, à mesure que l'on se rapproche de la zone centrale du plan galactique, il est de plus en plus difficile de trouver les galaxies, car la poussière absorbe leur rayonnement.

LA TRAQUE

Situé à une distance de 300 millions d'années-lumière, le Grand Attracteur doit contenir une grande quantité de matière (5×10^{16} fois la masse du Soleil) pour expliquer l'attraction des galaxies à des vitesses comprises entre 500 et 600 kilomètres par seconde. Les nombreuses équipes à la recherche de cette masse ont trouvé que la densité de galaxies dans la région était deux fois supérieure à la normale, mais l'amas de galaxies qui aurait dû se trouver au centre restait indécélé.

Pourtant, l'amas révélé par notre étude était déjà identifié par le numéro 3627 dans le catalogue d'amas d'Abell, Corwin et Olowin, qui contient environ 4 000 autres amas. Il y est noté qu'une cinquantaine de galaxies appartiennent à l'amas. Nous en avons trouvé plus de 600. Seules les galaxies les plus brillantes de cet amas avaient été remarquées, les autres, trop petites ou trop faibles – obscurcies par le plan galactique – avaient été écartées.

Le repérage des galaxies sur les plaques ne suffit



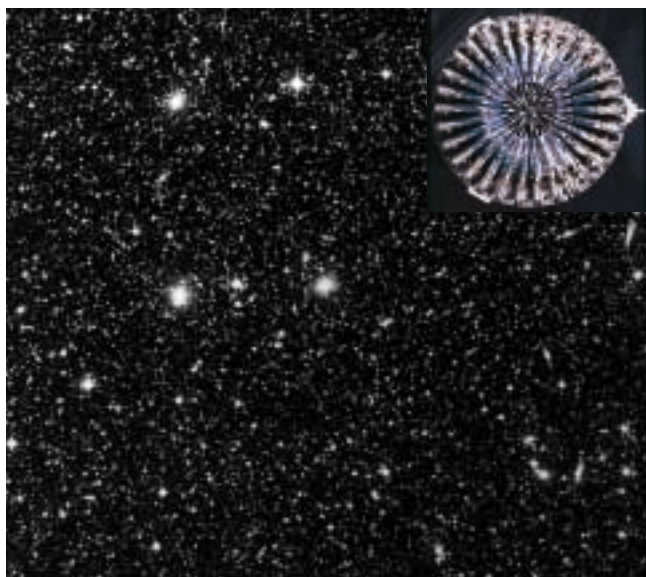
L'amas ACO 3627, condensation centrale du Grand Attracteur, contient plus de 600 galaxies. De la Terre, dans un référentiel où cet amas est fixe, les galaxies situées devant lui (en rouge) s'éloignent, tandis que celles plus éloignées (en bleu) s'approchent.

pas pour affirmer qu'elles appartiennent au même amas. Il faut encore vérifier qu'elles sont à la même distance. En raison de l'expansion de l'Univers, la distance et la vitesse d'éloignement des galaxies sont proportionnelles. La distance des galaxies est mesurée par leur spectre où l'on détermine le décalage vers le rouge. En raison de l'effet Doppler, ce décalage est proportionnel à la vitesse d'éloignement et donc à la distance.

Trois approches complémentaires ont été utilisées pour étudier les galaxies et leurs vitesses d'éloignement. On a observé les régions les plus denses en étoiles de la Voie lactée à l'Observatoire européen de La Silla (Chili), avec le système de positionnement automatique à fibres optiques MEFOS. Fixé au foyer du télescope de 3,6 mètres, MEPOS permet l'observation simultanée de 29 galaxies. Les spectres des galaxies situées dans des zones moins denses ont été obtenus objet par objet, au télescope de 1,93 mètre de l'Observatoire Sud Africain, et les galaxies peu lumineuses ont été observées au radiotélescope de Parkes, en Australie.

La mesure d'une centaine de vitesses de galaxies dans la région de l'amas ACO 3627 révèle que toutes ces galaxies sont à la même distance et qu'elles appartiennent bien à l'amas. Situé à 300 000 années-lumière, cet amas, aussi massif que l'amas de Coma, est situé à moins de neuf degrés de la position prédite et possède une vitesse proche de celle du Grand Attracteur. Toutefois, sa masse ne représente que dix pour cent de la masse totale attendue pour le Grand Attracteur : cette condensation n'est pas le Grand Attracteur, mais constitue son centre, inséré dans un superamas plus important.

R. KRAAN-KORTEWEG et C. BALKOWSKI
DAEC, Observatoire de Meudon



Photographie de la région centrale de l'amas ACO 3627. La galaxie la plus brillante (au centre), elliptique, est la radiosource la plus intense de l'hémisphère austral. Un examen attentif de la photographie révèle 59 galaxies. La densité des étoiles de notre Galaxie explique la difficulté de la recherche de galaxies derrière la Voie lactée. En cartouche l'instrument MEPOS construit à l'Observatoire de Paris.

Un bruit précieux

Les pilotes d'avion détournent des informations.

Au début du xx^e siècle, Frederick Taylor pensait que la planification rigide des gestes et des comportements au travail augmentait l'efficacité. Il a eu de nombreux successeurs. Toutefois, l'homme qui travaille crée des usages imprévus à ses outils. Les pilotes de ligne, par exemple, utilisent des informations qui ne leur sont pas destinées, pour accroître la sécurité de leur pilotage.

Pendant un vol, un pilote de ligne est en contact radio permanent avec un

qui lui sont adressés. Un projet d'amélioration de la sécurité des vols repose sur la numérisation de ces communications : le bruit de fond serait supprimé, afin d'améliorer les conditions de travail des pilotes.

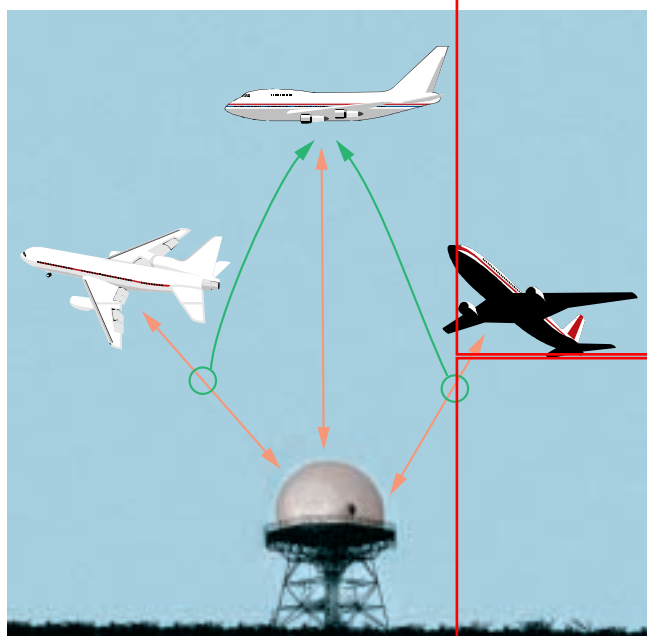
Ce bruit de fond contient toutefois des informations auxquelles les pilotes n'ont pas accès autrement dans leurs cockpits. Chaque pilote laisse ainsi en permanence «traîner une oreille» et obtient des informations sur le trafic et sur le contrôle ; il les utilise pour construire une représentation de l'espace aérien où il évolue. Les instructions du contrôleur sont alors replacées dans leur contexte. Elles sont plus intelligibles et leur justification apparaît : les pilotes les mettent en œuvre plus efficacement. En outre, de nombreuses informations extraites de ce flot de paroles permettent aux pilotes d'anticiper sur la suite du vol : à la vitesse des avions, anticipation est synonyme de fiabilité. Loin d'être de simples exécutants d'ordres émis par ceux qui ont

l'information, les pilotes participent activement à la qualité du contrôle aérien. L'amélioration des communications entre pilote et contrôleur passe donc par une restitution des informations portées par le «bruit de fond».

Dans de nombreuses autres activités professionnelles, ce qui apparaît comme un bruit, une gêne, voire un élément insignifiant est une source d'informations. La tâche effectivement réalisée par l'opérateur n'est pas exactement celle qui lui est prescrite

par l'entreprise. Cette différence naît de la capacité des utilisateurs à créer des usages non initialement prévus mais adaptés à leur activité, de l'utilisation comme marteau d'un manche de tournevis à un savoir-faire professionnel élaboré. L'identification de ces usages est cruciale dès que l'on envisage de modifier le poste de travail : on risque sinon de priver l'opérateur d'un outil essentiel dont l'usage serait ignoré.

Sophie DUSIRE
Laboratoire d'ergonomie du CNAM



Les pilotes se construisent une représentation de leur espace aérien à l'aide des informations qu'ils échangent avec le centre de contrôle (flèches orange) et en écoutant les conversations entre le contrôle et les autres avions du secteur (flèches vertes).

centre de contrôle au sol, qui gère l'ensemble du trafic de sa portion d'espace aérien. En principe, le pilote doit se contenter d'obéir aux instructions du contrôleur : c'est ce dernier qui détient l'information pertinente pour orienter l'avion. Dans le système actuel de communication entre les contrôleurs et les pilotes, chaque pilote entend les conversations échangées entre le centre de contrôle et tous les avions présents dans le même secteur que lui. Dans ce bruit de fond, il doit sélectionner les messages

Dopamine et comportement

En perturbant spécifiquement certains récepteurs du système de la dopamine, on en élucide le fonctionnement.

Le système nerveux central fonctionne grâce à plusieurs neurotransmetteurs, notamment à la dopamine, qui participe au contrôle des mouvements, aux fonctions cognitives et à l'humeur ; on la surnomme le neurotransmetteur de la récompense. Si l'on connaît les grandes lignes du fonctionnement cérébral, on ignore certains détails des mécanismes : les cibles précises des neurotransmetteurs, les systèmes de rétrocontrôle, les causes des anomalies responsables de diverses pathologies, telles la maladie de Parkinson ou la schizophrénie. De nouveaux modèles animaux permettent de les préciser.

Jusque dans les années 1960, on étudie le fonctionnement des différents systèmes de neurotransmetteurs, en détruisant les neurones utilisant ces neurotransmetteurs. Ainsi pour les neurones dopaminergiques, on injecte une neurotoxine dans le locus niger d'un rat, siège de nombreux neurones dopaminergiques. Cette méthode reproduit les symptômes des patients atteints de la maladie de Parkinson, et permet aux biologistes d'étudier *in vivo* la fonction des récepteurs dopaminergiques. Par ailleurs, en administrant des agonistes et des antagonistes dopaminergiques (des molécules qui potentialisent ou qui inhibent l'action de la dopamine) à des rats déficients en dopamine, on détermine quels sont les effets comportementaux dus à l'activation ou à l'inactivation des récepteurs dopaminergiques.

Malheureusement, cette méthode brutale détruit tous les sous-types de récepteurs dopaminergiques, et ne différencie pas leur rôle spécifique.

Aujourd'hui, on connaît cinq types de récepteurs dopaminergiques, identifiés par leur séquence génétique, et qui sont pharmacologiquement distincts : les récepteurs D₁, D₂, D₃, D₄ et D₅. Grâce à leurs homologues de structure et de fonction, on a regroupé D₁ et D₅, d'une part (c'est la sous-famille D₁), et D₂, D₃ et D₄, d'autre part (c'est la sous-famille D₂). On sait différencier l'action pharmacologique des deux sous-familles, mais on a des difficultés à préciser la fonction des différents membres de chaque sous-famille.

Pour y parvenir, les biologistes utilisent les techniques du génie génétique qui

modifient spécifiquement l'expression d'un gène *in vivo*, et par conséquent, la production d'une protéine particulière. Deux modèles animaux ont ainsi été obtenus récemment : dans le modèle d'Emiliana Borrelli et de ses collègues de l'Unité CNRS UPR 6520, à Strasbourg, le gène codant le récepteur D₂ est spécifiquement inactivé ; dans le modèle de Bruno Giros de l'Unité INSERM 288, à Paris, et de ses collègues de l'équipe de Marc Caron, à l'Université Duke, le gène codant le transporteur de la dopamine, la molécule qui permet la recapture du neurotransmetteur par le neurone présynaptique, est inactivé.

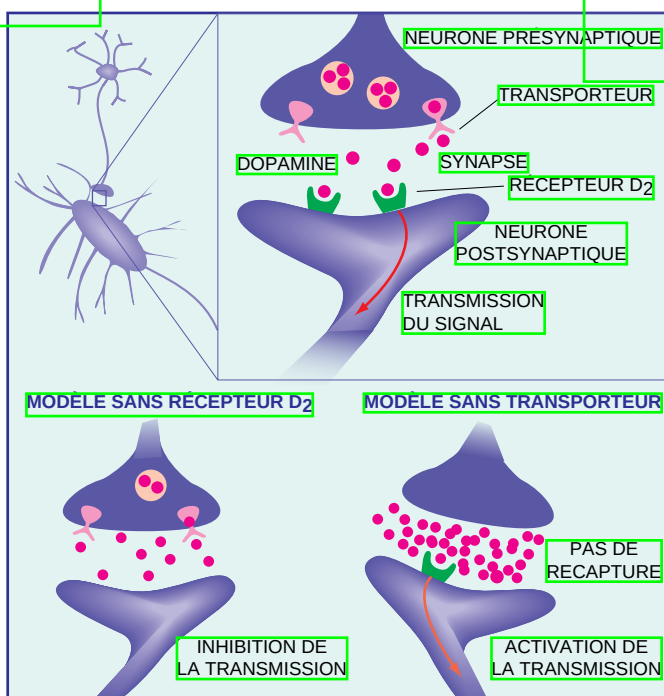
LES RÉCEPTEURS D₂

Les souris obtenues par l'équipe d'E. Borrelli n'expriment plus le récepteur dopaminergique D₂, et elles présentent des anomalies de comportement : elles ont des difficultés de locomotion et de coordination des mouvements. Tous les autres sous-types de récepteurs dopaminergiques sont exprimés normalement. D'après ce modèle, le récepteur D₂ est le principal responsable des fonctions de locomotion et de coordination *in vivo*. De plus, les souris transgéniques ont des symptômes très semblables à ceux des

patients atteints de la maladie de Parkinson qui souffrent de rigidité musculaire et de tremblements.

Chez ces personnes, la concentration en dopamine diminue notablement (jusqu'à 80 pour cent de sa valeur normale) en raison de la destruction de nombreux neurones dopaminergiques. Les troubles observés chez le modèle animal étant très semblables aux troubles moteurs des parkinsoniens, on en conclut que ces derniers sont essentiellement dus à un défaut de stimulation des récepteurs D₂. Ce nouveau modèle animal servira à tester l'efficacité des traitements futurs de la maladie de Parkinson, et permettra de distinguer, *in vivo*, les molécules spécifiques des récepteurs D₂ de celles qui agissent sur les autres récepteurs de la même famille.

Quand les récepteurs D₂ sont absents, les neurones postsynaptiques ne sont pas activés : le système dopaminergique est inhibé. Au contraire, dans le second modèle, le système dopaminergique est stimulé à l'ex-



La dopamine assure la transmission de certains messages cérébraux. Normalement, elle se lie à ses récepteurs postsynaptiques, par exemple aux récepteurs D₂, ce qui active la transmission. Quand elle a fini d'agir, la dopamine est partiellement recaptée par le neurone présynaptique par l'intermédiaire d'un transporteur spécifique. Dans le neurone, elle est stockée dans des vésicules. Dans le modèle animal privé de récepteurs D₂ postsynaptiques (en bas à gauche), le système dopaminergique est inhibé. Lorsqu'un animal est dépourvu de transporteurs de la dopamine (en bas à droite), le neurotransmetteur s'accumule dans la fente synaptique et active sans arrêt le système. Le nombre des récepteurs postsynaptiques diminue afin de s'opposer à l'action de la dopamine en excès.

cès parce que le système ne cesse d'émettre des signaux. Pour que la transmission assurée par la dopamine soit spécifique, elle doit être limitée dans le temps et dans l'espace. Normalement, après avoir agi sur les neurones postsynaptiques, la dopamine est recaptée par les neurones d'origine (elle est aussi un peu dégradée par des enzymes présentes dans la fente synaptique, l'espace qui sépare neurones présynaptiques et neurones postsynaptiques). La recapture est assurée par des transporteurs, des molécules transmembranaires localisées sur le neurone présynaptique.

Dans le modèle de B. Giros, les transporteurs ne sont pas fabriqués, de sorte que la recapture de la dopamine n'a pas lieu. On constate que les animaux ont une activité locomotrice anormalement élevée : les souris sont cinq à six fois plus actives que les souris témoins (on enregistre le nombre d'allées et venues des souris dans leur cage au moyen de deux cellules photoélectriques, placées selon les deux axes de la cage).

LA SUPPRESSION DU TRANSPORTEUR

Pourquoi une telle hyperactivité? La dopamine, qui n'est pas recaptée par le neurone présynaptique, agit en permanence sur les neurones postsynaptiques, activant sans cesse le système. Le système nerveux tente de pallier cet excès de dopamine : les neurones présynaptiques libèrent moins de dopamine et le nombre de récepteurs postsynaptiques, sur lesquels agit la dopamine, diminue notablement. Bien que la production de dopamine et que l'efficacité de la transmission diminuent, le système est hyperstimulé : la dopamine reste 100 fois plus longtemps dans la fente synaptique que chez les témoins.

De surcroît, on constate que les souris qui n'ont pas de transporteur de la dopamine sont insensibles à la cocaïne. Normalement, cette drogue agit par l'intermédiaire du transporteur de la dopamine : elle augmente les concentrations en dopamine dans les synapses en se liant au transporteur, empêchant le neuromédiateur de s'y fixer, ce qui inhibe sa recapture. Chez les animaux transgéniques, la recapture est déjà inhibée, et la cible de la cocaïne n'existe pas : l'inhibition du transporteur de la dopamine a les mêmes conséquences que l'administration de cocaïne.

Ces animaux permettront aux neuropharmacologues de préciser les mécanismes liés à la dépendance et de mieux comprendre la schizophrénie, puisque les patients qui en sont atteints ont un système dopaminergique hyperstimulé ☐

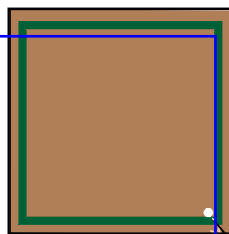
JEU-CONCOURS

N°22

BILLARDS DE MATHÉMATICIEN

Au billard, l'adresse

des joueurs étant de plus en plus grande, on impose parfois de ne toucher la boule visée qu'après avoir fait une «bande», c'est-à-dire avoir ricoché sur un côté du billard. Ce mois-ci, je vous propose d'étudier cette technique sur des billards de formes polygonales avec des boules idéales réduites à un point. Il n'est pas difficile de démontrer que sur un billard en triangle équilatéral, partant d'un sommet, on peut toucher n'importe quelle boule dans le triangle après une, deux ou trois bandes différentes sauf le centre du triangle avec une seule bande, car la boule «projectile» frappera la boule cible avant d'avoir effectué la bande imposée. Qu'en est-il sur un billard carré? Plus précisément, partant d'un sommet, quelles sont, en pourcentage, les surfaces maxima du billard à l'intérieur desquelles on peut toucher une boule après une, deux, trois ou quatre bandes différentes? Il est entendu que la boule cible ne doit être



touchée qu'après le nombre de bandes imposées et qu'une fois le sommet de départ, et la ou les bandes choisies, on ne peut en changer selon la position de la boule cible. Envoyez-nous vos réponses à ces quatre questions.

Si cela vous amuse vous pouvez étudier le même problème sur un billard hexagonal régulier avec réflexions sur une, deux ou trois bandes différentes. Naturellement on supposera une réflexion parfaite sur les côtés : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion par rapport à la normale au point de contact, et d'autre part une boule arrivant sur un sommet sera considérée comme non réfléchi.

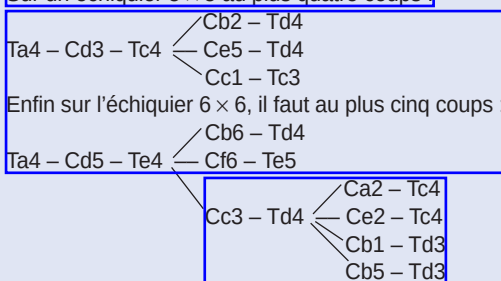
Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'avril 1996, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°20

Aux symétries près par rapport aux diagonales de l'échiquier, le cavalier est dans une position perdante au coup suivant sur que sur les cases a1, b1 et b2 (en notation échiquéenne) la tour étant respectivement en b2, d3 et d4. Partant de cette constatation, la tour capture le cavalier en au plus trois coups sur l'échiquier 4 x 4, à savoir :

Ta3 – Cc2 – Ta4... prise au coup suivant.

Sur un échiquier 5 x 5 au plus quatre coups :



Remarque : Sur un échiquier n x n, pour n supérieur à 7, on démontre que le cavalier peut toujours échapper à la tour.

La pollution radio

Quelle stratégie pour la radioastronomie du XXI^e siècle, face à la saturation du domaine hertzien ?

Associée à la plupart des découvertes récentes, la radioastronomie sera un atout majeur de l'astronomie du siècle prochain. Cependant, elle pourrait être condamnée par la croissance incontrôlée des moyens de télécommunication. Il est donc urgent que les radioastronomes s'inquiètent d'une nécessaire réglementation.

La plupart des corps célestes émettent en radio entre 10 mégahertz et 400 gigahertz. On détecte des raies spectrales, comme l'hydrogène neutre à une fréquence de 1 420 mégahertz (équivalente à une longueur d'onde de 21 centimètres) et du rayonnement continu. Dans le futur, la radioastronomie jouera un rôle d'autant plus important que certains phénomènes ne sont observables qu'aux grandes longueurs d'onde, telles la contraction des nuages proto-stellaires à très basse température, l'émission des objets compacts (pulsars, trous noirs), la chimie de nombreuses molécules et, pourquoi pas, les premières communications avec des civilisations extraterrestres.

Depuis quelques années, les services de télécommunication se développent et demandent qu'on leur attribue de nouvelles bandes de fréquence. Il en résulte une congestion du domaine hertzien, surtout dans la partie basse du spectre entre 10 mégahertz et 50 gigahertz, car cette gamme de fréquence offre de nombreux avantages : des antennes qui rayonnent une puissance importante dans un grand angle solide, des récepteurs peu

coûteux utilisant des techniques éprouvées et des réseaux bien implantés.

Lors de conférences mondiales bi-annuelles, l'Union internationale des télécommunications attribue et contrôle les services utilisateurs d'ondes radio. Les trois services passifs (radioastronomie, téledétection et recherche spatiale par satellite) sont menacés pour trois raisons.

Tout d'abord ils ne contrôlent pas la puissance des divers émetteurs naturels : océans, forêts, atmosphère, comètes, planètes, étoiles, galaxies ou trous noirs. Comme les signaux reçus sont très faibles, les radiotélescopes possèdent à la fois de grandes antennes et des récepteurs très sensibles. Ils sont donc vulnérables aux émissions artificielles : alors qu'en radioastronomie, on détecte des radiosources à un niveau 10 000 fois inférieur à celui du bruit de fond des récepteurs, pour les télécommunications le signal reçu est 100 fois supérieur au bruit de fond.

Ensuite, les radioastronomes ne contrôlent pas les fréquences de leurs émetteurs. Pour l'observation des raies spectrales, l'expansion de l'Univers décale vers le rouge toutes les longueurs d'onde. Ainsi, la raie de l'hydrogène peut s'observer entre 1420 mégahertz (sa fréquence au repos) et 320 mégahertz.

Enfin, les services scientifiques pèsent peu face aux puissants groupes de télécommunications. Comme toute ressource rare, le domaine hertzien est de plus en plus convoité et le « mégahertz » prend une valeur d'autant plus éle-

vée qu'il est à basse fréquence. Plusieurs administrations envisageraient même de taxer l'utilisation des bandes de fréquences, y compris pour les services passifs comme la radioastronomie...

VERS UNE STRATÉGIE GLOBALE

Aujourd'hui, les radioastronomes sont les seuls concernés, mais demain, la menace s'étendra aux astronomes du visible et de l'infrarouge. Aussi est-il nécessaire que les scientifiques se mobilisent pour défendre ce patrimoine naturel. La stratégie à suivre prendra en compte plusieurs aspects.

Contrairement aux autres services utilisateurs actifs du domaine hertzien, la radioastronomie ne possède pas de bureau des fréquences, indispensable pour étudier la compatibilité entre les bandes de fréquence utilisées par la radioastronomie et celles des autres services.

Même si les niveaux de puissance nuisibles définis en 1979 sont restés inchangés, alors que la sensibilité des observations s'est améliorée, les radioastronomes ne réclament pas leur redéfinition mais, au moins, le strict respect de ces limites.

Face à la montée des parasites de tous genres, la seule stratégie à l'échelon national est de protéger localement les stations de radioastronomie existantes (qui sont peu nombreuses) en établissant, autour d'elles, une zone de silence radio. Cela est difficile car un radar ou un émetteur de télévision peut perturber un radiotélescope dans un rayon de 50 kilomètres !

Les émetteurs artificiels peuvent se déplacer vers des fréquences plus élevées, y compris l'infrarouge et le visible pour des liaisons en dehors de l'atmosphère terrestre. Enfin, le câble blindé et surtout la fibre optique permettent de grands débits d'informations entre points fixes : ils économisent l'espace hertzien.

Les mesures de protection envisagées pour les sites actuels de radioastronomie ne respectent pas les besoins de la recherche et il faut trouver des sites qui permettront d'atteindre des sensibilités supérieures. La face cachée de la Lune serait un site idéal puisque l'absence d'ionosphère et d'atmosphère donne accès à tout le spectre radio entre 100 kilohertz et 400 gigahertz. Cependant, le coût d'une station lunaire est tel que l'on doit envisager des projets intermédiaires, comme l'installation d'une station terrestre dans une région isolée et non parasitée.

Eric GÉRARD — ARPÈGES
Observatoire de Meudon



Le développement des zones habitées est mesuré par leur luminosité nocturne. L'explosion des télécommunications sature l'espace hertzien au détriment de la radioastronomie.

Vitamines : pas d'abus

La surconsommation d'oligo-éléments et de vitamines est néfaste.

Vous êtes fatigué ? Prenez des vitamines ! Malgré l'engouement pour les vitamines et les oligo-éléments, tels le fluor, le sélénium ou le zinc, ce conseil ne semble pas devoir être suivi. Jusqu'à présent, en France, les aliments ayant reçu un ajout de vitamines ou d'oligo-éléments étaient soumis à la réglementation des produits diététiques, mais avec les nouvelles réglementations européennes, ils risqueront d'échapper à tout contrôle. Les compléments alimentaires (pilules, gélules...) n'appartiennent en revanche aujourd'hui à aucune catégorie juridiquement définie. Existe-t-il un risque de surconsommation de vitamines et d'oligo-éléments ? Pour le savoir, les experts du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) ont analysé toutes les publications qui mentionnaient les accidents dus à une consommation excessive (aiguë ou chronique) de vitamines et d'oligo-éléments. Ils ont établi des limites à ne pas dépasser : elles ont été fixées à des valeurs dix fois inférieures aux plus petites doses déclenchant des effets toxiques.

Le zinc est l'un des métaux les moins toxiques. De nombreuses molécules biologiques (des enzymes et les protéines à doigt de zinc) en contiennent. Ainsi, une carence a des conséquences néfastes, et un apport de cet élément améliore l'état de certains patients. Toutefois une surconsommation risque d'entraîner des troubles digestifs et une anémie. En ce qui concerne le sélénium, les apports alimentaires semblent suffisants pour éviter tout risque de carence. Un déficit en fer, tout comme une surcharge sont dommageables. Certaines personnes risquent de présenter une carence : les jeunes femmes, les femmes enceintes et les jeunes enfants. C'est aux médecins qu'il appartient de normaliser leur concentration en fer. En revanche, d'autres patients souffrent d'hémochromatose : leur concentration sanguine en fer est supérieure à la normale, et tout apport complémentaire détériore leur état général.

Comme la plupart des oligo-éléments, les vitamines sont à la fois indispensables et toxiques à forte dose. La carence en vitamine A est un problème de santé

publique dans de nombreux pays en développement, où elle est responsable de cécité. En revanche, cette vitamine est consommée en quantité suffisante dans les pays industrialisés et tout excès risque d'être nocif. Des intoxications chroniques apparaissent après une absorption prolongée de fortes doses et se manifestent par des maux de tête, des nausées et des hémorragies. De surcroît, la vitamine A consommée par les femmes enceintes est tératogène : d'après une étude espagnole, le risque de malformations congénitales non chromosomiques est près de dix fois supérieur quand la mère a consommé de la vitamine A durant sa grossesse.

Contrairement aux autres vitamines, uniquement apportées par l'alimentation, la vitamine D est pour partie d'origine endogène. Un déficit favorise le rachitisme, mais un excès a des conséquences toxiques. La vitamine E est peu toxique, même à fortes doses. Les vitamines A, D ou E sont liposolubles (solubles dans les graisses), c'est-à-dire qu'elles restent stockées plus longtemps dans les tissus que les vitamines hydrosolubles, par exemple la thiamine, la vitamine B₆ ou l'acide folique ; ces dernières, rapidement métabolisées et excrétées, sont peu toxiques. Néanmoins, des doses élevées risquent de perturber divers métabolismes.

AJUSTER L'APPORT ALIMENTAIRE

La vitamine A est apportée par les produits laitiers, la E par les huiles végétales, le zinc par la viande et les crustacés, le sélénium par les végétaux et le fluor par les eaux de boisson. Aujourd'hui, déjà, le sel de cuisine est enrichi en iode et en fluor. En outre, les pâtes dentifrice, dont les enfants absorbent une fraction notable lorsqu'ils se brossent les dents, contiennent du fluor. De surcroît, sur certains aliments figure la mention «à teneur garantie en vitamines» : cela indique que des compléments ont été ajoutés pour restituer les concentrations en vitamines présentes dans l'aliment avant qu'il n'ait été congelé ou traité par la chaleur.

D'après le rapport du CSHPF, l'alimentation fournit, en France, suffisamment de vitamines et d'oligo-éléments à la population générale. Pourtant, les personnes défavorisées sont parfois carencées, et la question se pose : doit-on enrichir en oligo-éléments et en vitamines les aliments de grande consommation, le pain par exemple ? Les personnes carencées bénéficieraient de cette mesure, mais la population non carencée ne risque-t-elle pas d'absorber un excès de vitamines et d'oligo-éléments ? La question reste, comme celle de la fluoration des eaux, ouverte. □

Art et culture préhistorique

Il y a 14 000 ans, les populations des Pyrénées et du Nord de l'Espagne formaient un ensemble culturel homogène.

Qu'est-ce que la culture ? Les préhistoriens distinguent les populations, dans l'espace et dans le temps, d'abord sur la base des techniques qu'elles utilisaient pour tailler le silex : les outils en pierre sont les restes les mieux conservés. Les ensembles techniques ainsi définis étaient toutefois subdivisés en groupes culturels régionaux : aujourd'hui encore, des cultures très différentes utilisent les mêmes outils, tels les automobiles ou les ordinateurs. Les Magdaléniens, qui vivaient il y a 17 000 à 11 000 ans, ont fabriqué de nombreux objets d'art, qui permettent de préciser les contours de territoires culturels. Des fouilles récentes, en France et en Espagne, révèlent une unité artistique sur le versant Nord des Pyrénées et la côte Cantabrique, au Nord de l'Espagne. L'univers symbolique des populations de cette région était différent de celui de leurs voisins.

Il y a 14 500 ans, le climat de l'Europe se réchauffe. Le glacier qui recouvrait les Pyrénées fond. De nombreuses vallées deviennent accessibles. Des groupes humains investissent ce territoire, qui présente plusieurs attraits. Les nombreuses grottes qui s'ouvrent sur les versants sont des habitats accueillants. Elles sont en outre souvent prolongées par de longs réseaux de galeries souterraines, que les hommes utilisent comme sanctuaires. Le milieu naturel, en moyenne montagne, est riche : les chasseurs collecteurs exploitent autant les ressources en gibier de la vallée (rennes, chevaux, bisons et aurochs) que celles de la montagne (bouquetins et oiseaux).

Ces Magdaléniens taillent le silex comme ceux qui vivent dans le Sud-Ouest de la France, dans le Bassin parisien, en Allemagne et dans le Nord de l'Europe centrale. Ils sont aussi des artistes confirmés, qui maîtrisent toutes les techniques, de gravure, de dessin, de sculpture et de peinture, sur divers matériaux : 80 pour cent des objets d'art préhistoriques qui nous sont parvenus datent du Magdalénien.

Des objets *a priori* utilitaires, telles les armes de chasse, sont décorés, même lorsque leur usage est éphémère : des pointes de sagaies en bois de renne, facilement cassées pendant la chasse, sont gravées de volutes caractéristiques. Le propulseur, l'arme de chasse par excellence des Magdaléniens, qui permettait de lancer les sagaies avec force et précision, est aussi utilisé par les artistes. De nombreux propulseurs ont été sculptés de motifs animaliers. On retrouve le même thème sur plusieurs objets : un faon de cervidé dont la tête est tournée vers l'arrière. En outre, deux propulseurs quasi identiques décorés d'un bouquetin ont été découverts à plus de 600 kilomètres de distance, en Ariège et dans les Asturies. Qui a voyagé : l'artiste, l'objet ou l'idée ?

Le faon à la tête retournée sculpté sur ce propulseur en bois de renne, découvert à Bèdeilhac, en Ariège, est un thème spécifique aux Pyrénées françaises. On le retrouve sur plusieurs objets analogues.

DES OBJETS DE CULTE

Certains propulseurs décorés n'ont jamais servi à lancer des sagaies : ces objets avaient plutôt un usage culturel ou magique. Celui découvert au Mas d'Azil, en Ariège, avait été déposé dans un endroit écarté de la grotte ; un autre découvert à Bèdeilhac, aussi en Ariège, était recouvert d'un badigeon d'ocre et les yeux du faon sont incrustés de pierres. Le crochet ne porte pas les traces qu'aurait laissées une utilisation normale pendant la chasse.

Des éléments de parure marquent une identité régionale. Le plus caractéristique est un contour de tête de cheval, découpé dans la partie triangulaire de

l'os hyoïde du cheval (l'os du larynx) : plusieurs dizaines d'objets semblables ont été retrouvés dans différents sites. La production de rondelles perforées, découpées dans des omoplates d'animaux, est aussi abondante.

D'autres objets, tels le bâton percé (ou bâton de commandement), un manche aménagé sur la perche principale d'un bois de renne, avec une perforation à la jonction de la perche et de l'andouiller, sont communs à tous les Magdaléniens. Les groupes pyrénéens ont toutefois inventé des décors sculptés spécifiques. Enfin, plus de 1 000 plaquettes de schiste, gravées de figures animales et humaines, et de signes non figuratifs, ont été découvertes, à Enlène, en Ariège, mais aussi récemment en Espagne, dans des habitats et dans des sanctuaires.

Il y a 13 000 ans, le climat se réchauffe encore : les vallées se reboisent, et le cerf remplace progressivement le renne. De nouveaux bâtons sont façonnés en bois de cerf : leur extrémité est, sans ambiguïté, en forme de phallus. Ils sont en outre gravés : des cerfs très détaillés côtoient des animaux stylisés et des signes non figuratifs.

Les sites où ces objets et ces thèmes apparaissent sont répartis sur près de 700 kilomètres de long, dans des environnements divers. Dans les Cantabres, contrairement aux Pyrénées, les habitats sont proches de la mer, à une altitude de 100 à 200 mètres : les hommes y exploitent à la fois le littoral et la montagne, et ils chassent plutôt le cerf et le bouquetin que le renne. Malgré cette diversité, les populations partageaient des thèmes artistiques et des choix esthétiques : ceux-ci ne dépendent pas directement de l'environnement ni des conditions de vie. Ils témoignent de relations entre les groupes humains et de l'existence d'une tradition culturelle, plus riche que ne le laisse supposer la simple observation des modes de subsistance.

L'art préhistorique des Pyrénées, exposition au Musée des antiquités nationales de Saint-Germain-en-Laye, du 2 avril au 8 juillet 1996.

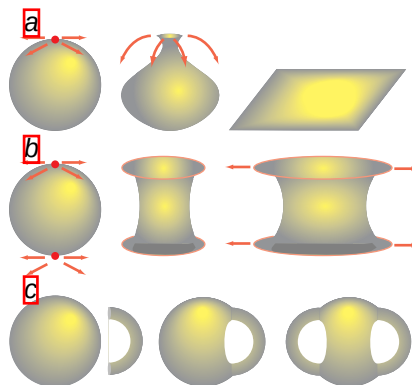
Surfaces minimales

L'ordinateur aide à les représenter et à prouver leur existence.

Lorsque l'on plonge des contours métalliques dans une solution savonneuse, des surfaces aux belles irisations apparaissent. Ces surfaces, définies et contraintes par leur contour, sont baptisées minimales car toute déformation locale augmente leur aire. En repoussant à l'infini certains de leurs contours, les mathématiciens envisagent des surfaces infinies. Grâce à des outils informatiques, Éric Boix, à l'École Polytechnique, et Meinhard Wohlgemuth, à l'Université d'Amherst (États-Unis), ont ajouté à la collection deux nouvelles surfaces minimales.

La recherche de surfaces minimales passe par une classification topologique. On classe toutes les surfaces en déformant une sphère à laquelle on ajoute des anses (le genre de la surface est égal au nombre des anses, la sphère étant de genre 0) et on ôte des points (le nombre de bouts).

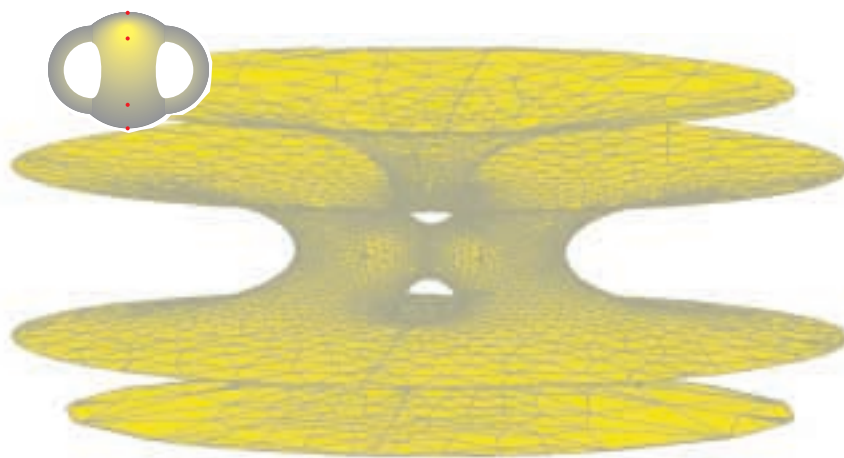
Ainsi le plan est l'équivalent topologique d'une sphère à laquelle on a enlevé un point. La caténoïde est la surface minimale qui s'appuie sur un contour constitué par deux cercles. En augmentant la taille des cercles à l'infini, on obtient la seule surface minimale topologiquement équivalente à une sphère privée de deux points.



Classification topologique des surfaces. Une sphère trouée est équivalente à un plan (a), une sphère percée de deux trous donne une caténoïde (b) dont les contours vont à l'infini, et le genre d'une surface est défini par le nombre d'anses ajoutées à une sphère (c) de genre 0.

Existe-t-il des surfaces minimales pour un genre et un nombre de bouts donnés ? Parmi toutes les surfaces minimales, les mathématiciens se restreignent à celles qui ne se recoupent pas. Si pour certaines classes topologiques, le problème est résolu (sphères privées d'un ou deux bouts), le problème reste ouvert pour des sphères à plus grand nombre de bouts.

La vérification mathématique formelle du non-recoupement n'est possible que pour des surfaces simples. Pour des surfaces de genre élevé et avec quatre bouts, on doit conjecturer cette propriété de non-recoupement en calculant et en dessinant la surface avec l'outil graphique. En construisant les surfaces par triangulation, M. Wohlgemuth et E. Boix ont représenté deux nouvelles surfaces minimales à quatre bouts sans recoupement. À l'aide de ces visualisations, M. Wohlgemuth a alors démontré mathématiquement qu'elles ne se recoupent pas. □



Visualisation d'une des deux nouvelles surfaces minimales à quatre bouts. Elle est de genre deux (elle a deux anses) et possède quatre branches infinies, correspondant aux quatre points que l'on a ôté de la sphère de base.



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

CNRSFormation

au service de l'Entreprise

Méthodes d'optimisation : de la programmation linéaire aux algo- rithmes génétiques

Responsable scientifique :
Marc SCHËNAUER,
Chargé de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 3 au 7 juin 1996

Sur une nouvelle approche pour l'ana- lyse inélastique des structures

Responsable scientifique :
Joseph ZARKA
Directeur de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 10 au 14 juin 1996

Analyse des données quantitatives multidimensionnelles

Responsable scientifique :
Abdelkader ZIGHED
Professeur
VILLEURBANNE (69)
du 17 au 21 juin 1996

Conception optimisée intelligente des maté- riaux et des structures

Responsable scientifique :
Joseph ZARKA
Directeur de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 17 au 21 juin 1996

Catalogue, programmes
et inscriptions :

CNRSFormation

1 place Aristide Briand
92195 Meudon cedex

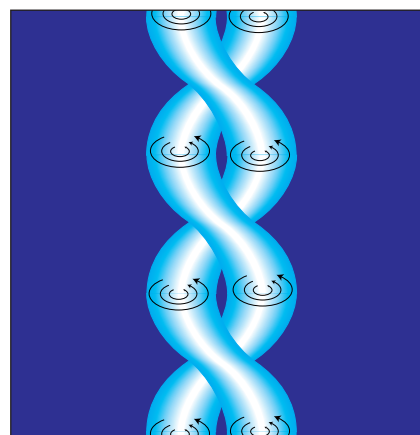
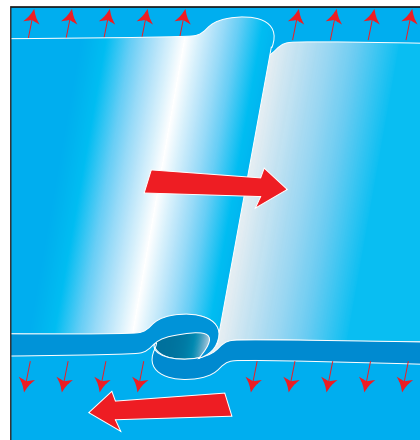
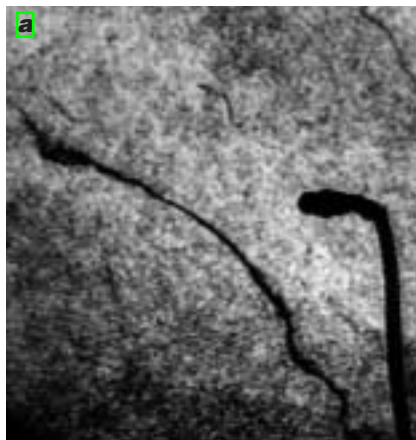
Tél. : (33.1) 45 07 56 72
Fax : (33.1) 45 07 56 84

Les tornades de la turbulence

Les physiciens isolent les structures de basse pression d'un écoulement turbulent.

La turbulence? Un des mystères lancinants de la physique contemporaine : il faut les ordinateurs les plus puissants pour calculer finement l'écoulement de fluide dans des canalisations simples, alors que les principes de base, les équations de la mécanique des fluides, sont établis depuis plus d'un siècle. À l'École normale supérieure, Olivier Cadot, Stéphane Douady et Yves Couder utilisent de petites bulles pour explorer les écoulements fortement tur-

bulents. Le physicien russe Andrei Kolmogorov est l'auteur d'une théorie statistique de la turbulence où il prévoyait que l'énergie injectée dans un écoulement nourrissait des structures (des tourbillons, par exemple) de plus en plus petites, jusqu'à ce que la viscosité dissipe les petites structures formées. Cette théorie prévoit remarquablement la répartition de l'énergie observée entre les différentes échelles du mouvement ; elle forme le cœur de la théorie actuelle de



Deux photographies d'un écoulement turbulent (à gauche). En raison de l'éclairage arrière, les bulles apparaissent en noir sur un fond clair. Le plus intense des filaments de bulles est observé lorsqu'il se forme (a) et lors de sa déstabilisation en triple hélice, moins d'un dixième de seconde après (b). On note la présence d'autres filaments moins longs et moins intenses. On voit à droite des photographies le capteur de pression, relié par un connecteur dont le diamètre est égal à trois millimètres. À droite, on a représenté la formation (en haut) et la destruction (en bas) des filaments.

la turbulence. Toutefois elle ne dit rien sur les structures spatiales de l'écoulement ni sur les mécanismes de transfert d'énergie entre les structures. D'autre part, les expérimentateurs avaient remarqué, depuis longtemps, l'intermittence de la turbulence, qui se caractérise par des bouffées violentes d'activité dans des régions localisées de l'espace. Cette intermittence est inexpliquée par la théorie de Kolmogorov.

DES EXPÉRIENCES AVEC DES BULLES

Expérimentalement on observe difficilement les structures caractéristiques de la turbulence. La superposition de mouvements incohérents à toutes les échelles n'est pas facile à concevoir, ni à voir. Cependant l'intérêt pour les structures turbulentes a été relancé par l'avènement des simulations sur ordinateur, qui permettent de voir et de revoir un écoulement simulé sous toutes les coutures. Une des grandeurs à laquelle les hydrodynamiciens s'intéressent le plus est la vorticité, qui est une mesure de la rotation des tourbillons sur eux-mêmes. Plusieurs simulations, depuis le travail de E. Siggia, à l'Université Cornell, ont montré que les régions où la vorticité est grande sont en forme de filaments : des tourbillons fins seraient concentrés dans les écoulements turbulents.

Ce sont ces structures que les physiciens de l'École normale supérieure ont voulu observer directement, dans un écoulement turbulent de laboratoire. Comme il n'existe aujourd'hui aucun moyen de visualiser la vorticité elle-même, ils se sont fondés sur les variations de pression associées : quand une baignoire se vide, un tourbillon intense se forme au-dessus de la bonde ; la zone déprimée, au cœur du tourbillon, révèle une diminution de la pression à cet endroit.

L'idée expérimentale était d'utiliser la migration de bulles. Dans de l'eau au repos, la pression hydrostatique est minimale à la surface : de petites bulles y migrent. Pour la même raison, dans un écoulement turbulent où la pression est hétérogène, les bulles migrent vers les régions de basse pression, qui sont ainsi spécifiquement marquées. C'est un procédé de visualisation classique des tourbillons stationnaires en hydrodynamique, mais dont on ne pensait pas qu'il fonctionnerait dans les écoulements violemment turbulents.

Dans les premières expériences de «coin de table», les bulles provenaient d'aspirine effervescente, placée dans un grand b cher muni de deux agitateurs. L'expérience s'est affinée : la turbulence est aujourd'hui crée dans un

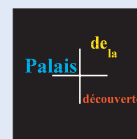
cylindre de 30 litres d'eau. Deux batteurs contrarotatifs, à chaque extrémité du cylindre, transforment cet appareil en une sorte de gros mixeur, où des microbulles sont injectées.

La plupart des bulles suivent l'écoulement, et restent dispersées, mais très transitoirement, on les voit ici et là se concentrer dans des régions en forme de filaments ; ce sont là les régions de basse pression. Ces filaments révèlent une dynamique propre : assez rectilignes quand ils se forment, ils se déstabilisent rapidement en formant une hélice, puis explosent. Un grand tourbillon moins intense subsiste là où le filament a disparu. Cette grande structure contient de nombreux petits filaments secondaires résiduels.

Après avoir observé, il faut mesurer. Un petit quartz piézoélectrique permet de mesurer la pression en un point de l'écoulement. De telles mesures ont été faites à Lyon, dans l'équipe de Stéphane Fauve, et à Paris. Les fluctuations de la pression, en fonction du temps, ont un aspect particulier, asymétrique : vers les hautes pressions, elles ont la répartition gaussienne qui est classique pour les phénomènes aléatoires, mais vers les basses pressions, on observe la superposition de fluctuations ordinaires, gaussiennes, et de fluctuations extraordinaires, plus rares, mais parfois dix fois plus intenses.

L'observation simultanée de l'écoulement montre que ces dépressions sont dues au passage sur le capteur des filaments précédemment décrits. D'autres mesures (de vitesse, par exemple) confirment le diagnostic : il existe, au sein des écoulements turbulents, des structures violentes qui ressemblent à de petites tornades localisées.

Il reste à comprendre le rôle de ces structures. On soupçonnait, depuis longtemps, que, dans les écoulements turbulents, un « tirement de la vorticité» jouait un rôle dans le transfert d'énergie d'échelle en échelle. Les observations sur la dynamique de formation des filaments semblent montrer que des couches de cisaillement (c'est-à-dire des surfaces entre les deux côtés desquelles la vitesse du fluide varie notablement) se forment à la périphérie d'un gros tourbillon. Cette couche est étirée (voir la figure en haut à droite) et cet étirement amplifie la vorticité, par le même mécanisme que celui qui augmente la vitesse de rotation d'une patineuse qui rapproche les bras du corps. L'enroulement de ces surfaces crée les filaments. Ceux-ci sont instables et explosent pour redonner à la fois un grand tourbillon et beaucoup de petites structures. L'ensemble de ces phénomènes expliquerait au moins une partie de l'intermittence de la turbulence. □



POUR LA
SCIENCE

**VOUS INVITENT
  L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE**

**Les impossibles
en démographie
humaine**

avec
Hervé Lebras,
Directeur du Laboratoire
de démographie historique
EHESS - CNRS

**LE SAMEDI 13 avril 1996
  15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS**

Tchernobyl : avenir incertain

DANIEL ROBEAU

Les effets sur l'environnement et la santé de cette catastrophe nucléaire, qui précipita la chute du régime communiste, restent difficiles à évaluer, ce qui alimente les débats entre alarmistes et optimistes.

L'explosion du réacteur numéro 4 de la centrale de Tchernobyl a bouleversé la vie des centaines de milliers de personnes qui vivent dans les territoires contaminés du Bélarus, de la Fédération de Russie et d'Ukraine. Les données historiques disponibles concernant les rejets des produits radioactifs entre le 26 avril et le 10 mai 1986, les mesures de la contamination des sols et des eaux permettent d'estimer les expositions aux rayonnements, passées, présentes et futures, de ces populations. Sur la base de ces données, les responsables politiques et administratifs des régions contaminées doivent répondre aux interrogations économiques, sanitaires et sociales des populations, tandis que les experts étudient les niveaux de contamination tolérables et les actions envisageables.

Le site de Tchernobyl

Les travaux réalisés dans les mois qui ont suivi l'explosion du réacteur ont confiné sommairement les produits radioactifs et limité le risque d'exposition aux rayonnements du personnel de la centrale. Ils ont aussi atténué la contamination immédiate des populations qui vivent à l'extérieur de la zone d'exclusion de 30 kilomètres de diamètre. Cette œuvre titanesque a été réalisée dans des conditions extrêmement difficiles par quelque 650 000 «liquidateurs» ; ceux-ci devaient également remettre en service les réacteurs non accidentés, notamment le réacteur numéro 3 contigu au réacteur 4.

Quelle est la situation dix ans après ? À la complexité d'une situation caractérisée par une dispersion

non maîtrisée des produits radioactifs s'ajoutent l'improvisation des premiers travaux de dégagement et la dispersion des responsabilités. Aussi beaucoup de zones d'ombre subsistent-elles, et un bilan complet de la situation est difficile à établir, de même qu'une analyse globale des risques et une hiérarchisation de ceux-ci par degré d'urgence et d'importance. Les projets de réhabilitation proposés jusqu'à présent n'ont pas bénéficié de bases suffisamment solides pour emporter l'adhésion. Aussi les points de vue alarmistes et optimistes sont-ils exacerbés.

Au moment de l'accident, le réacteur contenait 192 tonnes de combustible plus ou moins irradié. Une fraction du combustible a fondu et coulé sous forme de lave, dans le fond du bâtiment du réacteur ; une autre fraction est restée en place ou a été projetée aux divers niveaux des structures supérieures ; d'autres fragments ont été propulsés autour du bâtiment et sur les toits voisins ; une partie enfin, chauffée pendant l'explosion, a été expulsée sous forme de fines particules.

Douze tonnes de combustible ont été regroupées au pied du bâtiment, puis recouvertes de terre et de béton, constituant le «mur des pionniers», un talus bétonné de huit à dix mètres de haut sur 150 mètres de long, qui borde toute la face Sud de la salle des machines. Au Nord, une autre paroi, le «mur cascade», comporte trois grandes marches d'escalier creusées d'alvéoles ; les liquidateurs y ont entassé de multiples débris de l'explosion, et ce mur étaye les structures Nord du bâtiment, fortement ébranlées.

Ces deux «murs» contiennent une dizaine de tonnes de combustible irradié ; ce combustible est lessivé par les



1. LE RÉACTEUR 4 QUI A EXPLOSE est visible à droite, le réacteur 3, à gauche, étant toujours en fonctionnement. Après l'explosion, le réacteur 4 a été recouvert d'un sarcophage qui confine les radio-isotopes les plus dangereux.

Le récit du drame

«C'était la fin du monde [...] Je n'en croyais pas mes yeux ; j'ai vu le réacteur détruit par l'explosion. J'étais le premier homme au monde à assister à un tel spectacle. En tant qu'ingénieur nucléaire, j'étais conscient de toutes les conséquences. C'était un enfer nucléaire. J'étais terrorisé.»

Le chef de section chargé de l'exploitation du réacteur qui explosa, il y a dix ans, à la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, est l'auteur de ces lignes apocalyptiques. L'explosion et l'incendie qui en résulta, projetèrent des débris radioactifs à travers une grande partie de l'Europe. Le chef de section, ainsi que plusieurs de ses collègues, ont été emprisonnés pour leur rôle dans la catastrophe ; ils ont toujours nié leur culpabilité.

Les enquêtes officielles ultérieures ont montré que l'équipe en place pendant la nuit du 25 avril 1986 n'était pas seule responsable. Parallèlement, les conséquences de la tragédie dépassent l'enjeu nucléaire et nous interrogent sur l'avenir de la civilisation technique. Avant l'explosion, Tchernobyl était une petite ville inconnue ; aujourd'hui, ce nom est devenu, dans la chronique du XX^e siècle, synonyme de la pire catastrophe écologique de tous les temps, aussi évocateur que «Stalingrad» ou «Bhopal». Les répercussions politiques de Tchernobyl ont accéléré l'effondrement de l'empire soviétique.

Il est vital que le monde comprenne à la fois les causes et les conséquences de ce désastre. Les événements qui ont provoqué l'explosion sont connus. Le réacteur numéro 4, un modèle RBMK de 1 000 mégawatts, chauffait, en fonctionnement normal, de la vapeur qui alimentait des turboalternateurs. La nuit de l'accident, les opérateurs examinaient l'autonomie des générateurs, pour voir pendant combien de temps ils tournaient sans apport

d'énergie. À cette fin, ils réduisirent l'énergie produite au sein du réacteur et bloquèrent le transfert de vapeur vers les turboalternateurs.

Malheureusement, un défaut de conception du RBMK-1 000 rendait son exploitation instable à bas régime. À bas régime, toute augmentation induite de la production de vapeur pouvait fortement accroître la production d'énergie au sein du réacteur. Comme cette énergie excédentaire n'était pas éliminée par la production de vapeur, le réacteur pouvait s'emballer. De surcroît, les opérateurs avaient désactivé les dispositifs de sécurité...

Le 26 avril, à 1 heure 23 minutes 40 secondes, un opérateur, s'apercevant du danger, appuya sur le bouton activant le système de protection automatique. Cette procédure visait à couper le réacteur, mais il était trop tard.

En trois secondes, la production d'énergie dans le cœur du réacteur monta à 100 fois son niveau maximal, et la température augmenta de façon vertigineuse. Deux explosions arrachèrent la plaque de métal de 2 000 tonnes qui recouvrait le sommet du réacteur et détruisirent le bâtiment. Le génie de la bouteille nucléaire était libéré.

Malgré les tentatives héroïques de maîtrise de l'incendie, les centaines de tonnes de graphite qui servaient de modérateur dans le réacteur se consumèrent pendant dix jours. Les gaz brûlants transportaient dans l'atmosphère des aérosols constitués de combustible et de produits de fission, les isotopes qui sont les sous-produits d'une exploitation normale. Poussés par les vents dominants, ils furent détectés jusqu'au Japon.

Yuri SCHERBAK
Ambassadeur d'Ukraine aux États-Unis

eaux de pluie qui s'infiltrèrent dans le sol et polluent les eaux souterraines.

Certains produits de fission, en particulier les iodes, se sont échappés au moment de l'explosion, mais les combustibles restant dans l'enceinte et dans les murs contiennent encore une importante fraction des produits les moins volatils, par exemple les deux tiers du césium 137. Ces produits radioactifs empêcheront de manipuler les débris sans protection épaisse avant plusieurs centaines d'années.

Les débris contiennent aussi la quasi-totalité des isotopes lourds, actinides et transuraniens, avec, en particulier, plusieurs centaines de kilogrammes de plutonium dont la durée de vie est de dizaines de milliers d'années. Contrairement à ce qu'on lit souvent, le césium est plus dangereux que le plutonium : ce dernier n'est nocif que par inhalation. À très long terme (plusieurs centaines d'années),

les produits lourds, essentiellement les émetteurs α , représenteront le risque majeur.

La majorité du combustible se présente sous forme de «lave», mélange fondu de combustible et d'éléments métalliques provenant des structures du cœur initial. À l'intérieur du réacteur, cette lave, initialement très dure, tend actuellement à se transformer en poudre très fine sous l'effet de l'humidité et de l'oxydation. Cette pulvérisation augmente les risques de déplacement de ces particules, par l'air ou par l'eau. Elle rend encore plus précaire le confinement actuel.

Écroulement du sarcophage et libération de poussières

Construit avec l'espoir qu'il tiendrait 20 ou 30 ans, le sarcophage construit autour du réacteur immédiatement après l'explosion se dégrade

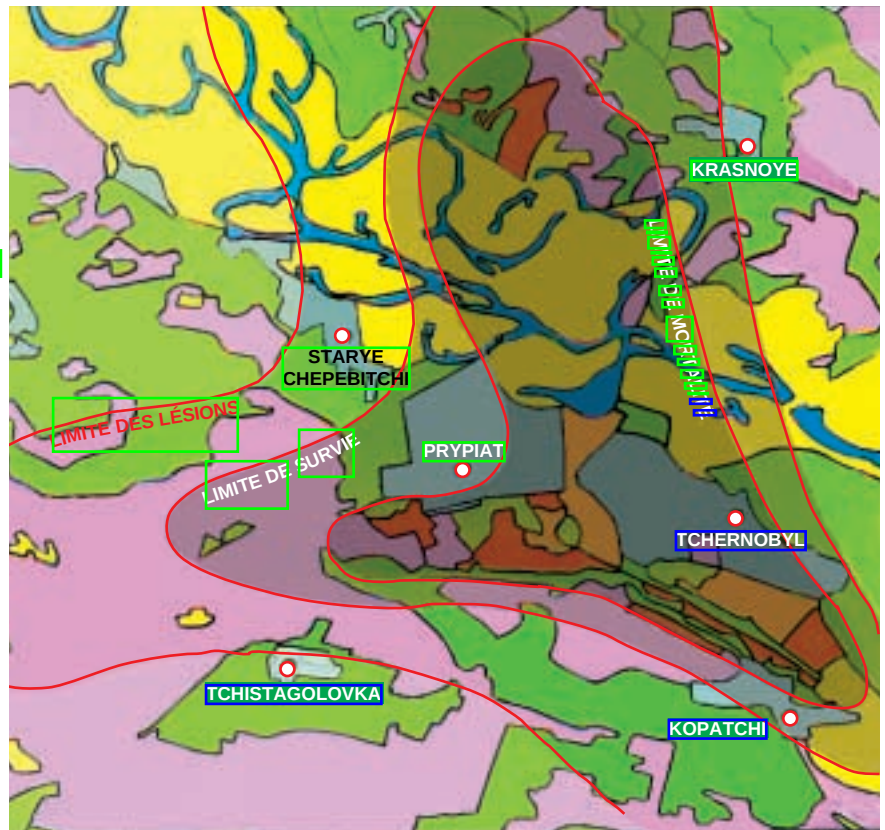
plus vite que prévu : il ne restera pas en l'état sur une telle période sans travaux notables. De grandes ouvertures ont été initialement ménagées entre les tôles de couverture, afin que la ventilation naturelle évacue les quelques centaines de kilowatts de puissance résiduelle émise par le combustible. Cette émission de chaleur est aujourd'hui négligeable, et la taille des ouvertures a été réduite, mais elles laissent entrer l'eau de pluie.

Le risque d'écroulement interne au sarcophage est permanent ; un dispositif de vaporisation d'eau, installé sous le toit, clarifie l'atmosphère et limiterait les émissions de poussière en cas d'effondrement.

Le danger de propagation des poussières a été évoqué par ceux qui réclament la construction rapide d'un nouveau sarcophage : sans nier sa nécessité, il faut remarquer que l'écroulement ne s'accompagnerait pas d'un



2. LIMITES DES ZONES A RISQUE pour la végétation autour de la centrale de Tchernobyl. Les forêts rousses ont été brûlées par les rayonnements. Dans la forêt rousse nettoyée, on a arraché les souches et nettoyé la litière.



dégagement énergétique comparable à l'explosion d'un réacteur. Le nuage de poussières ne s'élèverait que de quelques dizaines de mètres et retomberait à proximité. Un tel événement, très grave pour les exploitants du site, toucherait peu les populations.

Dans l'urgence des travaux de décontamination, de nombreux sites

de stockage de matériaux contaminés ont été constitués. D'un volume total d'un million de mètres cubes, leur activité totale est estimée à 14 000 téra-becquerels. Ces 800 sites sont des structures non sécurisées, contenant des matériaux contaminés provenant du réacteur.

Le bassin de refroidissement de la centrale nucléaire de Tchernobyl est un réservoir de 22,9 kilomètres carrés de superficie, contenant 100 millions de mètres cubes d'eau. Entre 1989 et 1995, la contamination annuelle moyenne du bassin de refroidissement a augmenté de 5 à 12 becquerels de césium 137 par litre et de 4,5 à 8,5 becquerels de strontium 90 par litre. Les charges radioactives totales des boues du bassin sont de 130 téra-becquerels de césium 137, 30 téra-becquerels de strontium 90 et 0,11 téra-becquerels de plutonium 238 et 239.

Situation radiologique de la zone d'exclusion

Dans la zone d'exclusion, évacuée en 1986, la contamination des terres est supérieure à 1 480 kilobecquerels de césium 137 par mètre carré. La zone englobe les deux villes de Prypiat et de Tchernobyl, ainsi que 74 hameaux ;

elle est principalement contaminée par le césium 137, le strontium 90 et des éléments transuraniens (plutonium, américium). Les flux de radioactivité vers l'extérieur de la zone d'exclusion sont surveillés, le plus important étant dû à l'écoulement des eaux de ruissellement, dont les rivières sont l'exutoire.

Ainsi, entre 1989 et 1995, les eaux de la rivière Prypiat ont charrié, en moyenne annuelle, dans le réservoir d'eau qui alimente la ville de Kiev, de 4,14 à 15,7 téra-becquerels de strontium 90 et de 2 à 4,6 téra-becquerels de césium 137. Entre 1986 et 1995, les contaminations moyennes des eaux de la rivière Prypiat ont été divisées par 2 000 pour le césium 137 et par 6 seulement pour le strontium 90 ; le strontium, plus soluble et plus mobile que le césium, est plus facilement entraîné par les eaux, notamment en cas de crue. La contamination des eaux du réservoir de Kiev diminue notablement, mais elle augmentera de nouveau en cas de grande crue.

Selon les dernières estimations, la radioactivité qui peut être drainée vers la rivière Prypiat par ruissellement des eaux est de 555 téra-becquerels de césium 137, de 370 téra-becquerels de strontium 90 et de 11,1 téra-becque-

rels de plutonium. La contamination de l'eau potable des villes de Tchernobyl et de Prypiat par le strontium 90 ne dépasse pas 200 becquerels par mètre cube, soit au-dessous du niveau autorisé de contamination, égal à 20 becquerels par litre ; malheureusement, dans les puits des zones rurales, la contamination est cinq fois supérieure à celle des eaux dans les villes.

Les autres flux de radioactivité vers l'extérieur de la zone d'exclusion sont dus au transfert atmosphérique des poussières radioactives remises en suspension, aux migrations d'animaux et aux activités humaines. Ces voies sont négligeables comparées au transfert par les eaux de ruissellement, sauf à l'occasion des feux de forêts : un feu de 200 hectares de forêt entraîne la remise en suspension de près de 70 tonnes de cendres radioactives. Depuis l'accident, six feux importants se sont déclarés dans cette forêt morte.

La contamination radioactive de la zone d'exclusion est surveillée par 20 stations de mesure de la radioactivité des aérosols, 133 stations de prélèvement et de mesure des eaux de surface et souterraines. En outre, la radioactivité est surveillée mensuellement par des prélèvements d'aérosols atmosphériques, de dépôts de surface, d'eau et de sol. Les eaux souterraines ne sont polluées que sur une faible partie de la zone d'exclusion, mais très fortement à l'aplomb des zones de stockage temporaire. Les eaux qui circulent dans les déchets eux-mêmes ont une activité en strontium 90 de 100 000 à 100 millions de becquerels par litre. La contamination des eaux souterraines augmente, et le maximum est prévu dans 10 à 20 ans.

Durant les premiers jours qui ont suivi l'accident, les débits de dose près

du réacteur accidenté étaient de l'ordre d'un gray par heure. Ils sont aujourd'hui de l'ordre de quelques dixièmes de milligray par heure. La radioactivité des aérosols atmosphériques a décru régulièrement jusqu'en 1991, puis s'est stabilisée.

Outre la contamination des divers compartiments de l'environnement, les doses incorporées par les personnes vivant ou travaillant dans la zone d'exclusion indiquent la viabilité de cette zone. La dose moyenne annuelle des personnes travaillant dans la zone d'exclusion a diminué, entre 1990 et 1995, de six à un millisievert ; la limite acceptée est d'un millisievert pour les personnes du public et 20 dans un cadre professionnel.

En principe, la zone d'exclusion a été totalement évacuée. En fait, quelques centaines de personnes, généralement âgées, y vivent encore de leur propre production agricole, sans appliquer de contre-mesures. Cette population ne reçoit pas, d'après les informations officielles, une dose annuelle supérieure à un millisievert.

Après une irradiation aiguë en mai 1986, due au passage du nuage radioactif et au dépôt des radionucléides sur le sol, une large part de la faune et de la flore a récupéré ses fonctions essentielles dès que le débit de dose a diminué. Néanmoins, on observe des altérations aux niveaux cellulaire et moléculaire dans les organismes végétaux. L'environnement a été contaminé à une période de l'année où la nature, en pleine croissance est la plus sensible aux rayonnements. Les organes de reproduction des arbres sont particulièrement vulnérables aux rayonnements, et la relation entre les doses reçues par les arbres et les capacités de germination

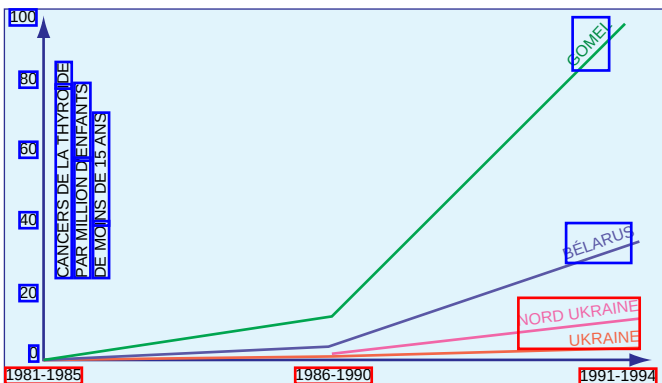
des graines est nette. Les conifères sont particulièrement fragiles.

Aux alentours du site, les rayonnements ont massivement détruit les pins et partiellement endommagé le feuillage supérieur des bouleaux, des aulnes et, plus généralement, des arbres à feuilles caduques. On appelle ces forêts, «forêts rousses». De 1988 à 1989, une partie des arbres de cette zone a retrouvé ses capacités de reproduction. Les botanistes ont noté des anomalies morphologiques et des anomalies de croissance chez les herbacés et les arbustes.

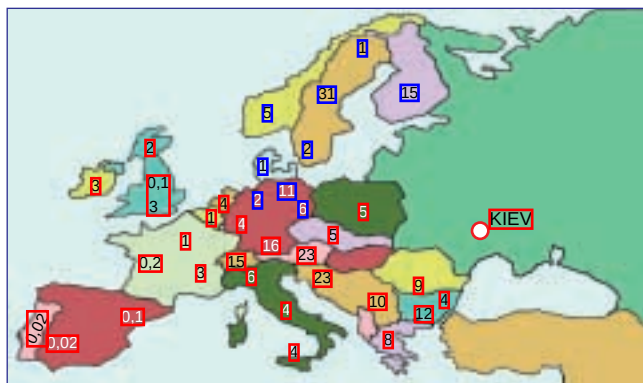
Dans le monde animal, on a observé un grand nombre d'altérations des processus physiologiques et biologiques ; de profondes modifications pathologiques, éventuellement mortelles, ont frappé les espèces dont l'habitat a été fortement contaminé, notamment les rongeurs. La fertilité des poissons vivant dans les lacs et la rivière Prypiat a diminué, leur taux de croissance et les processus de développement des cellules sexuelles ont été altérés. Chez différentes espèces de reptiles et d'amphibiens, le nombre d'aberrations cellulaires a augmenté. Les invertébrés, qui sont plus résistants aux rayonnements ionisants, ont toutefois été plus affectés, du fait de la plus forte contamination de leur niche écologique.

Contamination hors de la zone d'exclusion

L'inventaire calculé du cœur, à l'instant de l'accident, était de 25 millions de térabecquerels d'halogènes, dont 12,6 millions de térabecquerels d'iodes (ces produits dangereux résultent des réactions de fission dans le combustible nucléaire). Vingt à cinquante pour



3. INCIDENCE ANNUELLE MOYENNE du cancer de la thyroïde chez l'enfant en Bélarus, en Ukraine et à Gomel.



4. DÉPÔTS DE CESIUM 137 dans les pays d'Europe (mesurés en kilobecquerels par mètre carré).

cent des iodes ont été rejetés dans l'atmosphère. Les iodes, éléments volatils à vie courte, ont disparu par décroissance radioactive quelques mois après l'accident ; hélas, dans l'entremise, la radioactivité rejetée et la radiotoxicité des iodes sur la thyroïde ont entraîné des dommages sanitaires importants pour les populations. Une large part de la région du «Polesseye» est maintenant classée en «réserve écologique et radiologique» et est réglementée par un décret limitant considérablement les activités humaines, notamment l'agriculture. Dans le sol, dix ans après l'accident, plus de 95 pour cent de l'activité totale est présente dans les dix premiers centimètres.

Environ 5 à 30 pour cent du césium et 50 à 90 pour cent du strontium présents dans le sol sont aujourd'hui disponibles pour les plantes. La libération du strontium par les particules chaudes devrait accroître cette disponibilité.

L'impact de la radioactivité sur l'homme résulte essentiellement de la radioactivité de la couche supérieure du sol. Cette présence est quantifiée

par la «demi-vie de présence» du radionucléide dans le sol, c'est-à-dire le temps nécessaire à une diminution de moitié de sa concentration initiale. Pour le césium 137, cette demi-vie est plus longue dans la couche supérieure du sol (24 à 27 ans), où le césium est piégé, que dans la couche plus profonde, au-delà de 5 à 8 centimètres (10 à 17 ans). Le strontium disparaît de la surface une à trois fois plus vite que le césium.

La forêt occupe environ 30 pour cent des sols contaminés et a joué le rôle de filtre dans l'interception des retombées, ce qui se traduit par une contamination accrue de 20 à 30 pour cent de la zone périphérique des forêts par rapport au centre ; 60 à 90 pour cent des retombées ont été interceptées par le feuillage, la moitié de l'activité retombant au sol au bout d'un mois. La litière est donc la partie la plus contaminée des écosystèmes forestiers : 45 à 90 pour cent des retombées y sont concentrées.

Actuellement, l'activité totale accumulée par la phytomasse représente six pour cent de la radioactivité totale

de la forêt. Les feuillus accumulent plus de radioactivité que les conifères. Les végétaux arbustifs et herbacés des écosystèmes forestiers se décontaminent de moitié en 15 ans.

La contamination des forêts a durement frappé l'économie forestière : 20 pour cent de la production de bois en Bélarus, qui dépasse les niveaux acceptables de contamination, est temporairement stockée avant emploi. Le bois de chauffage est le plus surveillé, car sa combustion concentre l'activité dans les cendres (d'un facteur 100). L'une des options proposées pour la valorisation des forêts contaminées est l'incinération dans des centrales de production d'énergie thermique ou des usines de transformation du bois en pâte à papier, le contrôle des cendres étant plus facile dans une installation industrielle.

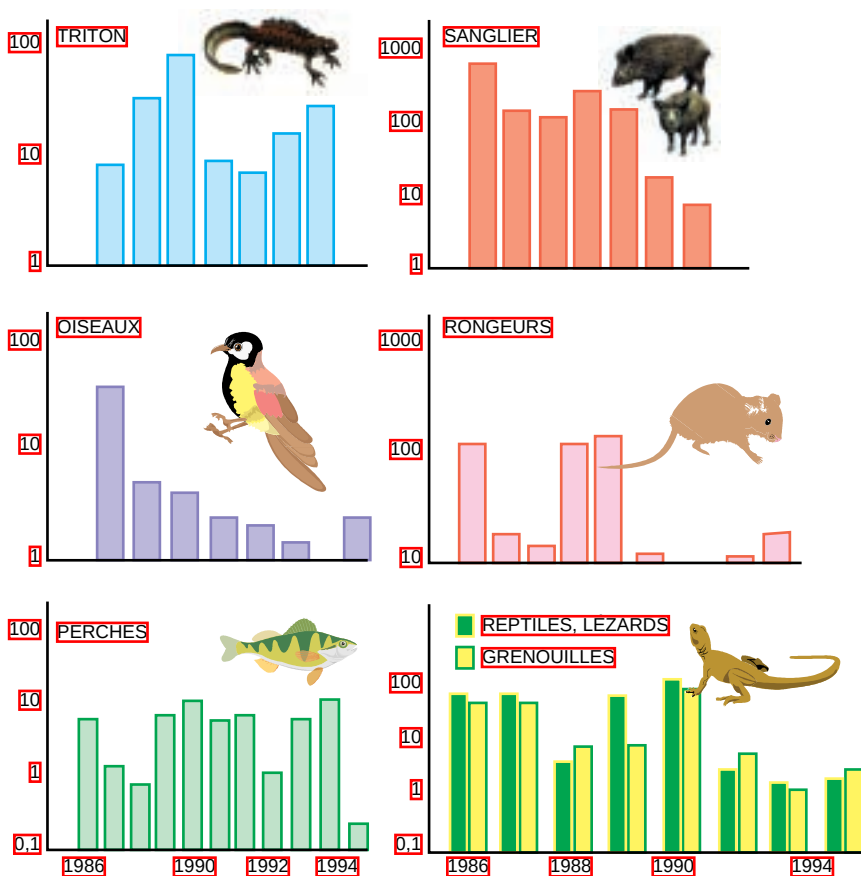
Doses aux populations

La dose prévue pour la période de 1996 à 2056 est deux à trois fois plus faible que la dose déjà reçue durant ces dix dernières années, la moitié de cette dose ayant été délivrée en 1986. Dans les zones les plus contaminées, les individus recevront 200 à 300 millisieverts au cours de leur vie, en plus de la dose due à l'irradiation naturelle.

La dose due à l'alimentation représente 60 pour cent de la dose totale entre 1986 et 1995. Cependant les 80 pour cent de la dose reçue dans les années à venir sera due à l'irradiation par le sol ; 20 pour cent seulement par l'alimentation. Une augmentation de la dose reçue a été observée ces dernières années chez les habitants des zones rurales : ce phénomène est principalement dû à la consommation de baies et de champignons, malgré leur contamination en césium 137 au-delà des niveaux permis. La contribution du strontium 90 à la dose provenant de l'alimentation est aujourd'hui négligeable. Entre 1986 et 1995, la contribution du plutonium à la dose a été de 25 microsieverts en moyenne.

Les mesures de décontamination

L'effort le plus important porte sur une réhabilitation de l'agriculture dans les territoires contaminés. Le premier objectif a été la production



5. CONTAMINATION DES DIFFÉRENTES ESPÈCES ANIMALES de la zone d'exclusion. Cette contamination est mesurée par la radioactivité γ artificielle en kilobecquerels par kilogramme. On a observé de fortes modifications pathologiques chez les rongeurs et les amphibiens.

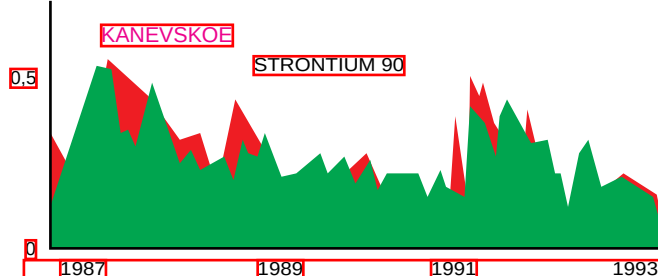
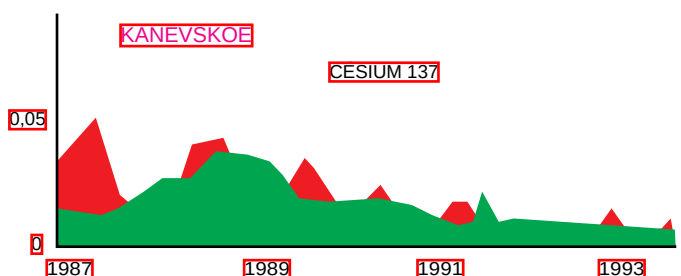
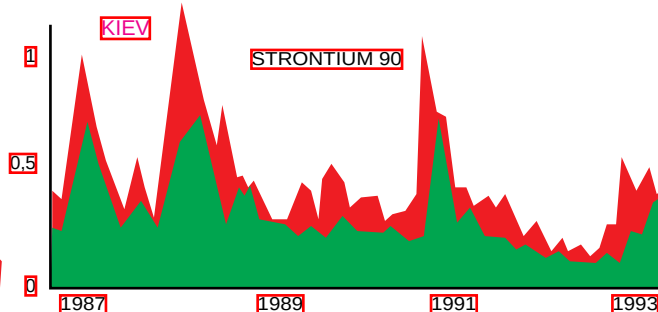
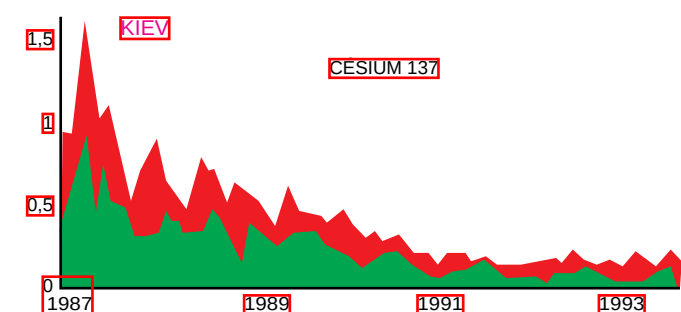
de produits agricoles au-dessous des niveaux admissibles de contamination. Les contre-mesures agronomiques, agrochimiques et l'amélioration des sols ont divisé le transfert du césium aux productions agricoles par un facteur 1,5 à 4 : chaulage des sols acides, application d'engrais potassium, labour profond et application d'engrais potassium. La contamination des produits animaux dépend du type d'alimentation, de l'affouragement, du type d'élevage,

du niveau de contamination du fourrage et du sol. L'alimentation des animaux avec du fourrage non contaminé, deux à sept mois avant l'abattage, permet la production de viande peu ou pas contaminée.

Depuis 1994, la contamination des productions agricoles a nettement diminué : 0,7 pour cent de la production de lait et quelques tonnes de viande seulement dépassent les limites tolérées. Aucune production en provenance de terres labourables (céréales,

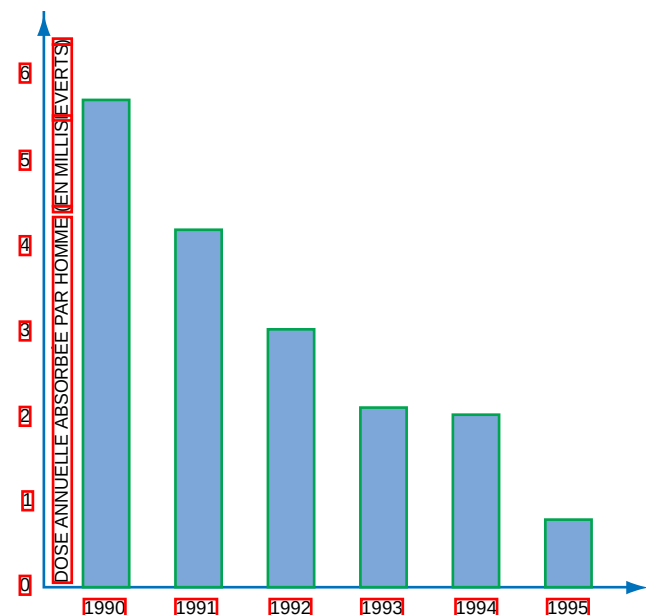
tubercules, racines) n'est supérieure aux limites tolérées.

Les contre-mesures qui ont été appliquées ont modifié très profondément les pratiques habituelles de cette zone agricole. Globalement, la production de fourrage a été augmentée, les pratiques zootechniques ont été modifiées (alimentation et stabulation du bétail), afin que les agriculteurs obtiennent des produits faiblement contaminés avant transformation.

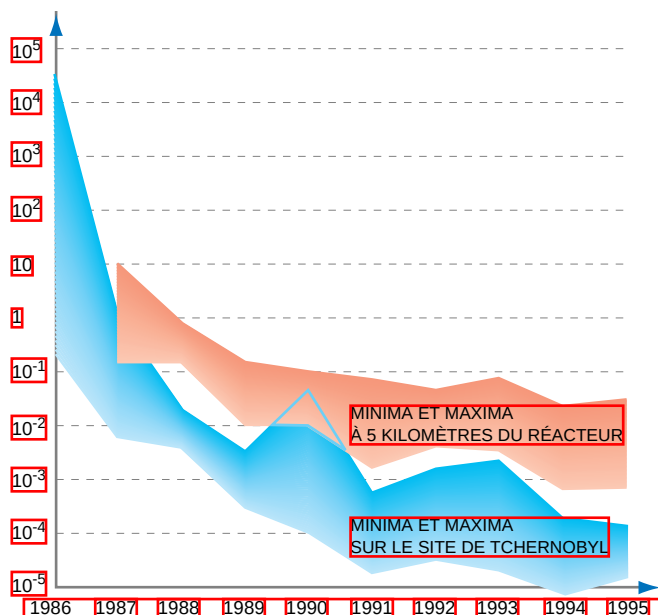


6. CONTAMINATION PAR LE CESIUM 137 ET LE STRONTIUM 90 des réservoirs d'eau de Kiev et de Kanevskoe, alimentés par le Dniepr et la Prypiat. Les aires en rouge indiquent l'activité des eaux à l'en-

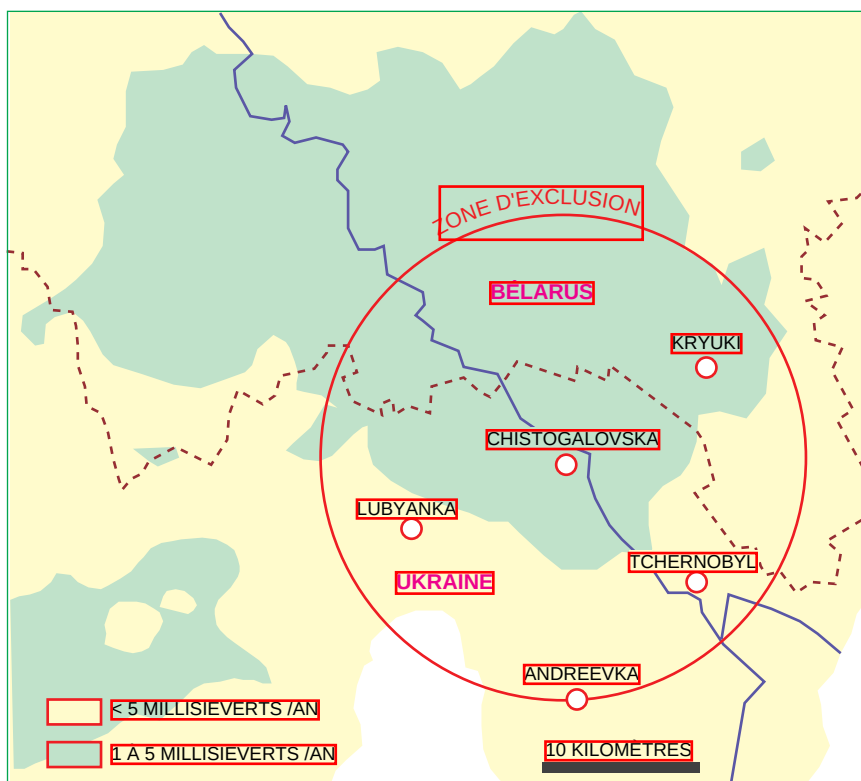
trée des réservoirs, celles en vert l'activité des eaux en sortie. Les activités sont exprimées en becquerels par litre ; les niveaux temporaires admissibles sont de 370 becquerels par litre.



7. DOSES DELIVREES AUX POPULATIONS, en millisieverts par an, pour les travailleurs de la zone d'exclusion autour de Tchernobyl.



8. RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE due aux émetteurs β des aérosols atmosphériques entre 1986 et 1995.



9. CARTOGRAPHIE DES DOSES dans la zone de Tchernobyl. La zone d'exclusion de 30 kilomètres de diamètre est indiquée par le cercle rouge.

Qualité de la vie des populations

La catastrophe de Tchernobyl empêche les pratiques normales dans l'industrie et dans l'agriculture. Six à vingt pour cent des budgets nationaux des trois républiques ont été consacrés à la réhabilitation des territoires affectés par la catastrophe. Dans les territoires contaminés, la santé publique est le souci majeur : un système spécifique de sécurité sociale a été mis en place, et le suivi médical des populations y est intensif.

Ces mesures ont deux effets opposés : d'une part, elles contribuent à un meilleur état de santé, d'autre part, elles accroissent les inquiétudes des populations. L'état psychologique et social des individus vivant dans les territoires contaminés ou évacués en 1986 est caractérisé par une grande anxiété, une grande agressivité, une crainte de l'avenir et, finalement, un profond désespoir. Les évacuations et le relogement ont protégé les populations des rayonnements, mais ont créé des difficultés liées aux nouvelles conditions de vie et au déracinement. La situation démographique de ces territoires se dégrade : le taux de natalité et l'espérance de vie diminuent.

Des restrictions concernant la production et la consommation de produits alimentaires subsistent depuis mai 1986 dans les zones rurales les plus contaminées. Un approvisionnement de produits non contaminés a été mis en place, en particulier pour le lait, mais s'est révélé insuffisant pour les fruits, les légumes et le bois de chauffage. La consommation de produits contaminés n'a pas été supprimée.

Un problème corollaire est la difficulté, voire l'impossibilité, de trouver des marchés pour les denrées alimentaires produites dans les régions contaminées, même quand ces denrées respectent les normes sanitaires ; il en résulte une diminution du revenu des agriculteurs et une forte augmentation du chômage. L'aide apportée par l'État ne compense pas cette grave situation, et la méfiance de la population envers les pouvoirs publics est amplifiée.

Les effets sanitaires

Les pompiers, sauveteurs et employés de la centrale qui ont participé aux actions de secours le 26 avril 1986 et les jours suivants ont été les seuls à souffrir d'effets aigus des rayonnements. Parmi les 237 personnes for-

tement irradiées et hospitalisées, 28 sont mortes en quelques semaines. Leur mort résultait d'une combinaison des effets de l'irradiation et de brûlures radiologiques étendues, dues au dépôt de produits radioactifs sur la peau. Trois autres sauveteurs sont morts le premier jour, l'un de traumatismes dus à l'écroulement des structures du réacteur, un autre de crise cardiaque et le troisième de brûlures thermiques.

Peu de liquidateurs étaient munis de dosimètres. Les doses d'irradiation sont estimées à plus de 250 millisieverts pour dix pour cent d'entre eux. À titre de comparaison, la dose par irradiation naturelle sur la vie entière est d'environ 150 millisieverts. Compte tenu de ces doses, il n'est pas exclu qu'un excès de cancers apparaisse dans l'avenir. Il peut paraître technocratique de distinguer les cancers induits par la catastrophe et les cancers dits naturels, dont nul n'est à l'abri. Cette différenciation n'en est pas moins indispensable pour une bonne évaluation des risques et des niveaux de prévention souhaités.

Les cancers induits risquent d'apparaître dans les futures décennies, et persisteront jusqu'à l'extinction naturelle du groupe de liquidateurs, d'un âge moyen de 35 ans en 1986. Le nombre de cancers attribuables à Tchernobyl est actuellement de l'ordre de la dizaine, soit un excès d'environ cinq pour cent du fonds naturel de cancers.

Malgré de nombreux rapports faisant état de maladies diverses en nombre anormalement élevé chez les 650 000 liquidateurs, leur mortalité, telle qu'elle est attestée par les chiffres, est identique à celle de la population. Elle a d'ailleurs les mêmes causes, avec plus de la moitié des décès dus à des blessures et à des intoxications, un cinquième à des maladies cardio-vasculaires et moins d'un autre cinquième à des tumeurs malignes.

Entre 1986 et 1995, plus de 27 000 liquidateurs sont morts de causes «naturelles». Sur la base des doses reçues par les liquidateurs, le taux de cancers radio-induits à apparaître dans les décennies à venir peut raisonnablement être évalué à quelques centaines pour 100 000 liquidateurs, dont 15 000 ou plus mourront de cancers naturels. Pour l'ensemble des 650 000 liquidateurs, cela représenterait quelques milliers de cancers attribuables à Tchernobyl, parmi les 90 000

cancers à venir. Cette estimation, vraisemblablement maximaliste, car elle ne prend pas en compte une diminution de l'effet avec le temps, représente quelques pour-cent des cancers naturels. La population affectée par l'accident représente plus de deux millions de personnes en Bélarus, environ autant en Ukraine et un demi-million en Russie. Cette population comprend les évacués (au nombre de 200 000 environ), qui ont été exposés jusqu'au moment de leur relogement, et les personnes qui vivent sur des territoires contaminés.

Les cancers de la thyroïde

Le seul effet indubitable dû à Tchernobyl détecté jusqu'à présent est l'excès marqué de cancers de la thyroïde chez l'enfant. Il a été rapporté pour la première fois en 1990, puis il a augmenté au cours du temps. En 1995, 700 cancers de la thyroïde sont attribués à Tchernobyl. Ce nombre correspond à une multiplication du taux naturel (le cancer de la thyroïde est un cancer rare chez l'enfant) par 10 à 100 ou plus, suivant les régions. Par exemple, le taux normal (1981-1985) de 0,5 cancer par million d'enfants est passé à près de 100 dans la région de Gomel, en Bélarus, et à plus de 10 dans le Nord de l'Ukraine (1991-1994).

L'irradiation externe aiguë est un facteur de risque établi du cancer de la thyroïde, et le risque est plus élevé quand l'exposition s'est produite à un âge jeune. Ces cancers sont en majorité agressifs, s'accompagnant souvent de métastases ganglionnaires cervicales. En revanche, le rôle carcinogène de l'iode 131 seul n'est pas établi chez l'homme. On ignore encore le nombre de cancers résultant de l'une ou de l'autre cause, et à d'autres facteurs comme la carence alimentaire en iode, endémique dans les régions affectées par l'accident.

En se fondant sur un million d'enfants ayant reçu des doses thyroïdiennes susceptibles d'induire un cancer, le nombre total de cancers de la thyroïde à apparaître dans les 60 ans à venir serait d'environ 5 000. La mortalité en rapport serait d'environ 500. Cette projection ne tient pas compte d'une décroissance dans le temps, et l'on suppose que, chez les enfants, il peut exister, comme chez l'adulte, de très longs temps de latence.

Ce dernier point, contredit par les très courts temps d'apparition de la vague de cancers en 1990-1991, constitue un argument en faveur d'un avenir moins noir. Parmi les 115 000 évacués des premières semaines, certains ont reçu des doses significatives, représentant parfois plus de 50 fois la dose annuelle par irradiation naturelle. En résumé, le nombre de cancers induits par Tchernobyl sera inférieur à 1 000, et une estimation raisonnable aboutit à quelques centaines de cancers mortels dans les 60 prochaines années, à comparer avec les 17 000 cancers naturels attendus durant cette même période.

Dans l'ensemble des personnes directement concernées par l'accident, près de 300 000 vivent sur des territoires dont le niveau de contamination dépasse 555 kilobecquerels par mètre carré ; l'excès de cancers que l'on peut attendre des suites de Tchernobyl est inférieur à un pour cent du taux normal, soit environ quelques milliers pour plus de 40 000 cancers naturels. Jusqu'à présent, on n'a pas observé d'augmentation d'incidence de la leucémie ou des autres cancers. Si un excès de tels cancers existe, il est modéré. La démonstration d'une relation de causalité entre l'exposition aux rayonnements et diverses pathologies, l'artériosclérose et la trisomie 21, n'est pas établie.

Les traumatismes psychologiques

Il est reconnu que l'effet de l'accident sur la santé des populations est en rapport avec son impact socio-psychologique. De telles conséquences sont connues lors des catastrophes naturelles. Cet impact ne peut être isolé du contexte global de la détérioration profonde de la santé en ex-URSS depuis l'éclatement de cette dernière : ainsi l'espérance de vie est passée, chez les hommes, de 65 à 59 ans entre 1987 et 1993 ; le taux de mortalité est passé de 5 000 à près de 8 000 par million et par an entre 1990 et 1993, alors que le taux de cancers demeurait constant.

Si des problèmes de santé importants, en gravité et en fréquence, se dégagent dix années après la catastrophe, il reste de nombreuses inconnues. Une partie des données a été constituée dans des conditions méthodologiques médiocres, et les études

épidémiologiques ont été mises en place tardivement. Certains effets ont ainsi pu échapper à la détection, même sur une durée de dix ans. N'a-t-il pas fallu plusieurs dizaines d'années pour appréhender les conséquences sanitaires chez les survivants des bombardement d'Hiroshima et de Nagasaki ? Ces dix dernières années, des efforts considérables ont été faits pour définir des principes reconnus internationalement pour la gestion de situations accidentelles et postaccidentelles dues aux rejets non maîtrisés de produits radioactifs dans l'environnement.

Tchernobyl 3

Le réacteur 3 de la centrale de Tchernobyl est adjacent au réacteur 4 détruit en avril 1986. Cette unité continue à produire six pour cent de l'énergie électrique de l'Ukraine ; sa localisation augmente le risque général lié à Tchernobyl.

La communauté internationale a demandé la fermeture de cette unité, fermeture maintenant programmée par le gouvernement ukrainien : le financement d'une nouvelle centrale a été accepté par le Groupement des sept pays les plus industrialisés. La centrale sera construite sur un autre site, et ne sera sans doute pas nucléaire.

Daniel ROBEAU est adjoint au directeur délégué à la protection de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire.

M. BALONOV, *The Chernobyl Papers*, Vol 1. *Doses to Soviet Populations and Early Health Effects Studies*, Steven Merwin, Michaël Balonov éditeurs.

Tchernobyl : cinq années difficiles, ministère de la Santé de la fédération de Russie, 1992.

A.R. SICH, *The Chernobyl Accident Revised Source Term*, Massachusetts Institute of Technology, janvier 1994.

Tchernobyl, dix ans déjà. Impact radiologique et sanitaire, AEN / OCDE, novembre 1995.

Circonstances et conséquences de la pollution radioactive dans l'ancienne Union soviétique, IPSN / Mission Communication, 1995.

Rapport Tchernobyl 10 ans après, IPSN / Mission Communication, 1996.

Les variations passées du niveau des mers

JACQUES REY • RENE CUBAYNES

Les nouvelles méthodes d'analyse des couches sédimentaires nous révèlent les montées et les descentes du niveau de la mer au cours des temps géologiques.

Rien ne nous paraît plus immuable que le niveau moyen des mers, par rapport auquel nous définissons altitudes et profondeurs. Rien ne semble plus fixe que la zone côtière qui sépare la mer du continent. Pourtant, les roches et les fossiles témoignent des déplacements de la ligne de rivage dans les temps géologiques. La mer gagne sur la terre aux périodes dites de transgression marine : il y a 150 millions d'années, au Jurassique supérieur, presque tout le territoire français était noyé. Pendant les régressions marines, la mer recule, découvrant de vastes étendues terrestres.

Les variations du niveau marin sont-elles globales ou locales? Quelles sont leur périodicité et leur amplitude? Quelles sont les causes de ces variations? Quelles en sont les répercussions climatiques, biologiques, économiques?

Les géologues ont entrepris de retrouver, les témoignages de ces fluctuations du niveau océanique dans l'empilement des strates de sédiments. Les relations entre l'organisation des dépôts et les mouvements de montée et de descente du niveau des océans ont été décrits il y a une quinzaine d'années. Ce modèle a servi de base à des études systématiques, menées dans plusieurs bassins sédimentaires grâce à de nouvelles méthodes, telles que l'établissement de profils sismiques du sous-sol ou l'analyse statistique du contenu paléontologique des strates, qui permettent de déterminer les conditions environnementales de leur dépôt. Dans le bassin d'Aquitaine, au Portugal et au Maroc, nous avons ainsi reconstitué l'histoire des fluc-

tuations du niveau de la mer sur des périodes de quelques dizaines de millions d'années.

Les correspondances établies entre des variations du niveau marin en des points éloignés de la planète nous conduisent à rechercher des causes globales aux fluctuations observées. Les variations des paramètres orbitaux de la Terre et celles de l'activité tectonique semblent se conjuguer et régler un système chaotique où niveau des mers, climat, évolution des reliefs et accumulation sédimentaire interagissent. Nous avons montré que ce comportement chaotique est suivi par l'évolution des populations de foraminifères (des organismes marins unicellulaires) directement liée aux variations du niveau marin.

L'étude stratigraphique des variations du niveau marin a aussi des enjeux économiques. Ces fluctuations ont en effet permis la formation des gisements de pétrole : les périodes de haut niveau marin, associées à des climats chauds, sont propices au développement du plancton, dont la décomposition a produit le pétrole. Le repérage préalable des couches sédimentaires où des hydrocarbures se sont formés et de celles où ils peuvent être stockés intéresse donc les compagnies pétrolières au plus haut point.

Comment les sédiments se déposent-ils dans les zones littorales? Il y a une quinzaine d'années, Peter Vail, alors géologue de la Société *Exxon*, a élaboré, avec ses collègues, un modèle qui relie l'organisation géométrique des couches sédimentaires aux variations du niveau marin. Une séquence

de dépôt comprend trois étapes : bas niveau marin, transgression et haut niveau marin. Un groupe de couches sédimentaires à la géométrie caractéristique correspond à chacune de ces étapes. La quatrième étape, la baisse du niveau marin, est généralement rapide et les dépôts correspondants ne sont pas distingués de ceux de la période de bas niveau marin.

Volume d'eau et forme de la Terre

Dans les périodes de stabilité de l'écorce terrestre, les déplacements de la ligne de rivage résultent de la combinaison de trois facteurs : les variations de la quantité d'eau liquide contenue dans la mer (qui dépend du volume des calottes glaciaires), l'apport plus ou moins important de sédiments, qui fait plus ou moins avancer la côte vers la mer, et l'abaissement progressif des fonds marins sous le poids de ces sédiments. Les variations de ces trois paramètres se répercutent aussi sur l'épaisseur de la tranche d'eau, espace disponible pour la sédimentation. Les fluctuations de la quantité d'eau et les variations de la quantité de sédiments sont primordiales. L'abaissement du fond marin, qui augmente en permanence l'espace disponible, est plus régulier, mais aussi plus ou moins fort selon la localisation géographique : il n'intervient que secondairement en accentuant ou en atténuant les conséquences des variations de la quantité d'eau et du dépôt sédimentaire.

Contrairement aux idées reçues et aux observations rapides des affleu-

rements, les couches successives ne sont pas toutes parfaitement planes et empilées horizontalement sur l'étendue d'un bassin sédimentaire. Le littoral est toujours en pente : les particules sédimentaires apportées par les fleuves se déposent sur cette pente au fur et à mesure que le courant faiblit au contact de la masse d'eau de la mer. La majorité des sédiments se déposent près de la côte ; seules les fractions les plus fines sont portées plus loin, dans la mer. Les couches sédimentaires forment donc une sorte de prisme, renflé près du littoral, qui s'amincit vers le large et vers le continent (voir la figure 2). La position de ce prisme, et la forme et la composition, minéralogique et paléontologique, des couches sédimentaires qui le composent dépendent du sens de variation du niveau marin lors du dépôt.

Lorsque le niveau marin baisse, la ligne de rivage se déplace brusquement vers le large, dans une régression dite «forcée» : l'altitude absolue de l'embouchure des fleuves s'abais-

sant, la pente de ces derniers augmente, et le courant y est plus fort. Le lit des fleuves est alors creusé. Les cours d'eau s'encaissent, et l'ancienne zone littorale est érodée. Les sédiments arrachés affluent sur le nouveau rivage et s'y déposent en couches qui s'abaissent vers le large (voir la figure 3). Leur accumulation fait ensuite progressivement reculer la ligne de rivage vers le large : cette phase de régression est dite «normale».

À la régression succède une étape de transgression : le niveau marin remonte progressivement, et la ligne de rivage se déplace vers l'intérieur des terres. Cette avancée de la mer sur la terre, avec la remontée du niveau zéro à l'embouchure des fleuves, diminue la pente des cours d'eau, donc leur pouvoir d'érosion et de transport. Moins de sédiments sont apportés et ces derniers, en se déposant, créent un nouveau prisme, décalé vers le continent. Ce prisme est composé de couches horizontales qui s'amincissent vers le large. L'empilement ainsi formé est séparé

de l'empilement des couches de bas niveau marin par une «surface de transgression» caractéristique : les couches transgressives, qui gagnent progressivement vers l'intérieur du continent à mesure que le niveau monte, butent sur l'ensemble plus incliné déposé en bas niveau marin.

Durcissement des surfaces et limites des couches

Dans les phases de remontée rapide du niveau marin, le courant des fleuves est tellement ralenti que les sédiments produits par les érosions et les altérations continentales ne parviennent plus à la mer : la sédimentation y subit de multiples arrêts. Pendant ces arrêts, à l'interface entre les sédiments et l'eau, des réactions de dissolution et de précipitation des minéraux, favorisées par la présence de films bactériens, entraînent le durcissement de la surface du fond sous-marin. Ce durcissement crée les limites nettes entre les couches que nous observons aujourd'hui. En zone littorale et à faible



1. CET AFFLEUREMENT ROCHEUX de la région d'Agadir, au Maroc, témoigne d'une brusque baisse et d'une remontée du niveau de la mer. Une vallée a été creusée par un fleuve dans des sédiments marins lors d'une baisse du niveau de la mer, puis comblée par des dépôts

de marais littoraux (roches plus dures au milieu de la photographie). L'étude de la forme et de la composition des couches sédimentaires sur tout un bassin permet de reconstituer l'histoire locale des fluctuations du niveau marin.

profondeur, certaines de ces surfaces prennent un aspect spectaculaire : elles conservent des empreintes d'animaux qui les ont parcourues (dans l'eau) pendant qu'elles durcissaient.

Au maximum de la vitesse de montée des eaux et d'extension des mers, le bassin marin est sous-alimenté en sédiments d'origine continentale, alors que la vie y est aussi

intense et les restes fossiles aussi nombreux : la proportion de sédiments par rapport aux restes fossiles se réduit considérablement. Le maximum de proportion de restes animaux fossilisés dans les roches situe le maximum de recouvrement des mers (voir la figure 5).

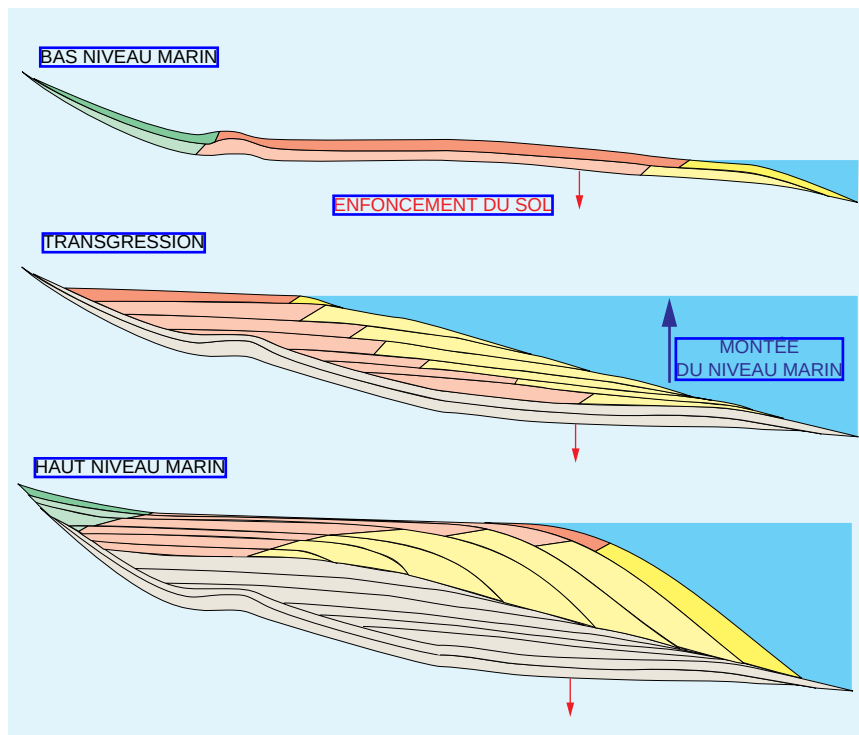
Après cette phase de transgression, le niveau marin, toujours élevé, se stabilise, puis commence à baisser lentement : les sédiments gagnent à nouveau sur la mer, et le rivage recule par régression normale. Les dépôts de haut niveau marin se superposent aux dépôts transgressifs en s'étendant vers le large : les couches, plus inclinées, se terminent en biseau sur la surface d'inondation maximale.

Reconnaître et raccorder les couches sédimentaires

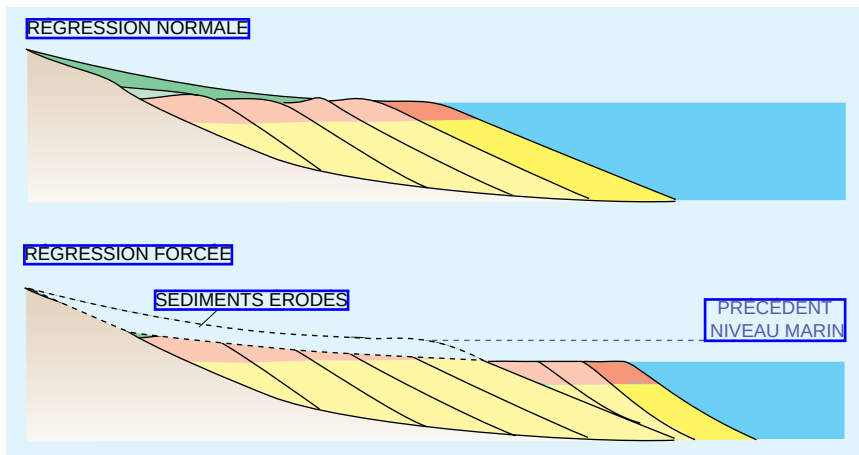
Depuis la publication de ce modèle, des géologues ont reconnu la succession de ces trois étapes, baisse du niveau marin, transgression et haut niveau marin, dans des empilements de roches sédimentaires marines de tous âges géologiques et dans toutes les régions du Globe. Ils associent pour cela diverses démarches. L'analyse des profils sismiques, obtenus par le suivi d'ondes de choc créées par des explosions, nous permet de reconstituer la géométrie d'ensembles de couches avec un pouvoir de résolution maximal de 25 mètres d'épaisseur environ : les ondes de choc se réfléchissent sur les discontinuités importantes qui séparent des roches différentes.

L'étude de puits de forage et des affleurements visibles en différents endroits d'un bassin sédimentaire permet de raccorder des couches entre elles et de les situer dans la chronologie géologique. L'examen de la nature minéralogique des roches et l'étude des structures sédimentaires, liées aux balancements des marées, à la houle, aux tempêtes ou à la décantation, donnent des informations sur l'épaisseur de la tranche d'eau sous laquelle elles se sont déposées. Les surfaces sédimentaires conservent des traces telles que les rides symétriques créées par la houle sous moins de cinq mètres d'eau, que l'on observe couramment sur les plages, ou des stratifications en mamelons créées par les tempêtes.

Le contenu paléontologique des roches est aussi riche en informations :



2. L'ORGANISATION GEOMETRIQUE DES COUCHES sédimentaires, en prismes plus ou moins inclinés, et leur composition permettent de reconstituer des séquences de variation du niveau marin. Selon la nature des roches et la composition paléontologique des couches, on distingue les sédiments fluviaux (*en vert*), les sédiments littoraux (*en orange*) et les sédiments marins (*en jaune*). En période de bas niveau marin (*en haut*), la côte et les sédiments littoraux migrent vers le large. Le niveau de la mer remonte ensuite progressivement, au cours d'une période de transgression (*au milieu*). La ligne de rivage et les dépôts littoraux se déplacent vers le continent. Le niveau marin se stabilise enfin en position haute (*en bas*). Les sédiments font reculer la ligne de rivage par comblement progressif.



3. LA LIGNE DE RIVAGE SE DEPLACE vers le large par régression normale (*en haut*) ou forcée (*en bas*). La régression normale se produit lorsque le niveau marin est stable : les sédiments apportés du continent comblent peu à peu l'espace disponible, sur le continent (*sédiments fluviaux*, *en vert*), sur le littoral (*sédiments littoraux*, *en orange*) et dans la mer (*sédiments marins*, *en jaune*). Une régression forcée est associée à une brusque baisse du niveau marin : la ligne de rivage se décale vers le large et les dépôts fluviaux et côtiers sont érodés (*zone entourée d'un trait pointillé noir*). Ils s'accumulent dans la mer et font encore reculer la ligne de rivage.

des fossiles microscopiques sont d'excellents indicateurs des périodes de bas et de haut niveau marin. Nous l'avons montré pour des foraminifères, animaux unicellulaires à coquille calcaire vivant au fond des mers, qui ont laissé de nombreux restes dans les sédiments anciens. Ils sont caractérisés par une grande diversité morphologique et une capacité à changer de forme, de façon réversible, au fil des générations, selon les conditions environnementales. Au sein d'une même espèce, des individus ont une coquille massive et entièrement enroulée, d'autres une coquille plus aplatie et partiellement déroulée. Dans des espèces voisines, les coquilles sont entièrement déroulées et plates.

Nous avons extrait plusieurs dizaines de milliers de spécimens de foraminifères de couches sédimentaires qui datent de 195 à 185 millions d'années, dans le bassin d'Aquitaine. Les dépôts de bas niveau marin contiennent une forte proportion de formes enroulées : 96 pour cent en moyenne. Les formes déroulées sont surtout présentes dans les couches de haut niveau marin : 30 pour cent du total. Ces changements morphologiques proviennent d'une adaptation aux conditions d'oxygénation. Les formes à coquilles droites ou partiellement déroulées ont, pour un volume identique, une plus grande surface d'échange avec l'extérieur : elles sont adaptées aux fonds mal oxygénés des périodes de hauts niveaux marins.

D'autres études, au Portugal et au Maroc, sur des sédiments d'âges différents, montrent que les foraminifères ont réagi par des changements

4. LA SUPERFICIE DES TERRES EMERGÉES (*en marron*) a considérablement varié au cours des temps géologiques. Leurs limites sont retracées grâce à la cartographie des anciens dépôts marins et continentaux. Il y a environ 155 millions d'années (*en haut*), seuls émergent au Sud-Ouest de l'Europe les massifs armoricain et ardennais, la région de l'Èbre et l'Ouest de la péninsule ibérique. La transgression marine recouvre presque toute la France. Il y a 65 millions d'années (*au milieu*) une régression découvre la majeure partie de la France et de la péninsule ibérique. L'Europe de l'Ouest n'a l'aspect que nous lui connaissons aujourd'hui (*en bas*) que depuis quelques dizaines de milliers d'années. Sur les deux premières cartes, l'esquisse des contours actuels des côtes permet de repérer le mouvement des plaques tectoniques, avec rotation et glissement vers l'Est de l'Ibérie, de la Corse et de la Sardaigne par rapport à la France (*flèche noire*).



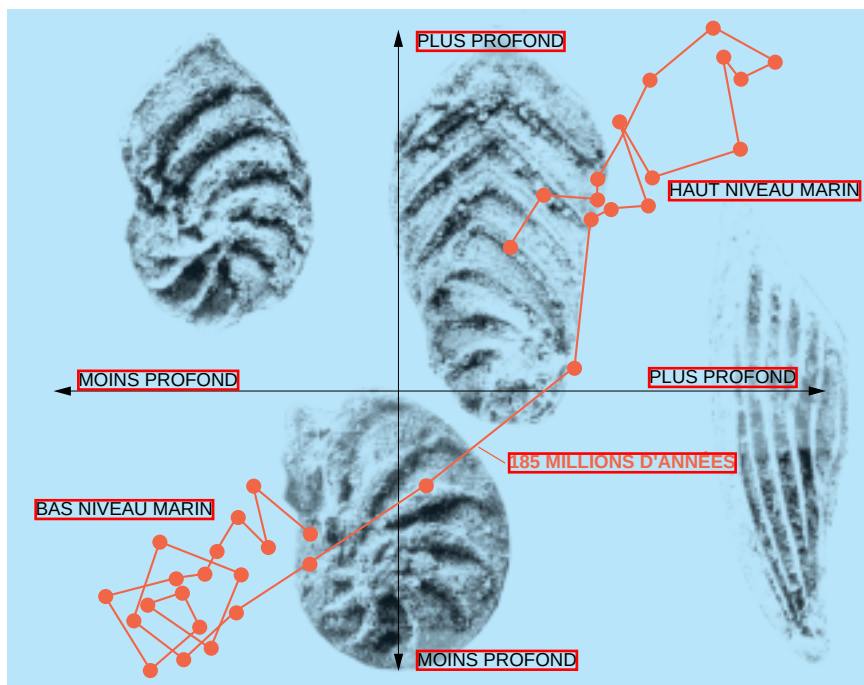
morphologiques aux variations de la profondeur marine. Toutefois ces changements diffèrent suivant la topographie et la géographie du bassin sédimentaire, et la richesse en matières nutritives. Ces micro-organismes

constituent donc d'excellents marqueurs des variations du niveau marin, à condition qu'une analyse précise soit menée dans chaque cas.

En utilisant ces méthodes, notre laboratoire participe au décryptage



5. LES NOMBREUSES COQUILLES DE LAMELLIBRANCHES (des mollusques) qui constituent ce niveau sédimentaire, élément d'un ensemble de couches du Crétacé inférieur, indiquent qu'il s'est formé lors du maximum d'épaisseur de la tranche d'eau. La vitesse de montée du niveau marin était alors telle que les sédiments continentaux ne parvenaient plus dans la mer : seuls les restes d'animaux marins pouvaient s'accumuler.



6. LES PEUPELEMENTS DE FORAMINIFÈRES (animaux marins unicellulaires dont quelques formes sont montrées en fond) ont un comportement chaotique. Une analyse statistique a été réalisée sur des échantillons prélevés dans des couches sédimentaires du bassin d'Aquitaine datées de 185 millions d'années. Pour tracer le diagramme ci-dessus, on porte, pour chaque niveau stratigraphique, en abscisse la profondeur, déduite des associations d'espèces de foraminifères, et en ordonnée la profondeur correspondant au niveau suivant. Les points sont regroupés dans deux zones qui correspondent au haut niveau marin (en haut à droite) et au bas niveau marin (en bas à gauche). La transition entre ces deux états est rapide.

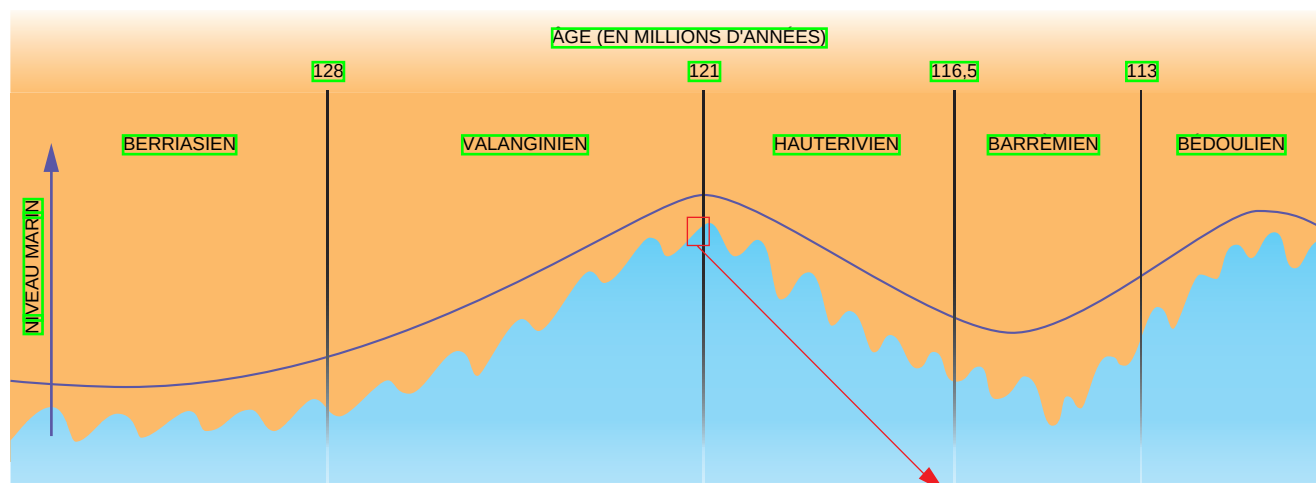
systématique des séquences de dépôt. Nous avons identifié dans le Lias du bassin d'Aquitaine (des couches déposées il y a 200 à 180 millions d'années) 16 séquences qui s'échelonnent sur 14 millions d'années et sur une épaisseur de 200 mètres. Dans le Crétacé inférieur du Portugal (il y a 130 à 100 millions d'années), nous avons distingué 25 séquences pour 23 millions d'années, sur 350 mètres d'épaisseur (voir la figure 7). Dans ces deux cas, les cycles de variation du niveau marin ont une durée moyenne de l'ordre du million d'années. Ils sont enregistrés par une épaisseur de 10 à 20 mètres de roches sédimentaires. L'amplitude des fluctuations du niveau marin serait comprise, selon les cycles, entre 10 et 50 mètres.

La fréquence que nous venons de décrire, à l'échelle du million d'années (comprise selon les cas entre 0,5 et 3 millions d'années), est la mieux visible, mais elle n'est pas la seule. Elle s'inscrit dans un ensemble hiérarchique où elle est qualifiée de séquence de troisième ordre. On décrypte en effet dans la succession des dépôts, à l'intérieur de cette séquence, d'autres cycles d'ordres inférieurs : du quatrième ordre, d'une durée de 100 000 ans à plusieurs centaines de milliers d'années et d'amplitude inférieure à dix mètres ; du cinquième ordre, d'une durée inférieure à 80 000 ans et d'amplitude métrique. Les séquences de troisième ordre s'emboîtent dans des cycles d'ordre supérieur : du deuxième ordre, d'une durée de dix à quelques dizaines de millions d'années et d'amplitude comprise entre 50 et 150 mètres ; du premier ordre, d'une durée supérieure à 50 millions d'années et d'amplitude comprise entre 200 mètres et 350 mètres.

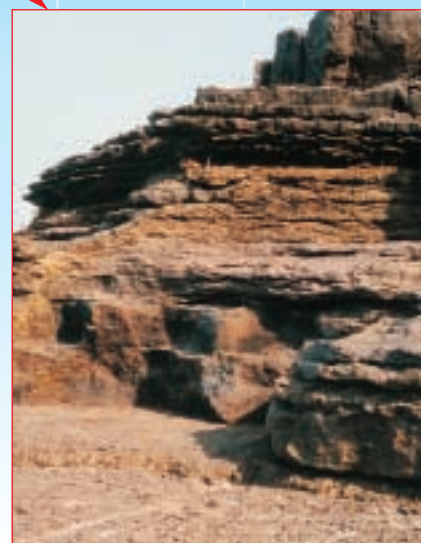
Rassembler les données à l'échelle de la planète

Les variations du niveau marin enregistrées par les sédiments sont-elles identiques sur tout le Globe ? Leurs causes sont-elles régionales ou locales, liées à des irrégularités de la surface des océans ou à des déformations de certaines plaques continentales recouvertes par les mers, ou faut-il rechercher des explications plus générales ?

Le recensement systématique des séquences de troisième ordre est en cours de réalisation pour les 250 der-



7. DES SEQUENCES DE MONTEE ET DE DESCENTE du niveau marin d'une durée de un million d'années environ ont été reconnues dans des couches sédimentaires du Crétacé inférieur au Portugal. Ces 25 séquences s'organisent elles-mêmes en cycles de période plus longue. L'empilement de roches (à droite) correspond à une montée du niveau marin. À la partie inférieure, les bancs calcaires de plus en plus minces sont des dépôts transgressifs, qui résultent d'une augmentation de l'épaisseur de la tranche d'eau. Au-dessus, les dépôts de haut niveau marin, aux bancs calcaires de plus en plus épais, signalent une diminution progressive de la profondeur par accumulation de sédiments.



niers millions d'années, à l'échelle de notre planète, dans tous les bassins sédimentaires et sur les marges des océans. C'est un travail de longue haleine, mais, dans plusieurs cas, on trouve, pour le même intervalle de temps, un nombre identique ou très voisin de séquences dans différentes régions du Globe. Au Crétacé inférieur, il y a entre 134 et 111 millions d'années, nous avons reconnu 25 séquences au Portugal, tandis que 26 ont été identifiées dans le Sud-Est de la France. Les deux cycles du Trias supérieur, il y a entre 215 et 212 millions d'années, observés dans les Alpes ont été retrouvés au Nord-Ouest de l'Australie. Pour les périodes dont les roches sont bien datées, tel le Jurassique dans les différents bassins sédimentaires de France et de Grande-Bretagne où les roches sont riches en ammonites, les séquences paraissent bien partout de même âge. Il semble donc que les fluctuations du niveau marin qui contrôlent l'agencement des sédiments à l'échelle du million d'années sont globales et qu'elles résultent de variations du niveau marin absolu.

Quelles sont les causes de ces variations? Deux explications sont généralement proposées. La première est la modification du volume des masses d'eau océaniques, liée à des changements climatiques qui dépendent eux-mêmes des variations cycliques de paramètres de l'orbite terrestre (l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'axe de son orbite, l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de son orbite et l'apla-

tissement de l'orbite elliptique), mis en évidence par Milutin Milankovic dans les années 1940. Ces cycles astronomiques, aux périodes voisines de 20 000, 40 000 et 100 000 ans ont été reliés, pour le Quaternaire, aux cycles climatiques. Aux époques glaciaires, les eaux sont immobilisées dans les calottes polaires et dans les glaciers de montagnes : le niveau marin absolu baisse. Aux époques interglaciaires, les glaces fondent : le niveau marin absolu monte. Ces variations se caractérisent par une durée courte, une grande amplitude (200 à 250 mètres) et une vitesse élevée (jusqu'à un centimètre par an).

Ce contrôle astronomique a fonctionné dans les temps géologiques plus anciens, avec des périodes de durées différentes au cours des 250 derniers millions d'années, et nous connaissons plusieurs âges glaciaires dans l'histoire de la Terre. Des dépôts sédimentaires de milieu marin profond, de 130 millions d'années, portent la trace de ces cycles climatiques. Ils sont constitués de bancs de calcaires et de marnes alternés. Il est acquis que cette alternance résulte de la succession de phases froides et de phases chaudes, avec une période d'environ 20 000 ans.

Nous n'avons toutefois aucune preuve d'événements climatiques aussi importants que les grandes glaciations du Quaternaire à d'autres époques (au Secondaire par exemple), alors que les sédiments enregistrent des variations du niveau marin d'am-

plitude semblable. En outre, les fluctuations exprimées par les séquences de troisième ordre s'étendent sur des durées plus longues que les cycles de Milankovic. Les modifications du volume des eaux prises en glace n'expliquent pas, seules, ces variations à l'échelle du million d'années.

Le fond des mers se soulève

La seconde explication proposée réside dans la modification de la forme du plancher des océans. La croûte océanique se crée au milieu des océans, dans les dorsales médio-océaniques, et s'étale de part et d'autre. À mesure qu'elle refroidit, sa densité augmente et elle s'affaisse. Les dorsales médio-océaniques ressemblent ainsi à des chaînes montagneuses : plus on s'éloigne de la ligne de sortie de la croûte, plus celle-ci est froide et plus l'altitude est faible. Comme la vitesse de refroidissement, donc l'affaissement des contreforts, ne dépend que du

temps, les dorsales médio-océaniques sont plus larges si l'expansion océanique est plus rapide. À quantité d'eau océanique constante, ces gonflements des fonds sous-marins relèvent le niveau marin absolu.

Les variations de la vitesse d'expansion océanique provoquent des fluctuations du niveau marin sur de longues durées, plusieurs dizaines de millions d'années, avec de grandes amplitudes, jusqu'à 350 mètres, et à vitesse moyenne, quatre centimètres tous les 10 000 ans. Ce phénomène doit jouer un rôle fondamental pour les évolutions à long terme, des premier et deuxième ordres. En revanche, il n'est pas directement relié aux cycles du troisième ordre.

Aucune de ces explication prise isolément ne nous permet de comprendre les variations du niveau marin à l'échelle du million d'années. Nous devons en rechercher les causes dans la dynamique interne et externe de notre planète, mais les mécanismes qui résultent de tels systèmes sont complexes et interdépendants. Les climats sont sous la double influence de facteurs astronomiques et tectoniques. Les topographies créées par la tectonique des plaques conditionnent le climat, mais ce dernier modèle les formes du relief. Les changements de climat font varier le niveau marin, mais les transgressions et les régressions marines agissent sur le climat en modifiant la répartition des terres et des mers. L'accumulation des sédiments provoque l'affaissement des fonds marins, qui favorise à son tour l'accumulation des sédiments.

Le chaos mis à jour

Au total, les enregistrements sédimentaires des variations du niveau marin présentent des caractéristiques des systèmes chaotiques tels que les physiciens et les mathématiciens les décrivent : répétitions quasi périodiques, emboîtement de séquences d'échelles temporelles différentes, alternance de deux états (bas et haut niveau marin) séparés par de rapides transitions de phases (chutes brusques du niveau marin), dépendance vis-à-vis des conditions initiales (les caractéristiques d'une séquence de dépôt dépendent de la séquence précédente).

Nous avons démontré que des variations de la composition des populations de foraminifères (dont nous



8. CES EMPREINTES DE DINOSAURE se sont imprimées sur un fond marin en train de durcir, sous quelques mètres d'eau. La montée du niveau marin empêchait alors la sédimentation.

avons vu qu'elles sont liées aux variations du niveau marin) possèdent ces caractéristiques. Un traitement mathématique, réalisé avec Louis Bonnet, de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, montre une oscillation du système autour de deux états, qui correspondent au haut et au bas niveau marin. Une transition rapide entre ces deux états coïncide avec une régression forcée du niveau marin, dans une séquence datant de 185 millions d'années (voir la figure 6).

Il serait vain de rechercher une explication unique aux fluctuations du niveau marin et encore moins à leur expression dans les successions de roches sédimentaires. Dans le système dynamique qui contrôle le niveau absolu des mers, la modification, même faible, de l'un des paramètres provoque un changement brusque et non prédictible de ce niveau. Selon les bassins, selon les conditions sédimentaires et topographiques locales, cette variation est plus ou moins nettement enregistrée dans l'organisation séquentielle des dépôts, sur des épaisseurs différentes et avec de possibles décalages chronologiques.

Les variations du niveau marin qui rythment, aux diverses échelles, l'histoire de la Terre ont des conséquences importantes sur les reliefs et sur les climats. Aux bas niveaux marins sont associés des climats relativement

froids ; aux hauts niveaux marins, des climats plus chauds. On estime les températures passées des eaux à partir du rapport d'abondance des deux isotopes de l'oxygène, l'oxygène 18 et l'oxygène 16 (dont le noyau contient respectivement 12 et 10 neutrons, en plus des 8 protons), dans le carbonate de calcium de fossiles marins : ce rapport est d'autant plus élevé que les eaux sont plus chaudes. Ces estimations ont confirmé le lien entre la température des eaux et les cycles de deuxième ordre et, dans les rares cas déjà étudiés, de troisième ordre. Les variations du niveau marin nous incitent donc à penser qu'au-delà des cycles climatiques aux périodicités comprises entre 20 000 et 100 000 ans, il doit exister des fluctuations climatiques apériodiques de plus longues durées, de l'ordre du million et de la dizaine de millions d'années, résultant de l'interaction de facteurs astronomiques et de la dynamique terrestre interne.

Les proliférations du plancton dans les mers chaudes et largement étalées des périodes de montée des eaux produisent en quantité importante les matières organiques à l'origine des hydrocarbures. Ces phases sont en outre caractérisées par l'accumulation de sédiments fins, mal oxygénés, favorables à la préservation de cette matière organique. En revanche, les régressions, normales ou forcées, permettent l'accumulation locale de dépôts sableux qui forment ensuite des roches poreuses où migrent et sont stockés les hydrocarbures. Ainsi alternent, dans la succession des dépôts sédimentaires marins, des roches mères et des roches réservoirs d'hydrocarbures dont la localisation, la géométrie et l'âge sont finalement conditionnés par les variations du niveau marin.

Les grandes compagnies pétrolières sont, pour cette raison, particulièrement attentives aux recherches fondamentales et appliquées sur l'enregistrement par les sédiments des variations du niveau marin. L'élaboration de modèles de séquences de dépôt de troisième ordre dans les divers contextes environnementaux de notre planète et le recensement de toutes ces séquences dans les grands bassins sédimentaires fournissent des moyens efficaces pour localiser les gisements potentiels et pour améliorer le pourcentage des forages productifs.

Par ailleurs, des modifications biologiques se déroulent au rythme des séquences de troisième ordre. Outre l'augmentation brusque du taux de renouvellement des foraminifères pendant les phases de baisse et de montée du niveau marin, des phénomènes comparables ont été récemment découverts dans des groupes beaucoup plus complexes, comme les céphalopodes (le groupe des pieuvres et des calmars).

Ces changements climatiques, associés aux variations de l'épaisseur de la tranche d'eau et des étendues respectives des terres et des mers, ont des conséquences importantes sur les écosystèmes. En milieu marin, les baisses brusques des eaux isolent certaines mers, favorisent les apports trophiques d'origine continentale et diminuent les profondeurs. Dans la zone littorale, les fonds sont mieux éclairés et plus agités. À l'inverse, les montées du niveau marin en période transgressive développent les communications entre mers, modifient les tracés des courants, diminuent les arrivées de matières nutritives issues des terres voisines et augmentent l'épaisseur de l'eau entre la surface et les fonds, plus sombres et plus calmes. Les variations du niveau marin ont donc joué un rôle dans l'évolution de la vie, par leurs conséquences sur les renouvellements de la faune, par effets de stress, adaptations à de nouvelles niches écologiques et migrations de populations.

Jacques REY est professeur à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse. René CUBAYNES est professeur agrégé au Lycée Lapeyrouse, à Albi.

P. VAIL, J.-P. COLIN, R. JAN du CHENE, J. KUCHLY, F. MEDIAVILLA et U. TRIFILIAFF, *La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du bassin de Paris*, in *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 8, n° 3, pp. 1301-1321, 1987.

C. WILGUS, B. HASTINGS, C. KENDALL, H. POSAMENTIER, C. ROSS et J. VAN WAGONER, *Sea-Level Changes : an Integrated Approach*, in *Soc. Economic Paleontologists and Mineralogists*, Sp. Public, n° 42, 1988.

J. REY, L. BONNET, R. CUBAYNES, A. QAJOUN et C. RUGET, *Sequence Stratigraphy and Biological Signals : Statistical Studies of Benthic Foraminifera from Liassic Series*, in *Paleogeography Palaeoclimatology-Palaeoecology*, vol. 111, pp. 149-171, 1994.

La localisation par satellite

THOMAS HERRING

À quelques milliers de kilomètres au-dessus de nos têtes, 24 satellites permettent une localisation à un millimètre près.

Pour la phase finale de l'approche, l'avion obéissait aux ordres du pilote automatique, sans utiliser le radioguidage de l'aéroport. En orbite à plus de 20 000 kilomètres d'altitude, les satellites du système de localisation GPS (*Global Positioning System*) fournissaient à l'appareil les informations nécessaires pour se guider.

Lorsque le GPS a indiqué que le sol n'était plus qu'à une centaine de mètres sous le train d'atterrissage, l'appareil a ralenti sa descente. Puis, brusquement, l'alarme du pilote automatique s'est déclenchée : il avait perdu le contact avec un satellite. Le pilote a rapidement repris les commandes et a remis les gaz pour éviter l'écrasement.

Cet incident s'est produit lors d'un atterrissage d'essai, organisé en octobre 1994 par une équipe de l'Université Stanford qui élabore un dispositif de guidage des avions par GPS. La cause en était une erreur dans le programme du satellite GPS. Celle-ci n'avait pas été détectée plus tôt, car personne n'avait jamais demandé au GPS une précision inférieure à 100 mètres (la longueur d'un terrain de football) : il y a quelques années, personne n'imaginait que le GPS serait assez précis pour guider l'atterrissage d'un avion. En Europe, cet exercice reste interdit, même pour des essais. Pourtant beaucoup d'astuce et de travail ont permis d'augmenter les performances du réseau bien au-delà de celles qui avaient été prévues lors de la mise au point, il y a plus de 20 ans.

Le Département américain de la Défense a commencé la mise en place de ce système de localisation au milieu des années 1970, afin de guider ses navires, ses avions et ses véhicules terrestres, n'importe où dans le monde. Puis les civils ont eu accès au réseau, mais avec une précision réduite : si un ennemi avait profité des mêmes informations, l'avantage militaire aurait été nul. Des ingénieurs civils ont

toutefois contourné ces limitations : aujourd'hui n'importe qui peut obtenir une précision nettement supérieure à celle que les concepteurs du système voulaient donner.

Grâce à des récepteurs GPS portables, des plaisanciers se dirigent dans des ports embrumés et des automobilistes trouvent leur chemin dans des régions qu'ils ne connaissent pas. Le système est même utilisé pour suivre les déplacements de conteneurs dans les zones de stockage du port de Singapour, et il permet aux géologues d'enregistrer des déformations de la croûte terrestre de quelques millimètres seulement, afin de prévoir les séismes.

Dès le premier satellite

Comment obtient-on des informations aussi précises ? Examinons d'abord la brève histoire de la localisation terrestre par satellite et les principes du GPS. Peu après le lancement du satellite *Spoutnik* par l'URSS, en 1957, des ingénieurs ont imaginé de calculer la position d'un récepteur terrestre à partir des émissions radio d'un satellite de position connue. Ils envisagèrent d'abord d'utiliser le décalage Doppler engendré par le passage du satellite au-dessus du récepteur : la fréquence des signaux radio reçus augmente quand le satellite approche du récepteur, et diminue quand le satellite s'éloigne, tout comme varie la tonalité de la sirène d'une ambulance qui s'approche puis s'éloigne.

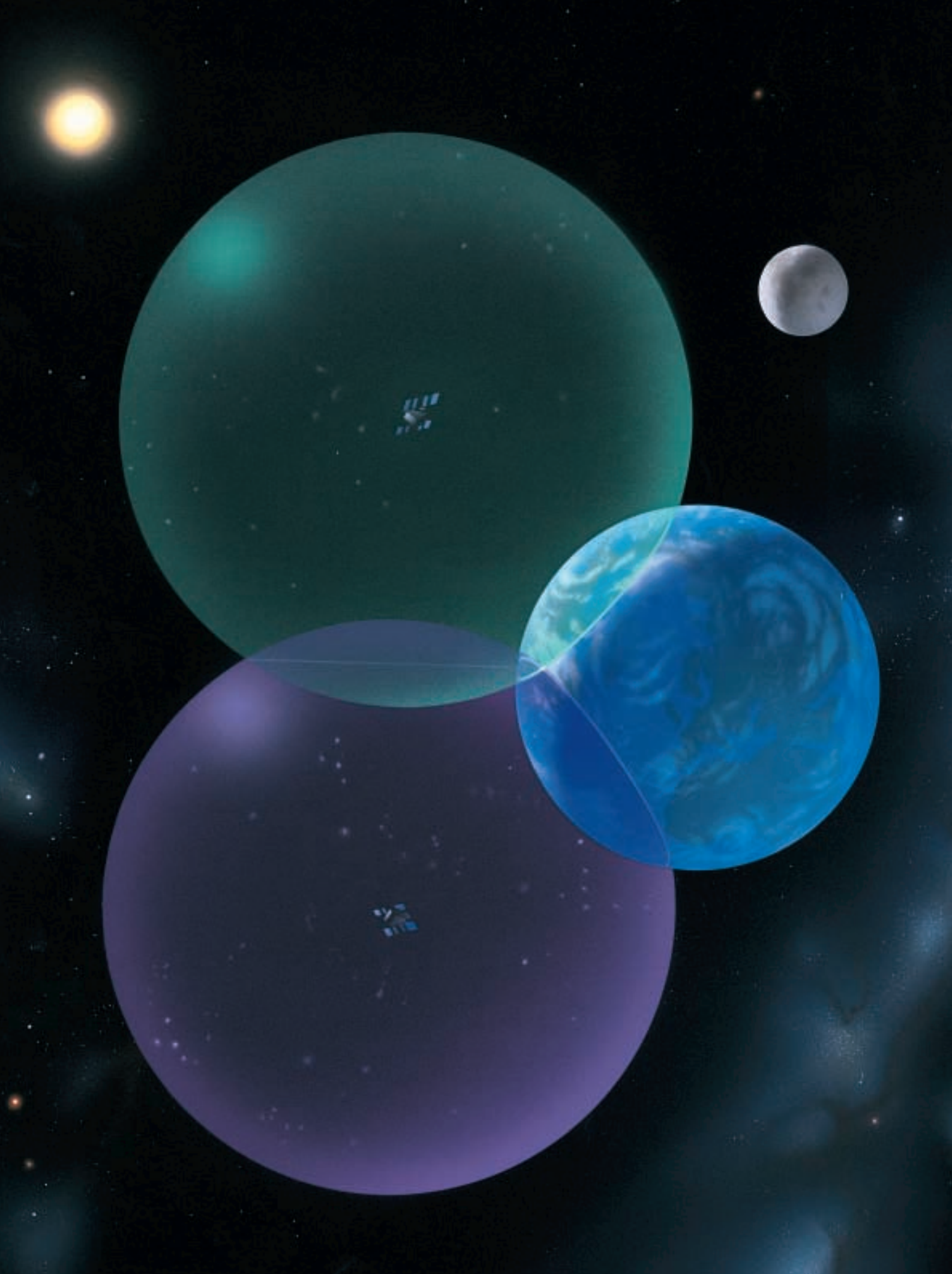
Sur ce principe, la marine américaine a mis au point le système *Transit* de localisation par satellite, dans les années 1960. Toutefois la méthode était complexe, car elle nécessitait de cou-

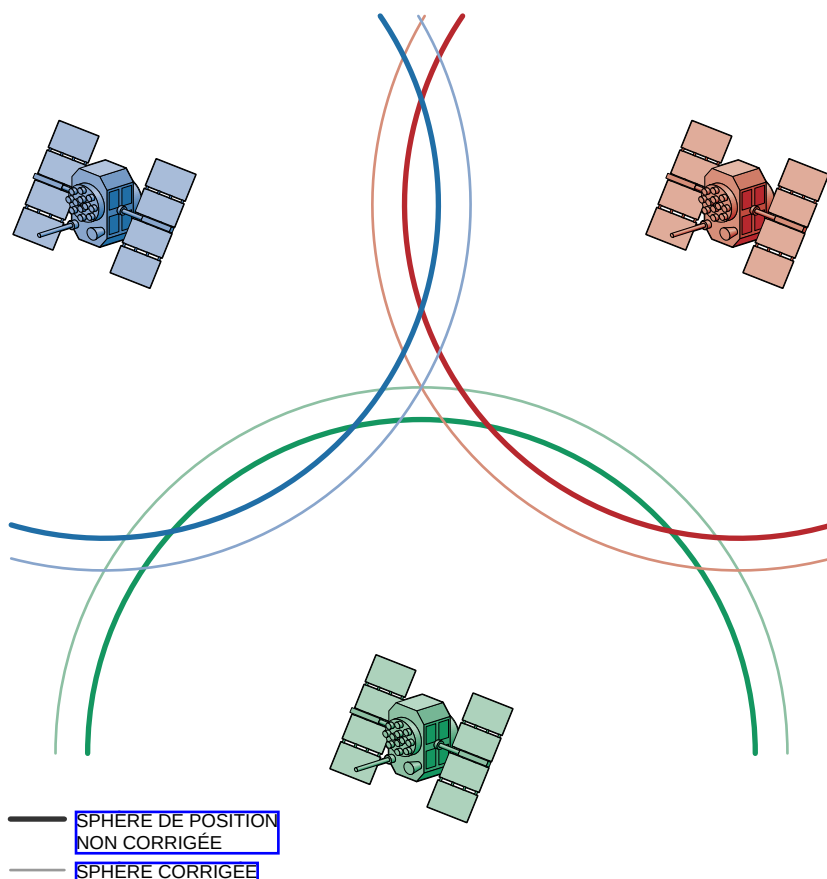
teux équipements électroniques afin d'enregistrer deux passages du satellite au-dessus du récepteur : la localisation n'était obtenue qu'après plus d'une heure et demie d'attente et, dans les cas les plus favorables, même après plusieurs jours de mesures, la précision n'atteignait pas le mètre. Les applications semblaient limitées.

Avant même que le premier satellite du système *Transit* ne soit lancé, le Département américain de la Défense étudiait un système plus précis, qui permettrait à un pilote de chasse de connaître instantanément sa position exacte. Au lieu d'utiliser l'effet Doppler, les ingénieurs militaires envisageaient de se fonder sur des mesures de distances effectuées par plusieurs satellites.

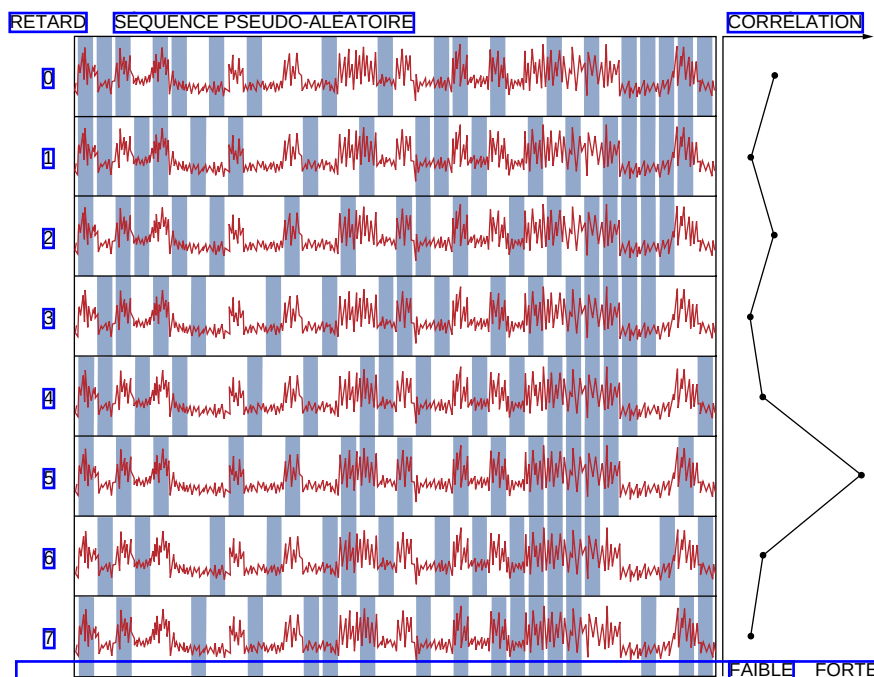
Théoriquement, cette méthode permet un calcul immédiat de la position. Si nous mesurons qu'un satellite est à 20 000 kilomètres de nous, par exemple, nous savons que nous sommes alors sur une sphère de 20 000 kilomètres de rayon, centrée sur le satellite. Nous pouvons calculer précisément la position de cette sphère, car les mouvements du satellite sur son orbite sont connus et stables. Si nous mesurons simultanément la distance d'un deuxième satellite, nous déterminons une deuxième sphère de positions possibles (voir la figure 1). La mesure de la distance d'un troisième satellite permet d'en connaître une troisième. Or trois sphères n'ont que deux points communs. Comme l'un de ces points n'est généralement pas une position possible (il est situé dans les profondeurs de la Terre ou dans l'espace), la mesure des distances qui nous séparent de trois satellites indiquent notre position exacte.

1. DES SATELLITES dont on connaît la position précise permettent un repérage au millimètre près, à la surface du Globe. En recevant des émissions codées de ces satellites, on détermine à quelle distance se trouvent les satellites du système. À chaque distance correspond une sphère de positions possibles, centrée sur le satellite émetteur du signal (en violet et en vert). L'intersection de trois sphères donne, en principe, une position exacte.





2. LES ERREURS DE SYNCHRONISATION entre l'horloge d'un récepteur et celles des satellites du GPS sont à l'origine d'erreurs sur les distances mesurées. Les sphères des positions possibles (*lignes épaisses*) ne se croisent pas en un point. Une légère avance ou un léger retard de l'horloge du récepteur corrige les distances et permet aux sphères de se rencontrer en un point (*lignes fines*). Dans cette figure à deux dimensions, trois satellites permettent de déterminer la position d'un point, mais, dans l'espace tridimensionnel, il faut quatre satellites.



3. LES SATELLITES DU GPS émettent, à des instants connus, des signaux codés selon des séquences pseudo-aléatoires. Le temps de propagation du signal jusqu'au récepteur (donc la distance parcourue par l'onde) correspond au décalage temporel de la séquence d'émission (*en bleu*) qui produit la corrélation la plus grande avec le signal reçu (*en rouge*) : ici sur la ligne numéro 5.

Comment mesurer la distance entre un point du Globe et un satellite? Avec un radar installé au sol, on mesurerait le temps que met une onde électromagnétique pour aller jusqu'à un satellite et en revenir après réflexion ; on calculerait alors la distance parcourue, en connaissant la vitesse de propagation des ondes. Toutefois cette méthode nécessiterait l'émission d'ondes radar, facilement détectables par un ennemi. L'armée américaine choisit donc plutôt d'utiliser des signaux radio émis par les satellites du GPS. Elle décida de faire émettre ces impulsions radio à des instants connus, de sorte que, en mesurant les temps d'arrivée des signaux, un récepteur calcule les distances qui le séparent des satellites. Cette procédure exige que l'horloge de la station de réception soit rigoureusement synchronisée avec celle du satellite.

Synchronisons nos montres

Comment synchroniser précisément ces horloges? Un écart aussi faible qu'un millionième de seconde provoque une erreur de 300 mètres. Les satellites du système GPS emportent chacun une horloge atomique de haute précision, mais, pour des raisons de coût et de complexité, on ne peut pas en équiper chaque récepteur. Cette difficulté a été contournée : pour obtenir une bonne précision sur la distance, on cherche plutôt à connaître le décalage entre l'horloge du récepteur et une référence.

Plus exactement, la procédure est la suivante : comme le temps donné par l'horloge du récepteur est légèrement décalé, les mesures des distances de quatre satellites du système sont un peu fausses. Ainsi quatre sphères de positions possibles, centrées sur quatre satellites, ne se coupent pas en un point : elles sont un peu trop grandes si l'horloge du récepteur avance, ou un peu trop petites si l'horloge retarde, mais il existe une valeur du décalage de l'horloge pour laquelle les quatre sphères n'ont qu'un point d'intersection, la position du récepteur (voir la figure 2). On se fonde sur cette observation pour calculer les corrections nécessaires et synchroniser l'horloge à quartz du récepteur avec les horloges atomiques des satellites.

Pour la transmission des informations des satellites vers les récepteurs au sol, les concepteurs du système ont choisi une technique utilisée depuis

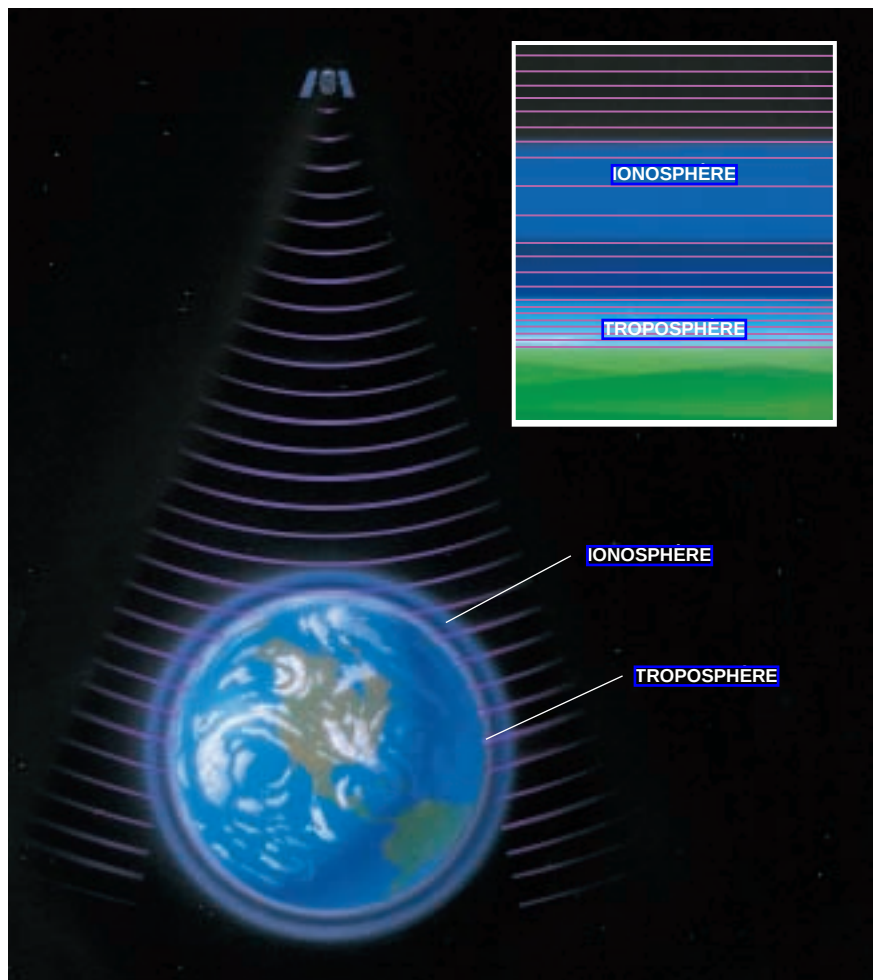
les années 1950 par les astronomes qui étudient les planètes en envoyant des signaux radar à partir de télescopes géants. Ces signaux sont émis à des moments qui semblent aléatoires, mais qui suivent en fait une séquence soigneusement codée. Les astronomes mesurent la durée de l'aller-retour des ondes radar, réfléchies par les surfaces des planètes, en déterminant le décalage pour lequel le signal émis et le signal réfléchi sont parfaitement en phase (voir la figure 3). De même, les ingénieurs du projet GPS proposèrent de déterminer la distance des satellites par la recherche de corrélations entre les émissions pseudo-aléatoires et les signaux réfléchis.

L'émission de séquences pseudo-aléatoires d'ondes radio par les satellites GPS permet aux satellites d'émettre tous sur la même fréquence sans interférences. Comme chaque satellite GPS émet un code spécifique, un récepteur monofréquence suffit à séparer les différents signaux. Les récepteurs GPS sont donc peu coûteux, ce qu'apprécient les navigateurs et les randonneurs.

Sur quelles orbites placer les satellites? La quasi-totalité des satellites artificiels sont sur des orbites proches de la Terre ou sur des orbites géostationnaires, à 36 000 kilomètres d'altitude. Les orbites basses sont moins coûteuses à atteindre et ne demandent ensuite qu'une faible puissance d'émission, car les distances aux récepteurs sont plus courtes. Toutefois, une couverture permanente de la surface du Globe à partir de ce type d'orbites nécessiterait le déploiement de plusieurs centaines de satellites. Sur des orbites géostationnaires, en revanche, moins de satellites seraient nécessaires, mais chacun d'entre eux doit être équipé d'émetteurs puissants, et la couverture des régions polaires est mal assurée. Les concepteurs du GPS ont choisi une solution intermédiaire ; les satellites, au nombre de 24, ont été placés à une altitude de 20 000 kilomètres environ, de sorte que chaque point de la surface de la Terre reçoive en permanence les émissions d'au moins quatre d'entre eux. Trois des satellites sont en réserve.

Entre l'ennemi et le civil

Afin d'éviter qu'un ennemi n'utilise le GPS pour se localiser aussi bien que l'armée des États-Unis, les ingénieurs militaires ont voulu coder les émissions des satellites. Toutefois, le Départe-



4. LES COUCHES ATMOSPHERIQUES perturbent les signaux du système GPS et peuvent introduire des erreurs. Les perturbations les plus importantes se produisent lorsque les ondes radio traversent l'ionosphère, chargée électriquement, et la troposphère, humide : dans les deux milieux, l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde, et les signaux sont déformés. Alors que l'ionosphère écarte les fronts d'onde des émissions radio, la troposphère les resserre (encart à droite). Comme ces perturbations du signal sont mesurables par un récepteur GPS fixe, les météorologues utilisent le système GPS pour déterminer le contenu de la troposphère en vapeur d'eau.



5. LES AVEUGLES POURRAIENT utiliser le GPS pour se diriger, tout comme les bateaux qui naviguent dans le brouillard. Cette utilisation et d'autres seraient plus faciles sans le brouillage imposé par les militaires.

ment de la Défense souhaitait aussi que les civils profitent du GPS. Pour limiter la précision accessible aux civils, les ingénieurs ont préféré limiter l'accès aux informations sur les instants où les satellites émettent leurs signaux. Ils ont dégradé la synchronisation du système en décalant les horloges atomiques avec un code spécifique. Le signal dégradé permet une localisation avec une précision de 100 mètres. Les récepteurs militaires, équipés pour déchiffrer les signaux codés, fournissent une position plus précise en corrigeant les décalages des horloges.

C'était compter sans l'astuce des ingénieurs et chercheurs civils : peu de temps après le lancement du premier groupe de satellites, des ingénieurs civils ont réduit les erreurs de locali-

sation du système à quelques millimètres, atteignant une précision plusieurs milliers de fois supérieure à celle qui avait été imaginée initialement par les militaires. Pour corriger les décalages des horloges atomiques des satellites, ils mesurent les signaux de plusieurs satellites en un point fixe de position connue. Connaissant la position du récepteur et celles des satellites sur leurs orbites, ils comparent les pseudo-distances (mesurées par le GPS) avec les véritables distances (qu'ils ont calculées). Les différences indiquent la combinaison des erreurs introduites volontairement dans les horloges des satellites et du décalage de l'horloge du récepteur au sol. L'examen des résultats obtenus simultanément avec différents satellites permet de connaître

le décalage de l'horloge au sol : les décalages des horloges atomiques sont donc calculables à leur tour.

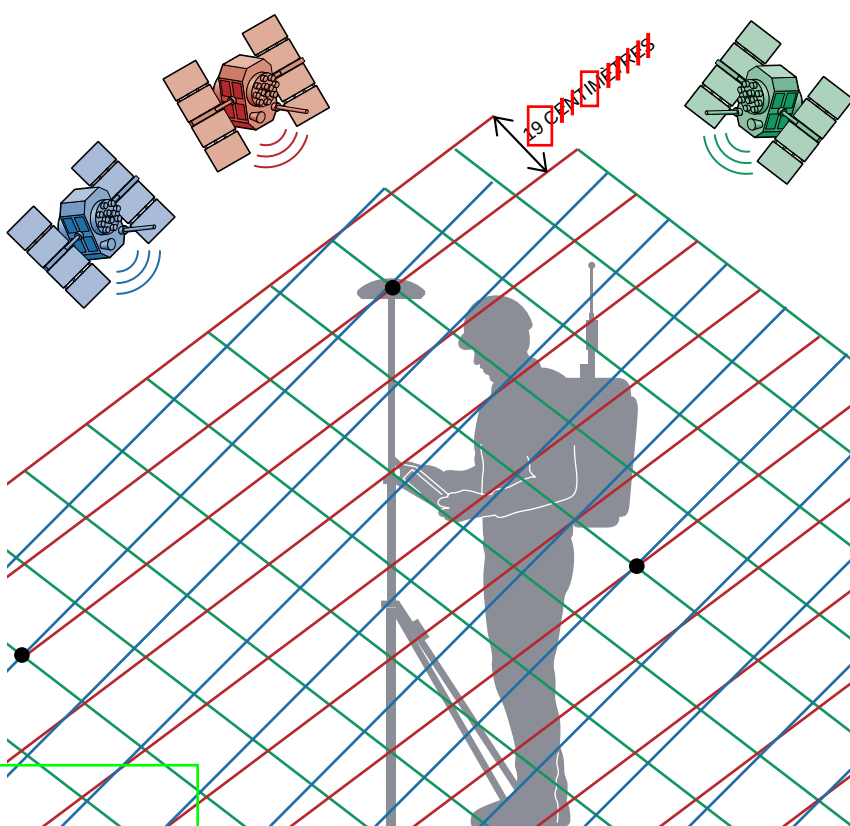
Aujourd'hui, des stations fixes calculent les décalages des horloges des satellites et transmettent les corrections par radio aux récepteurs GPS des environs (voir la figure 5). Cette utilisation du GPS en positionnement relatif offre aux utilisateurs civils des précisions inférieures au mètre, à partir de récepteurs peu onéreux. Des récepteurs perfectionnés donnent même des précisions centimétriques. De nombreux fournisseurs proposent aujourd'hui ce service, parmi lesquels on trouve même le gouvernement américain. L'administration fédérale de l'aviation propose ses services pour la navigation aérienne, et les garde-

À la poursuite des ondes

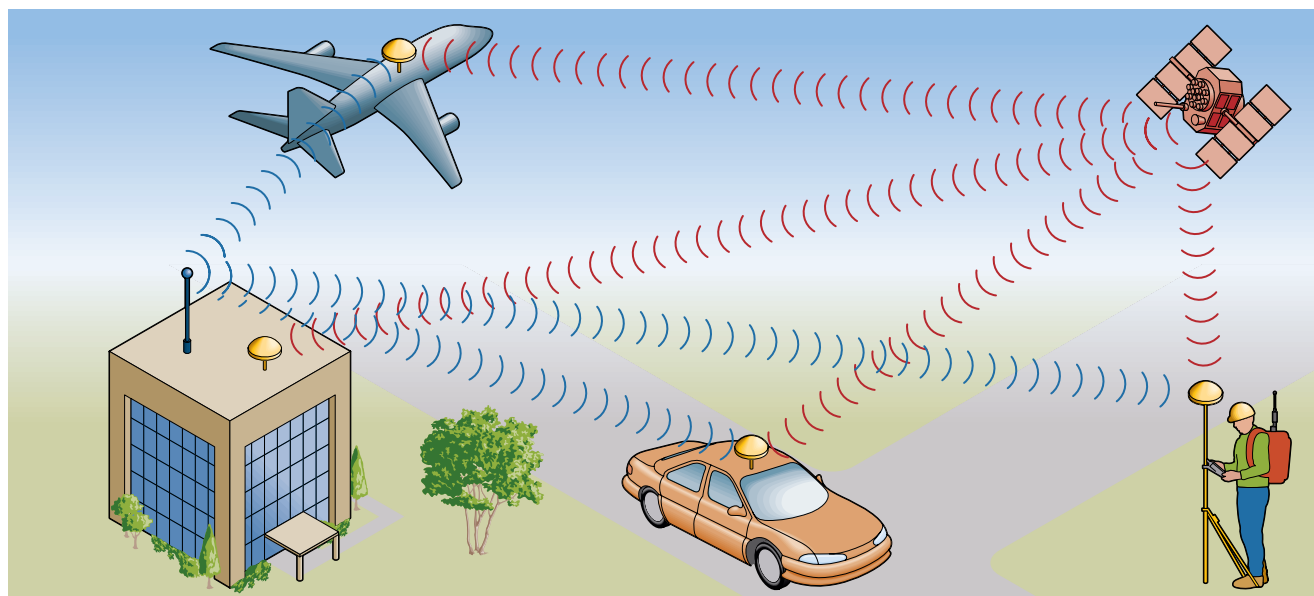
Les géophysiciens utilisent le GPS depuis le milieu des années 1980 pour surveiller les déformations, lentes mais continues, du sol dans les régions d'activité sismique. Pour détecter ces signes avant-coureurs des tremblements de terre, le maximum de précision du GPS est recherché : on utilise la technique d'analyse de phase des fréquences porteuses, qui permet d'obtenir une précision de quelques millimètres.

Les satellites émettent des signaux GPS en modulant une fréquence porteuse. L'analyse de phase détermine quelle partie du signal radio atteint le foyer de l'antenne à un instant donné (la phase de l'émission). Comme un nageur dans l'océan voit s'il est au sommet d'une vague, dans le creux ou quelque part entre les deux, la détection de la phase du signal permet de mesurer la position du foyer de l'antenne dans les 19 centimètres de la longueur d'onde de l'onde porteuse du signal GPS.

Cette méthode permet d'obtenir des précisions de l'ordre d'une petite fraction de la longueur d'onde. La principale difficulté consiste à bien distinguer les ondes que reçoit l'antenne. Le moyen le plus simple consiste à détecter simultanément les phases des fréquences porteuses de plusieurs satellites. Si l'on observe, par exemple, que le foyer de l'antenne réceptrice correspond simultanément à la phase nulle pour trois satellites différents, on déduit que le récepteur se trouve en des points particuliers (points noirs du diagramme). En utilisant de telles informations pour un nombre suffisant de satellites, on trouvera des points espacés de plus d'un mètre. Ainsi, à partir de la connaissance de la position approximative de l'antenne (en utilisant le GPS en localisation différentielle), on détermine lequel des points obtenus par la méthode d'analyse des phases représente la véritable position.



La mise en œuvre de cette méthode est toutefois difficile, car on doit simultanément tenir compte du trajet des ondes et du mouvement des satellites. Certaines applications de la méthode de recherche de phase, telle l'aide à l'atterrissage des avions, nécessitent des calculateurs spéciaux pour tester la validité de la navigation. Une des limitations de sécurité introduites par le Département américain de la Défense complique le problème : le système « anti-copie ». Comme les décalages codés des horloges, le système « anti-copie » rend plus complexes et plus coûteuses les applications civiles de haute précision. La mise en service de systèmes russe et européen résoudra en partie cette difficulté.



6. L'UTILISATION DU GPS EN MODE DIFFERENTIEL permet d'obtenir des précisions supérieures à celles que la Défense américaine voulait imposer. Un récepteur fixe, de position connue, calcule l'erreur d'horloge contenue dans le signal émis par le satellite (en rouge) et

envoie, par radio, les corrections à appliquer aux récepteurs mobiles voisins (en bleu). La méthode fait passer la précision du système d'une centaine de mètres à moins de un mètre. De nombreux fournisseurs proposent aujourd'hui ce service.

côtes transmettent les corrections près des principaux ports.

Les militaires américains doivent-ils continuer de coder les informations en temps de paix, obligeant ainsi d'autres services publics à dépenser de l'argent pour corriger les erreurs et transmettre les résultats? La question s'est posée avec encore plus d'acuité pendant la guerre du Golfe et lors de l'intervention américaine en Haïti, quand le Département américain de la Défense a désactivé les procédures de sécurité du GPS, parce qu'il ne disposait pas d'assez de récepteurs militaires

à envoyer en opérations et qu'il avait besoin de récepteurs civils (les troupes américaines en ont même acheté par correspondance). Les autorités militaires américaines ont parié que l'ennemi n'aurait pas de missiles guidés par le GPS et qu'il n'avait pas l'habitude de la vente par correspondance.

De surcroît, la Russie achève la mise au point d'un système de positionnement précis par satellite nommé GLO-NASS, semblable au système GPS. Le système russe ne sera pas codé, de sorte que n'importe quel possesseur d'un récepteur adapté pourra l'utiliser. L'existence de ce système ouvert et la large diffusion des corrections GPS annuleront les éventuels avantages militaires qui résultaient de la dégradation de la précision des horloges des satellites du GPS. L'Académie des sciences américaine a recommandé la suppression du décalage des horloges, mais la position du Département de la Défense reste... décalée.

Chaque semaine, de nouvelles utilisations de la localisation par satellites sont proposées. Les météorologues obtiennent des informations sur l'état de l'atmosphère en analysant la propagation des signaux GPS. En outre, le GPS est de plus en plus utilisé pour aider la navigation maritime ou aérienne, ainsi que pour le guidage automobile. Des récepteurs expérimentaux guident même les aveugles. L'Agence spatiale européenne pilote le projet GNSS-1 de navigation aérienne

fondé sur le GPS. En ajoutant quelques satellites sur des orbites géostationnaires, les problèmes de précision ou de fiabilité, tel celui évoqué au début de cet article, seraient éliminés. Le premier de ces satellites devrait être lancé à la fin de 1997.

Les usages civils sont bien plus nombreux que les utilisations militaires et, au début du prochain millénaire, la vente des services du GPS devrait rapporter environ cinq milliards de francs par an à l'économie américaine : cet outil militaire est devenu une source de revenu national. Dans les prochaines années, une question deviendra alors inévitable : qui doit contrôler le système GPS?



7. LA DEFORMATION DE LA CROûTE TERRESTRE est mesurée par le suivi de récepteurs GPS dans des zones géologiquement actives comme celle de Tien Shan, en Asie centrale. Le GPS permet de surveiller l'accumulation des contraintes dans le sol.

Thomas HERRING est professeur à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Bradford H. HAGER, Robert W. KING et Mark H. MURRAY, *Measurement of Crustal Deformation Using the Global Positioning System*, in *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 19, pp. 351-382, 1991.

Tom LOGSDON, *The Navstar Global Positioning System*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

GPS World, magazine bimensuel publié par Advanstar Communications, 859 Williamette Street, Eugene OR 97401, États-Unis.

Sur le World Wide Web : <http://igs.cbl.nasa.gov/> et <http://www.unavco.ucar.edu/>

L'imagerie acoustique dans l'océan

MICHAEL BUCKINGHAM • JOHN POTTER • CHAD EPIFANIO

En enregistrant les réflexions et les diffusions des bruits de la mer sur les objets immergés, on forme des images en couleurs de ces objets sans recourir à des sonars.

Le cinéma nous a souvent fait entendre le bruit caractéristique des sonars : les échos indiquent au sous-marinier la position des cibles. Naguère, le bruit de fond de l'océan était considéré comme une nuisance, car il masquait les signaux intéressants : les vagues qui déferlent, les bateaux qui passent, la pluie qui tombe et les diverses espèces marines, telle la crevette, qui produisent des bruits caractéristiques, contribuent à la cacophonie de ce que l'on a mal nommé «le monde du silence». Aussi les ingénieurs ont-ils longtemps cherché à éliminer le bruit de fond pour obtenir les signaux.

Aujourd'hui, on cherche à utiliser le bruit de fond plutôt qu'à le supprimer, car les objets plongés dans l'océan modifient ce champ sonore ambiant en fonction de leur forme, de leur composition et de leur position. Le son ambiant dans l'océan est analogue à la lumière du jour dans l'atmosphère : à l'extérieur, nous voyons les objets parce qu'ils diffusent et réfléchissent la lumière du jour. De même, les sons qui emplissent l'océan jouent le rôle de «lumière du jour acoustique», et nous pouvons réaliser des images d'objets sous-marins en utilisant le bruit ambiant comme source d'«éclairage». Nos premiers résultats montrent que la nouvelle imagerie acoustique devrait être utile dans de nombreuses circonstances, de la sécurité des ports à la détection des mines sous-marines.

À ce jour, les images obtenues sont assez grossières, et leur résolution est bien inférieure à celle des images

optiques. Notre vue est précise, parce que la pupille dilatée est 10 000 fois plus grande que la longueur d'onde de la lumière visible, ce qui permet à l'œil de recevoir un grand nombre de longueurs d'onde. L'obtention d'une résolution acoustique analogue nécessiterait un récepteur de 600 mètres de diamètre ! Cependant, comme l'eau absorbe presque tout le rayonnement électromagnétique (notamment la lumière), le son est le moyen privilégié (et souvent le seul) d'obtenir des informations sur ce qui se passe dans les profondeurs océaniques.

Les Anciens se préoccupaient déjà du son dans l'eau, Aristote et Plin le Jeune se demandaient si les poissons entendaient. Dans la Chine antique, les pêcheurs localisaient les bancs de poissons en plongeant une tige de bambou dans l'eau : ils écoutaient le bruit de la mer à l'extrémité placée dans l'air. Plus tard, Léonard de Vinci développa cette idée : il écrivit dans ses études sur les propriétés de l'eau que, «si l'on se place sur son bateau immobile, et si l'on place le bout d'un long tube dans l'eau et l'autre extrémité sur son oreille, on entendra les bateaux éloignés».

Néanmoins, c'est seulement durant la Première Guerre mondiale que les inventeurs fabriquèrent les premiers systèmes de localisation sous-marine pour faire face à la menace des sous-marins. Ces appareils rudimentaires sont à la base de tous les sonars suivants, dont la mise au point s'est accélérée au cours de la Seconde Guerre mondiale. Le principe de fonctionnement des sonars les plus perfectionnés

reste identique à celui de leurs ancêtres : ils transmettent activement les sons dont ils reçoivent l'écho produit par la cible, ou bien ils reçoivent passivement les sons produits par un émetteur.

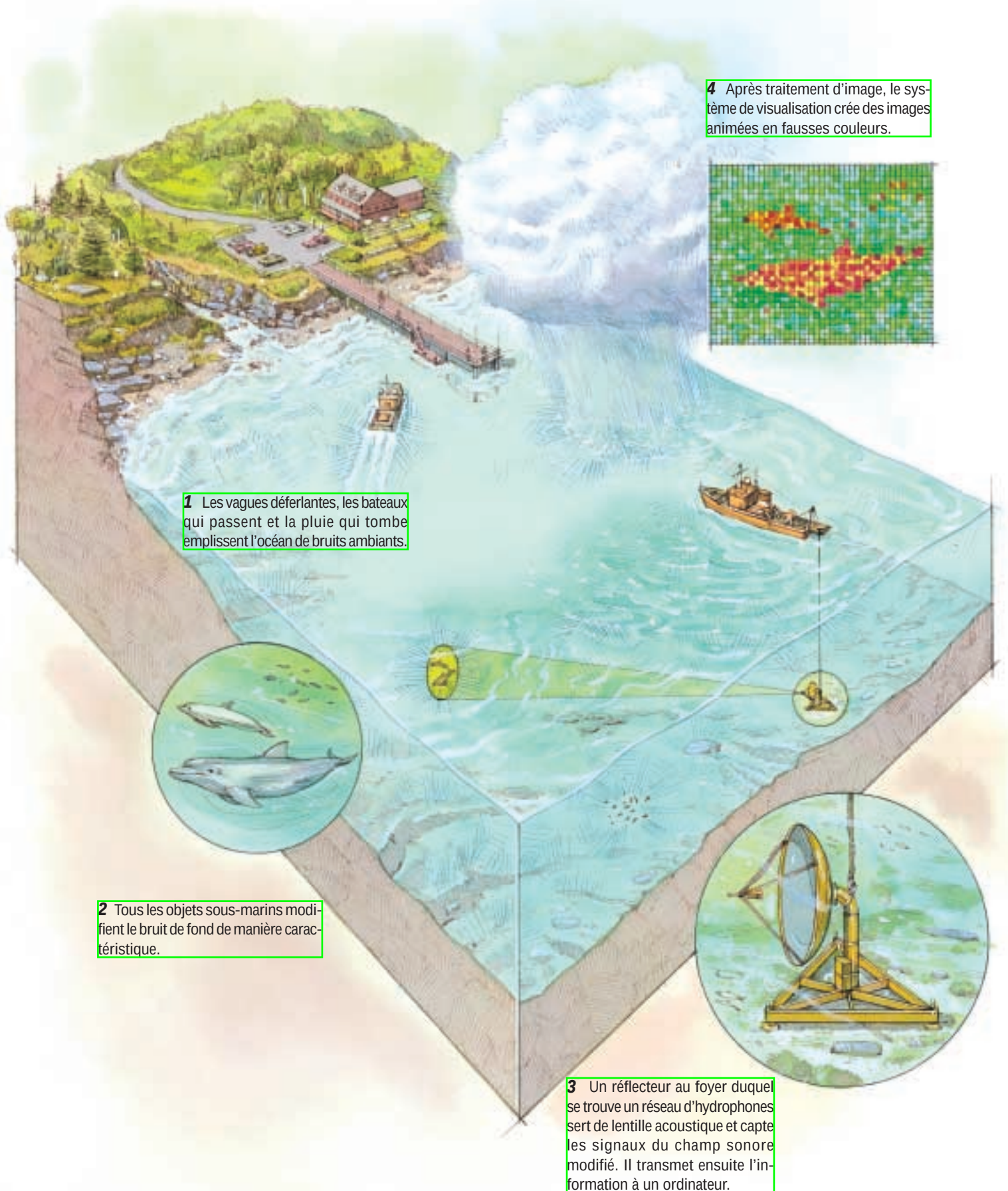
L'important rôle historique des techniques active et passive explique pourquoi on n'a cherché que récemment une manière nouvelle de «voir» dans l'océan. En comprenant, au milieu des années 1980, que la vision n'est ni active, ni passive (dans le sens de regarder des sources de lumière directe), l'un d'entre nous (M. Buckingham) posa les bases d'une visualisation acoustique sous-marine analogue à celle de l'œil. Cette nouvelle technique pallierait les principaux inconvénients des techniques classiques de détection sous-marine : l'écholocalisation révèle la présence de l'opérateur, tandis que la détection passive, indécélable, ne repère pas les cibles silencieuses.

La première expérience

En 1991, nous avons effectué les premières expériences d'imagerie acoustique dans l'océan Pacifique, au large de la Californie. Le dispositif principal était un récepteur acoustique, formé d'un réflecteur parabolique de 1,2 mètre de diamètre et d'un hydrophone (un microphone sous-marin) en son foyer.

Le réflecteur servait de lentille acoustique. L'expérience devait indiquer si un objet placé dans le «faisceau» (ou champ d'écoute) du récepteur modifiait le bruit perçu. Un panneau

Le principe de l'imagerie acoustique



rectangulaire en contre-plaqué, d'un demi-mètre carré de surface et recouvert de néoprène (un bon réflecteur et diffuseur du son) servait de cible. Nous avons trouvé que, pour les fréquences comprises entre 5 et 50 kilohertz (la gamme de fréquences produites par les vagues qui se brisent et qui sont la source principale du bruit ambiant de l'océan), l'intensité du bruit doublait lorsque la cible était placée dans le champ d'écoute du récepteur. Ce résultat persistait lorsque la distance entre la cible et le récepteur était portée de 7 à 12 mètres. De surcroît, la cible réfléchissait certaines fré-

quences et en absorbait d'autres : elle avait une «couleur» acoustique que l'on pouvait traduire en couleur optique, de manière à créer des images acoustiques en fausses couleurs.

Après ce premier succès, nous avons perfectionné le dispositif. Le réflecteur parabolique muni d'un hydrophone en son foyer ne «regarde» que dans une direction, ce qui correspond à un seul pixel d'une image. Pour former une image plus complète, nous devons obtenir plus de pixels, en utilisant plus de «faisceaux» récepteurs (un peu comme l'œil composé de la mouche). L'intensité du son reçu par chaque récepteur

pourrait alors être transformée en un niveau de luminosité d'un pixel sur un moniteur vidéo. Comme pour les photographies dans les journaux, le contraste entre les pixels permettrait à l'œil d'interpréter le résultat comme une image à grains plus ou moins fins.

Nous avons d'abord tenté de créer des images composées d'une centaine de pixels. Au milieu de l'année 1992, nous avons commencé à concevoir une nouvelle lentille acoustique que nous avons nommée ADONIS (l'acronyme d'*acoustic-daylight, ambient noise imaging system*, soit «système d'imagerie à bruit ambiant, en lumière acoustique naturelle»). Avec la Société EDO, qui a fabriqué un réseau elliptique de 128 hydrophones pour ADONIS, nous avons construit un réflecteur sphérique de trois mètres de diamètre au foyer duquel nous avons placé les hydrophones. Ce système avait un champ total d'environ six degrés (horizontalement) sur cinq degrés (verticalement), ce qui représente un dixième de la vision angulaire d'un appareil photographique.

En août 1994, nous avons immergé ADONIS pour la première fois, au large de la Californie, à partir d'une plateforme de recherche de l'Institut Scripps. Des panneaux carrés de un mètre de côté, en tôles d'aluminium recouvertes de néoprène, constituaient les cibles. Les panneaux étaient montés en différentes configurations sur des châssis carrés placés au fond de la mer. L'ensemble de l'électronique, logé dans un caisson métallique étanche, était placé le long du mât qui supportait le réflecteur. Cet appareillage électronique devait transformer les données récoltées par ADONIS en signaux numériques. À partir de ces données, transmises vers la surface, un micro-ordinateur placé en surface affichait des images en fausses couleurs sur son écran.

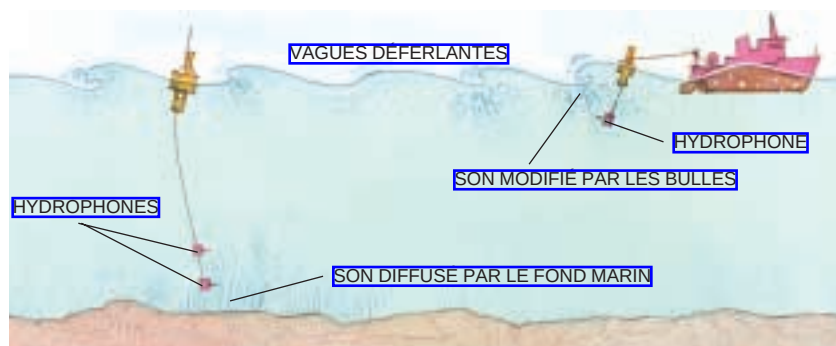
De nouvelles utilisations du bruit de fond

L'imagerie acoustique en son naturel n'est que l'une des techniques d'observation à distance fondées sur le bruit de fond dans les mers. Les océanographes ont récemment mis au point d'autres techniques semblables. Certains, par exemple, utilisent le bruit ambiant pour déterminer les propriétés acoustiques du fond de la mer et, dans une certaine mesure, sa composition. Dans les eaux peu profondes (moins de 200 mètres) des plateaux continentaux, le bruit est réfléchi par le fond de la mer. La façon dont le son est réfléchi indique la vitesse à laquelle les ondes se propagent dans le sol. On détermine ainsi la composition du fond, car le bruit se propage à des vitesses différentes dans les roches et dans le sable.

Pour réaliser ces mesures, on déploie une flotte de bouées auxquelles sont suspendus des hydrophones, ce qui permet de cartographier le fond de la mer au moyen du bruit ambiant. On cherche aujourd'hui si cette technique évite l'emploi de sonars, que l'on doit promener à la surface de la zone étudiée, afin d'enregistrer des échos.

Le bruit de fond révèle également des mécanismes qui se produisent en surface. Notamment, il indique la quantité de gaz atmosphérique que les océans absorbent. Les climatologues qui se préoccupent du réchauffement ont besoin de connaître la quantité de gaz échangée entre l'atmosphère et les océans. Le bruit ambiant peut les aider, car le déferlement des vagues, qui est le principal responsable du bruit ambiant, est également la principale cause des transferts gazeux de l'atmosphère dans l'océan. En amenant l'air dans l'eau, ce mécanisme crée une couche de bulles juste sous la surface. Ces bulles modifient le son des vagues déferlantes d'une manière caractéristique, dont la signature acoustique est détectée par l'hydrophone placé sous les bulles.

À partir d'une simple mesure acoustique, on prévoit la quantité d'air dans la couche de bulles et la profondeur à laquelle les bulles s'étendent. Ces deux quantités sont liées à la quantité de gaz qui pénètre dans l'océan. Des essais préliminaires montrent la faisabilité d'un tel système.



LE BRUIT DE FOND permet aussi bien de mesurer les propriétés acoustiques du fond de l'océan (à gauche) que la quantité de gaz absorbée par la mer (à droite).

Voir ou ne pas voir

Après les inévitables aléas des mises au point, nous avons utilisé ADONIS pour observer l'alignement de trois panneaux, qui formaient ainsi une cible horizontale, de un mètre de haut sur trois mètres de large, à une distance de 18 mètres d'ADONIS. Sur l'écran, nous vîmes apparaître une forme rectangulaire floue qui remplissait presque entièrement l'image elliptique (voir la figure 1). Nous contemplions la première image acoustique utilisant le bruit de fond.

Les plongeurs avaient placé une source sonore au centre de la cible pour nous aider à aligner ADONIS avec les panneaux, mais c'était inutile : nous pouvions repérer la cible uniquement grâce au bruit ambiant. Nous avons alors reculé la cible à 38 mètres d'ADONIS, c'est-à-dire aussi loin que nous le pouvions sans gêner le trafic portuaire. Nous craignions que les performances ne diminuent avec la distance, mais si la taille de la cible sur l'écran se réduisit, l'océan aux alentours formait un bel arrière-plan, qui faisait ressortir la cible rectangulaire de manière spectaculaire.

ADONIS pouvait-il détecter des objets mobiles? Un moteur hydraulique monté à l'intérieur du mât de support pouvait faire tourner le réflecteur sur lui-même, d'un tour en 12 minutes. Alors que le réflecteur sphérique tournait lentement, nous avons vu la cible apparaître sur un côté de l'écran, glisser vers le centre et disparaître de l'autre côté. C'était la preuve que nous pouvions créer des images animées.

Que se passerait-il enfin si l'on changeait la forme de la cible? Les plongeurs ont remplacé la cible en forme de barre par quatre panneaux, qui formaient une croix avec un trou carré de un mètre de côté au centre. Verrions-nous le trou à une distance de 38 mètres?

Les premières images brutes de la cible cruciforme étaient confuses. Nous voyions la forme de la croix, mais l'apparence du trou central fluctuait. Depuis lors, nous avons réexaminé les données et effectué quelques traitements informatiques. Il apparaît que le spectre de puissance du bruit – l'intensité du son aux différentes fréquences – peut servir de fonction discriminatoire. Or, nous l'avons vu, les fréquences correspondent aux couleurs. Ainsi nous identifions aisément les quatre coins vides et le trou de la cible cruciforme : les panneaux de la cible apparaissent d'une «couleur» différente de celle des régions vides, y compris le trou central. C'était comme si les panneaux étaient «rouges» et le trou «bleu». Aujourd'hui, nous explorons cette technique comme moyen de renforcement des images acoustiques.

Voir le monde marin

Ayant ainsi testé notre technique à l'aide de cibles fixes, nous avons augmenté la difficulté et cherché à suivre le déplacement d'orques dans le bassin extérieur du Parc marin de San

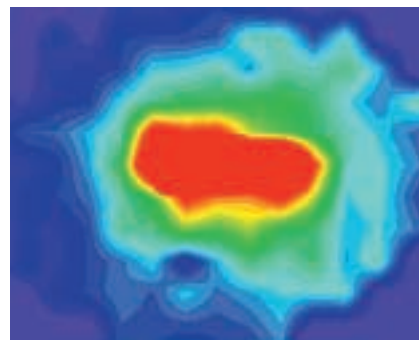
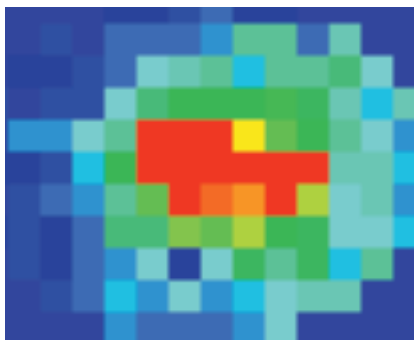
Diego. Simultanément, les biologistes du parc étudiaient leur réaction à la présence de cibles dans «leur» bassin ; les orques, semble-t-il, considèrent que tout objet placé dans le bassin leur appartient.

En février 1995, nous installions notre système dans le bassin, pendant que les orques y nageaient librement, nous portant autant d'attention que nous leur en portions. Prudents au début, ils se sont vite habitués au grand réflecteur sphérique. Les orques étaient curieuses de constater que, lorsqu'ils produisaient un cliquettement en face du réflecteur sphérique, le son leur était renvoyé plus intense en raison de son effet focalisant. Un jeune mâle, Splash, a poussé l'aventure plus loin, en prenant l'un des câbles d'électronique pleins de graisse dans sa bouche, pour le mâcher. Un autre animal a nagé rapidement vers le réflecteur sphérique

et a sauté par-dessus. Il fallait réagir : les entraîneurs ont transféré les orques dans un autre bassin, où ils pouvaient s'amuser avec leurs propres jouets en attendant que nous soyons prêts.

Après un faux départ (secoués durant le transport, tous les circuits électroniques du boîtier sous-marin étaient déconnectés), nous avons à nouveau mis l'appareil en marche, et les données ont commencé à affluer. Initialement, nous n'étions pas certains du résultat, car le bruit de fond dans le bassin pouvait être différent de celui de l'océan. Toutefois, nous avons observé que les pompes et autres machineries produisent un niveau sonore ambiant élevé, comparable à celui de l'océan.

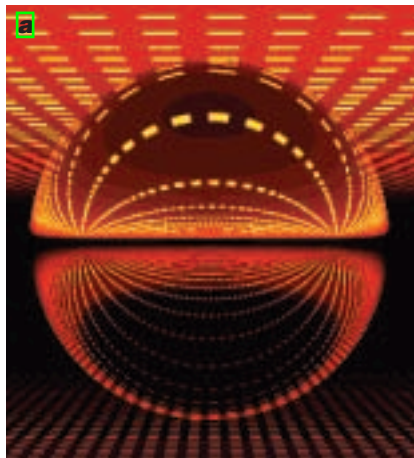
Alors que nous regardions les données brutes (c'est-à-dire sans renforcement de l'image), une forme vague s'afficha subitement sur l'écran : pen-



1. UNE CIBLE RECTANGULAIRE (à gauche) était vue par ADONIS comme une forme vaguement allongée et artificiellement colorée en rouge (en haut, à gauche). Chaque «pixel» représente le signal d'un hydrophone. Un traitement de l'image a amélioré celle-ci (à droite).



2. LES ORQUES du Parc marin de San Diego ont été détectés par ADONIS, le premier système d'imagerie acoustique utilisant le bruit de fond. Le réflecteur, avant son immersion, apparaît à droite de la photographie.



3. DES SIMULATIONS donnent un aperçu des possibilités de l'imagerie acoustique en son naturel. Ici on a calculé l'image que des systèmes complexes donneraient d'une sphère d'acier. On a supposé que le bruit ambiant proviendrait des vagues, représentées par des traits jaunes. Un système à 90 000 pixels donnerait une excellente résolution (a), mais il serait difficile à réaliser. Les images actuelles sont composées d'une centaine de pixels (b), mais on prévoit des systèmes qui formeront des images à 900 pixels (c).

dant les quelques secondes où elle resta visible, nous vîmes (de nos yeux) l'un des orques qui se déplaçait dans le champ de vision d'ADONIS. Durant cette période, les hydrophones et les entraîneurs ont confirmé que les orques eux-mêmes n'émettaient pas de sons, ce qui indiquait que les images que nous voyions résultaient du bruit de fond acoustique. Nous devons encore étudier les images des orques et les comparer avec les enregistrements vidéo que nous avons tournés simultanément pour confirmer que nous avons bien visualisé les orques, mais les observations préliminaires et l'expérience au large de la Californie nous rendent confiants.

Plusieurs applications de l'imagerie acoustique en son naturel sont envisageables. La technique pourrait notamment être utilisée pour la détection des mines sous-marines qui explosent à la réception d'un signal sonar. Elle pourrait également donner une «vision sonore» à des automates sous-marins qui, contournant les obstacles, permettraient, sans opérateur humain, de contrôler la structure des plates-

formes pétrolières. Indétectable, cette technique d'imagerie acoustique est adaptée au contrôle des ports. De même, l'absence d'interférences sonores avec les mammifères marins permettrait des dénombrements qui ne perturberaient pas le comportement des animaux. Du reste, on peut se demander si ces mammifères utilisent l'imagerie acoustique en son naturel.

Des progrès sont attendus. Au cours de récents essais, ADONIS a distingué, d'après leur couleur acoustique, des objets flottants : bouées en plastique, sphères en titane ou barils en polychlorure de vinyle qui contenaient du sable mouillé et de la mousse. Des analyses préliminaires laissent prévoir que ces barils pourront être vus même au fond de la mer.

Nous en sommes à un stade qui rappelle celui des premiers jours de la télévision : ce qui est important, ce n'est pas la qualité de l'image, mais le fait que des images existent. Au cours des mois à venir, nous remplacerons le réflecteur sphérique par un réseau à commande de phase constitué d'un millier d'hydrophones. Simultanément nous mettrons au point des algorithmes spécialisés pour renforcer les images et assurer la reconnaissance automatique de l'image. Nous espérons ainsi améliorer la qualité des images acoustiques, et donner aux successeurs d'ADONIS la possibilité d'être les caméras sous-marines du futur.

Michael BUCKINGHAM est professeur d'acoustique à l'Institut Scripps de La Jolla, où Chad EPIFANIO est chercheur. John POTTER est directeur du Laboratoire d'acoustique de l'Université de Singapour.

Michael J. BUCKINGHAM, Broderick V. BERKHOUT et Stewart A.L. GLEGG, *Imaging the Ocean with Ambient Noise*, in *Nature*, vol. 356, pp. 327-329, 26 mars 1992.

Michael J. BUCKINGHAM, *Theory of Acoustic Imaging in the Ocean with Ambient Noise*, in *Journal of Computational Acoustics*, vol. 1, n° 1, pp. 117-140, mars 1993.

John R. POTTER, *Acoustic Imaging Using Ambient Noise : Some Theory and Simulation Results*, in *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, n° 1, pp. 21-33, janvier 1994.

Michael J. BUCKINGHAM et John R. POTTER, *Acoustic Daylight Imaging : Vision in the Ocean*, in *GSA Today*, vol. 4, n° 4, pp. 97-102, avril 1994.

Télomères, télomérase et cancer

CAROL GREIDER • ELIZABETH BLACKBURN

La télomérase est une enzyme qui agit sur les extrémités des chromosomes. Détectée dans de nombreux cancers humains, elle serait une cible nouvelle pour les traitements anticancéreux.

« Il ne faut point juger des gens sur l'apparence », rappelle La Fontaine à propos du paysan du Danube ; il ne faut juger ni des animaux ni des choses. Certains cailloux, au fond de l'eau, se révèlent être des poissons vénéneux ; des insectes carnivores à l'affût d'une proie prennent l'apparence de jolies fleurs. Même des composants cellulaires ont parfois une apparence trompeuse. Ainsi les extrémités des chromosomes, que l'on a longtemps crues immuables, s'allongent ou raccourcissent sans cesse dans la plupart des organismes.

Au cours des 15 dernières années, les études de ces variations de longueur ont révélé l'existence d'une enzyme, la télomérase, qui favoriserait le développement de nombreux cancers chez l'homme. Des médicaments qui inhiberaient cette enzyme feraient peut-être régresser plusieurs de ces cancers. Simultanément les biochimistes ont trouvé une relation entre la longueur des télomères et le vieillissement : les variations de cette longueur joueraient un rôle dans le vieillissement des cellules humaines.

On s'intéresse aux télomères et à la télomérase depuis les expériences réalisées dans les années 1930 par Barbara McClintock, à l'Université de Columbia, et par Herman Muller, à l'Université d'Édimbourg. Ces deux chercheurs, qui étudiaient séparément des organismes différents, ont compris qu'un élément particulier assurait la stabilité de l'extrémité des chromosomes. H. Muller inventa le mot «télomère», à partir des mots grecs signifiant

«la fin» (*telos*) et «la partie» (*meros*). B. McClintock observa qu'en l'absence de ces éléments terminaux les chromosomes fusionnent, changent de structure et présentent diverses anomalies, ce qui menace la fiabilité de la réplication des chromosomes, ainsi que la survie des cellules qui les contiennent.

C'est seulement dans les années 1970 que l'on a déterminé la composition exacte des télomères. En 1978, nous avons montré que les télomères de *Tetrahymena*, un organisme unicellulaire cilié, fréquent dans les mares, ne sont composés que d'une séquence de nucléotides simple et très courte – TTGGGG – qui se répète plusieurs fois (les nucléotides sont les briques constitutives de l'ADN ; on les désigne généralement par une lettre qui représente la base chimique qui caractérise chaque nucléotide ; ainsi, pour les nucléotides T, la base est la thymine, et pour les nucléotides G, c'est la guanine).

Depuis notre travail, de nombreux biologistes ont caractérisé les télomères de divers animaux, de plantes et de micro-organismes. Dans la plupart des cas, les télomères ont de petites sous-unités répétées, souvent riches en nucléotides T et G. Ainsi, les télomères de l'homme et de la souris ont une séquence caractéristique TTAGGG, et les vers de terre une séquence TTAGGC (A et C désignent respectivement les nucléotides nommés adénine et cytosine).

La découverte de la télomérase a permis aux biologistes de résoudre une énigme ancienne : comment l'ADN se réplique-t-il à ses extrémités ? Au début des années 1980, on avait montré que,

pour une raison inconnue, le nombre des sous-unités répétées des télomères varie selon les organismes, selon les cellules d'un même organisme et même selon l'âge des cellules (toutefois, chaque espèce a ses caractéristiques : chez *Tetrahymena*, le nombre moyen de répétitions dans chaque télomère est égal à 70 ; chez l'homme, il est égal à 2 000). Pourquoi ces variations ?

À la recherche de la télomérase

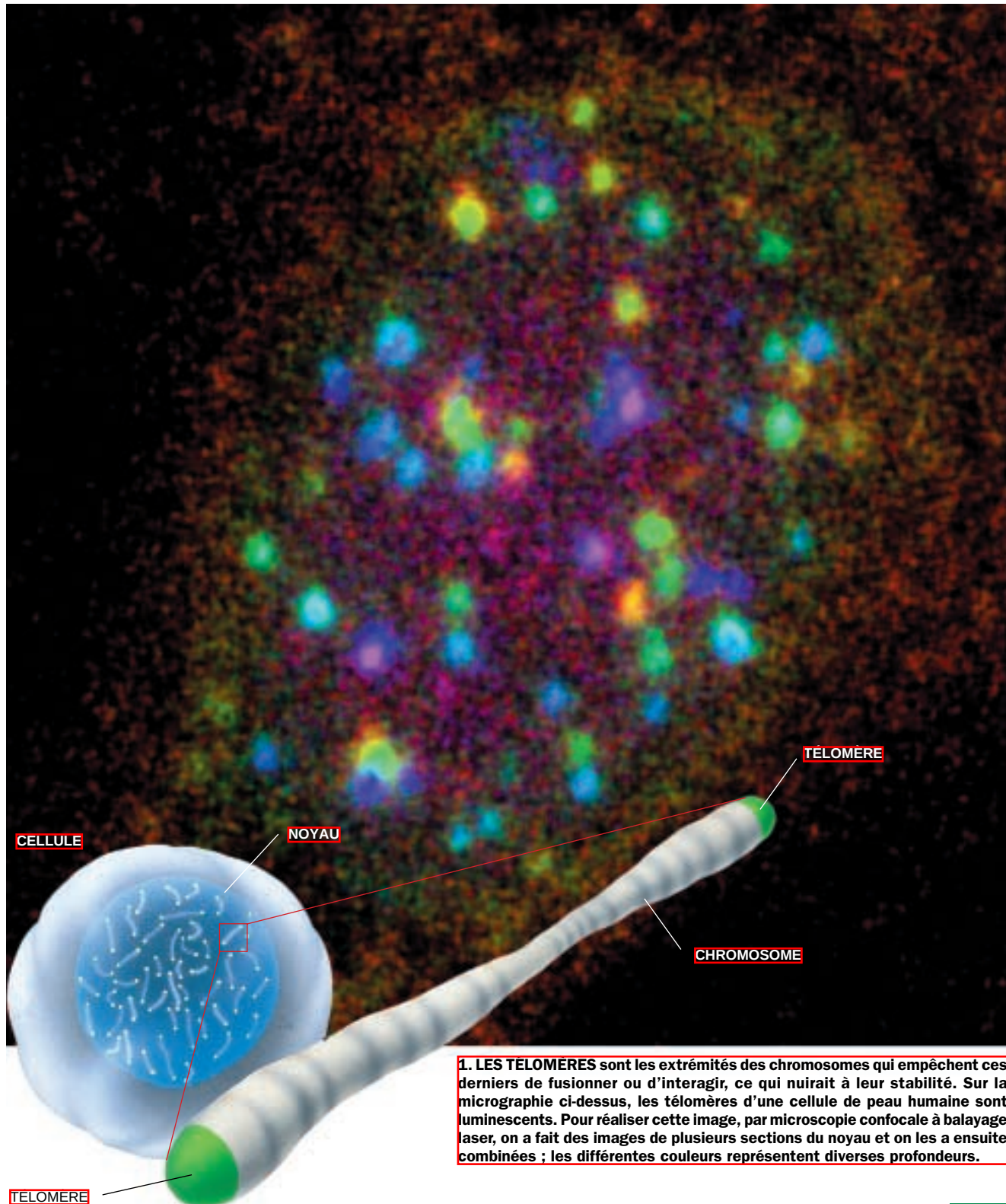
Les cellules qui se divisent doivent reproduire tous leurs gènes en deux exemplaires, de façon que chaque cellule fille reçoive un lot complet de gènes. Si le bagage héréditaire était incomplet, les cellules filles ne fonctionneraient pas correctement et mourraient, car les gènes, constitués de séquences de nucléotides, servent à fabriquer l'ARN et les protéines, les molécules qui assurent les fonctions cellulaires. Dans un chromosome, les gènes sont répartis sur la molécule d'ADN, limitée par les deux télomères.

En 1972, à l'Université Harvard, James Watson constata que les ADN polymérases, les enzymes qui assurent la réplication de l'ADN, ne recopient pas les chromosomes jusqu'aux extrémités : elles omettent de copier une petite région, un fragment du télomère. Si les cellules ne compensaient cet «oubli», les chromosomes raccourciraient à chaque division cellulaire et, en quelques générations, les télomères des gènes essentiels seraient réduits : ce serait la fin de la lignée cellulaire

concernée. À l'évidence, toutes les espèces unicellulaires qui subissent ce raccourcissement télomérique le compensent, sinon elles seraient éteintes depuis longtemps. C'est aussi le cas des cellules germinales (les pré-curseurs des spermatozoïdes et des ovules), qui assurent la reproduction des organismes pluricellulaires. Comment leurs télomères sont-ils protégés?

La fluctuation de longueur des télomères apparut comme un signe que les cellules tentent de la maintenir à peu près constante : elle diminue effectivement au cours de la division cellulaire, mais elle est parfois augmentée par ajout de nouvelles sous-unités télomériques. Aussi a-t-on soupçonné qu'une enzyme inconnue était douée d'une capacité dont les ADN polymé-

rases normales étaient dépourvues. Lorsque les cellules recopient leurs chromosomes, constitués de deux brins d'ADN enroulés l'un autour de l'autre, elles commencent par dissocier cette double hélice en séparant les deux brins. Les polymérases utilisent chacun de ces brins «parentaux» comme matrice, ou modèle, pour synthétiser un brin fils complémentaire nouveau.



L'enzyme inconnue que recherchaient les biochimistes devait être capable de prolonger des brins d'ADN, sans recopier un modèle préexistant.

En 1984, nous avons élaboré un protocole pour chercher cette hypothétique télomérase. Nous l'avons bientôt trouvée : en mélangeant des télomères synthétiques et des extraits cellulaires de *Tetrahymena*, nous avons constaté que les télomères acquéraient des sous-unités supplémentaires : l'enzyme que l'on recherchait était présente dans les cellules de *Tetrahymena*.

Comme toutes les polymérases et presque toutes les enzymes, la télomérase est une protéine, mais elle a une particularité : elle contient un segment d'ARN qui sert de modèle à la fabrication des sous-unités télomériques. La télomérase dispose son ARN contre l'extrémité d'un brin d'ADN, de sorte que le modèle soit adjacent à cette extrémité. Elle ajoute alors, un à un, les nucléotides d'ADN jusqu'à ce qu'une sous-unité télomérique soit achevée. Puis elle glisse jusqu'à la nouvelle extrémité du chromosome et répète les opérations.

Télomérase et vieillissement

Ulérieurement, plusieurs groupes ont trouvé des télomérases chez d'autres micro-organismes ciliés, chez la levure, le crapaud et la souris. En 1989, à l'Université Yale, Gregg Morin en trouva également une dans une lignée de cellules cancéreuses humaines, c'est-à-dire dans des cellules malignes maintenues en culture pendant plusieurs générations. Aujourd'hui, on sait que presque tous les organismes dont les cellules ont un noyau possèdent une télomérase. Sa composition chimique varie selon les espèces, et l'ARN modèle permettant la fabrication des sous-unités télomériques ajoutées est spécifique de l'espèce.

La télomérase est essentielle chez de nombreux organismes unicellulaires : ces organismes sont immortels, car, à moins d'accidents ou d'anomalies génétiques acquises, ils se divisent indéfiniment, à condition que la télomérase soit fonctionnelle. Lorsque l'enzyme est anormale, les télomères raccourcissent et les cellules meurent (cela a été montré pour *Tetrahymena* et pour des levures).

Quel est le rôle de la télomérase dans l'organisme humain, bien plus complexe que *Tetrahymena* ou que la levure ? On constate avec étonnement que de

nombreuses cellules humaines sont dépourvues de télomérase. Jusque dans les années 1960, on pensait que les cellules humaines, capables de se diviser, pouvaient se multiplier indéfiniment. Puis Leonard Hayflick et ses collaborateurs de l'Institut Wistar montrèrent qu'il n'en était rien : en culture, des cellules somatiques (toutes les cellules, à l'exception des cellules de la reproduction) se divisent 80 à 90 fois lorsqu'elles proviennent de nou-

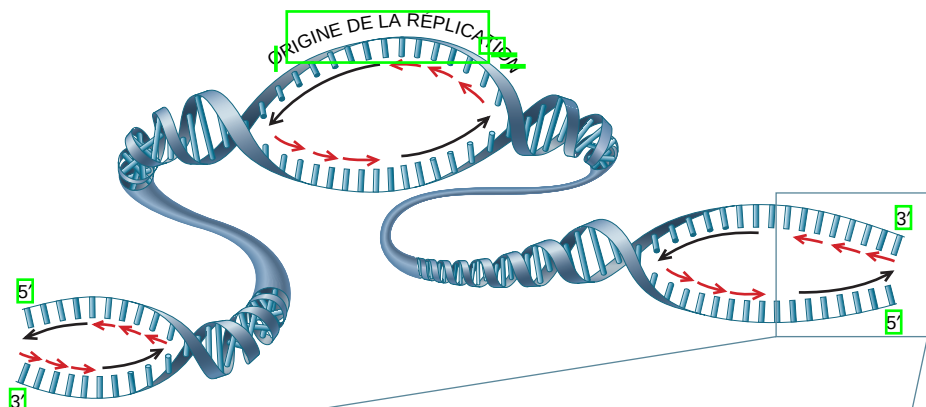
veau-nés, mais 20 à 30 fois seulement quand elles sont prélevées sur un septuagénaire. Des cellules humaines qui cessent de se reproduire deviennent sénescences : elles changent d'aspect, leurs fonctions se détériorent et, au bout de quelque temps, elles meurent.

Dans les années 1970, le biologiste soviétique A. Olovnikov supposa que cet arrêt programmé de la division cellulaire était lié aux anomalies de réplification des télomères : les cellules

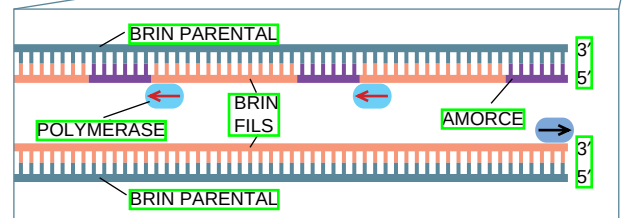
La répllication des extrémités

Les mécanismes de répllication des chromosomes n'assurent pas complètement leur tâche : ils ne répliquent pas les extrémités des chromosomes. Une fois les deux brins « parentaux » de l'ADN chromosomique séparés, des enzymes nommées ADN polymérases les recopient, mais l'une des deux extrémités de chaque « brin fils » est trop courte (il s'agit de l'extrémité nommée 5'). Quand les cellules ne compensent pas ce défaut de répllication, les chromosomes raccourcissent inexorablement. Pour résoudre cette difficulté, on envisagea, au début des années 1980, l'existence de la télomérase, une enzyme qui prolonge les télomères.

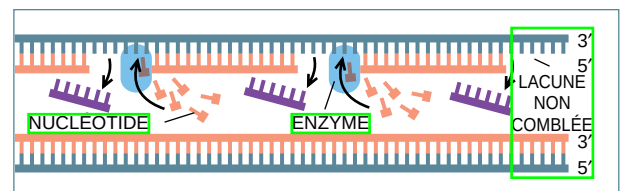
- 1 La copie de l'ADN chromosomique commence au centre, là où les brins parentaux se séparent. La synthèse de chaque brin fils est continue (les flèches noires) d'un côté, et discontinue (les flèches rouges) de l'autre.



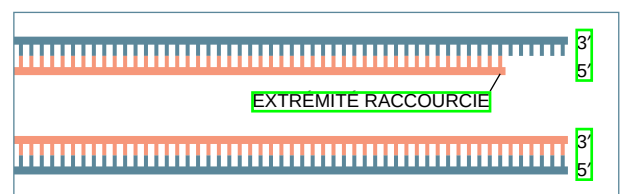
- 2 Les brins parentaux séparés servent de modèles aux polymérases qui synthétisent les brins fils. L'assemblage se fait à partir de fragments d'ARN nommés amorces.



- 3 D'autres enzymes enlèvent les amorces et remplissent les lacunes entre fragments adjacents.



- 4 Ces enzymes ne comblent pas la lacune qui persiste à l'extrémité 5' des brins fils.



somatiques humaines ne corrigeraient pas le raccourcissement chromosomique qui survient au cours de la réplication de l'ADN, et la division n'aurait plus lieu dès que les cellules reconnaîtraient que les chromosomes sont devenus trop courts.

Informées de cette hypothèse en 1988, nous avons cherché si les chromosomes humains raccourcissent au cours du temps. Rapidement on a observé que la plupart des cellules

somatiques perdent des segments télomériques au cours des divisions cellulaires, ce qui indique que la télomérase n'est pas active. En outre, dans certains tissus humains normaux, les télomères raccourcissent avec le vieillissement (en revanche, les télomères des cellules de la reproduction restent intacts). Ainsi les cellules humaines «compteraient» leurs divisions d'après le nombre de répétitions télomériques perdues ; elles cesseraient de se diviser dès que la longueur des télomères serait inférieure à une valeur critique. Toutefois, cette hypothèse n'a pas encore été validée.

Le raccourcissement des télomères et la perte de la capacité de multiplication des cellules sont-ils parmi les causes du vieillissement chez l'homme ? Ce n'est probablement pas la cause principale, car les cellules peuvent se reproduire plus qu'il n'est nécessaire dans toute une vie. En revanche, le fonctionnement d'un organisme âgé risque d'être compromis par la sénescence de certaines cellules : une plaie, par exemple, cicatriserait moins vite si le nombre de cellules capables de renouveler la peau à l'endroit de la lésion était insuffisant, et si la diminution du nombre de certains globules blancs rendait inefficaces les réactions immunitaires. De surcroît, on sait que l'athérosclérose apparaît aux endroits où les parois des vaisseaux sanguins sont endommagées : on suppose que les cellules situées dans des zones lésées sans relâche finissent par épuiser leur capacité répliquative, de sorte que les vaisseaux ne remplacent plus les cellules perdues ; les lésions persisteraient et l'athérosclérose s'installerait.

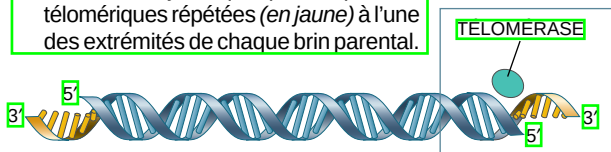
Certains biologistes pensent que la perte de la capacité répliquative observée sur les cellules humaines dépourvues de télomérase ne servirait pas à nous faire vieillir, mais plutôt à éviter le cancer. Un

cancer survient quand une cellule a accumulé assez de mutations génétiques pour échapper aux contrôles normaux de la réplication et de la migration. La cellule et sa descendance prolifèrent alors de façon anarchique, elles envahissent les tissus voisins et les endommagent. Certaines s'échappent parfois de la tumeur formée, migrant vers des tissus éloignés, où elles sont à l'origine de tumeurs secondaires nommées métastases. L'absence de télomérase devrait retarder la croissance tumorale, puisque les cellules qui se divisent en permanence perdent leurs télomères et finissent par disparaître avant de causer trop de dommages. Au contraire, des cellules cancéreuses pourvues de télomérase conserveraient leurs télomères et survivraient indéfiniment.

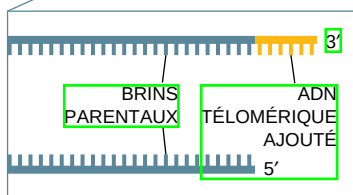
Le rôle de la télomérase

La télomérase semble ajouter de l'ADN aux chromosomes avant le début de la réplication. Cet ADN est composé d'une ou de plusieurs sous-unités télomériques, de courtes séquences nucléotidiques répétées de nombreuses fois dans les télomères. Cet ajout garantit qu'un brin fils est au moins aussi long que le brin parental dont il est issu ; la longueur des chromosomes étant quasi constante, les cellules continuent à se diviser.

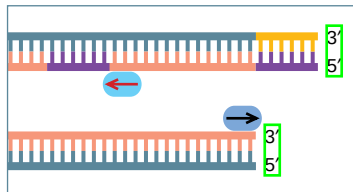
1 Avant le début de la réplication, la télomérase ajoute quelques séquences télomériques répétées (en jaune) à l'une des extrémités de chaque brin parental.



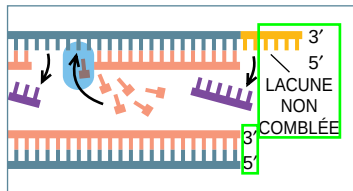
2 Les brins parentaux se séparent.



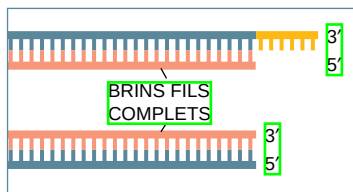
3 La synthèse des brins fils se déroule de façon classique.



4 Les amorces sont retirées, les lacunes comblées.



5 Les brins-fils ne sont pas plus courts que les brins parentaux d'origine (en gris).



Télomérase et cancer

On s'interrogea sur le rôle de la télomérase dans les cancers humains dès 1990, mais c'est seulement en 1994 que Christopher Counter, Silvia Bacchetti, C. Harley et leurs collègues de l'Université McMaster montrèrent que la télomérase reste active dans des lignées de cellules cancéreuses cultivées en laboratoire et dans des tumeurs ovariennes humaines, *in vivo*. Plusieurs équipes ont ensuite trouvé de la télomérase active dans 90 des 101 prélèvements de tumeurs humaines examinés (correspondant à 12 types de tumeurs) ; en revanche, aucun des 50 échantillons de tissus somatiques sains analysés n'en contenait (ces prélèvements correspondaient à quatre types de tissu). Autrement dit, la télomérase est activée dans les cellules qui prolifèrent sans contrôle.

D'autre part, on comprit pourquoi les cellules tumorales humaines ont des télomères beaucoup plus courts que les cellules du tissu sain environnant : après avoir fait produire par des cellules humaines normales une protéine virale qui leur fait ignorer les signaux de fin de division, plusieurs équipes observèrent que les cellules traitées continuaient à proliférer alors qu'elles auraient dû devenir sénescents. Dans la plupart des cellules, les télomères raccourcissaient notablement, et l'on ne détectait pas de télomérase ; les cellules finissaient par mourir, à l'exception de quelques-unes qui survivaient et devenaient immortelles. Les survivantes avaient des télomères très courts et contenaient une télomérase.

Ainsi les cellules cancéreuses ont-elles de petits télomères, car elles ne commencent à synthétiser la télomérase qu'après avoir commencé à proliférer : elles perdent d'abord un nombre notable de sous-unités télomériques, puis l'enzyme, activée, stabilise les télomères raccourcis, et ces cellules deviennent immortelles. L'ensemble des observations a conduit à une théorie que l'on cherche aujourd'hui à confirmer. On pense que, chez l'embryon en déve-

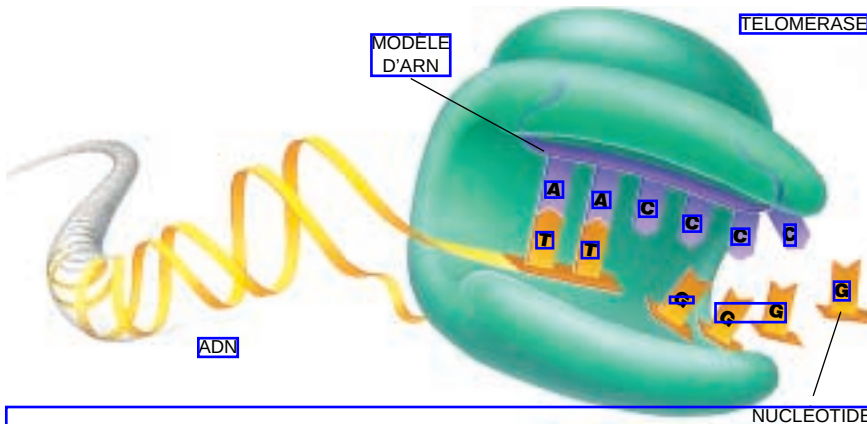
loppement, les cellules de la lignée germinale fabriquent de la télomérase. Lorsque le développement est achevé, de nombreuses cellules somatiques cessent de produire l'enzyme, et les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire. Quand la longueur des télomères atteint une taille critique, un signal bloque la division des cellules.

Au contraire, quand les mutations génétiques associées au cancer bloquent l'émission de ces signaux de sécurité

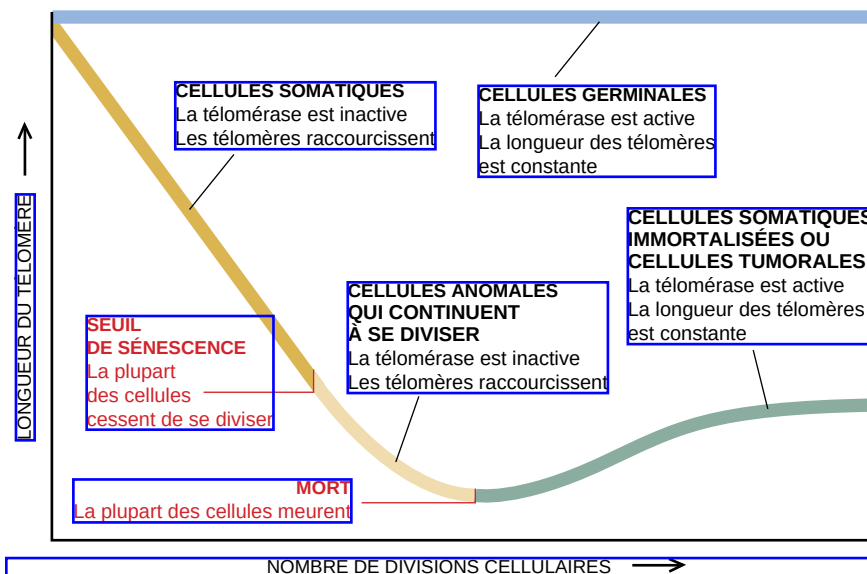
ou permettent aux cellules de les ignorer, la multiplication cellulaire se poursuit au-delà de la sénescence. Les cellules continuent vraisemblablement à perdre des séquences télomériques et à subir des altérations chromosomiques qui favorisent la survenue de nouvelles mutations potentiellement cancérogènes. Les cellules ne meurent qu'au moment où les télomères disparaissent totalement (ou presque).

Si les réarrangements génétiques déclenchent la fabrication de télomérase, les cellules ne perdent pas complètement leurs télomères, puisqu'ils sont sans arrêt réparés et entretenus ; ces cellules génétiquement anormales acquièrent l'immortalité caractéristique des cellules cancéreuses.

Différents résultats étayaient cette théorie, bien que certaines tumeurs soient dépourvues de télomérase et que certaines cellules somatiques (notamment les globules blancs nommés macrophages et lymphocytes) en fabriquent. Quoi qu'il en soit, la télomérase semble indispensable à la multiplication sans fin de la plupart des cellules tumorales.



2. LA TÉLOMÉRASE est une enzyme qui contient un segment d'ARN (en violet), à partir duquel elle fabrique l'ADN télomérique. Sur ce schéma, l'enzyme ajoute la séquence **TTGGGG** (en jaune) à un chromosome du micro-organisme unicellulaire *Tetrahymena*. La télomérase ajoute les nucléotides qui sont « complémentaires » de ceux du modèle : la thymine (T) en face de l'adénine (A), et la guanine (G) en face de la cytosine (C).



3. LA LONGUEUR DES TÉLOMÈRES HUMAINS est invariable dans les cellules germinales (les cellules de la reproduction), car celles-ci contiennent la télomérase, qui allonge les télomères à mesure qu'ils se raccourcissent, lors des divisions cellulaires (courbe bleue). Au contraire, de nombreuses cellules somatiques (toutes les cellules à l'exception des cellules germinales) sont vraisemblablement dépourvues de télomérase, de sorte que leurs télomères raccourcissent à chaque division (en brun). La plupart des cellules somatiques finissent par vieillir : elles cessent de se diviser et subissent diverses transformations. Toutefois, certaines cellules aberrantes (en beige) continuent à se diviser. Elles finissent par perdre la quasi-totalité de leurs sous-unités télomériques répétées, cessent de se diviser et meurent. Quand ces cellules anormales réussissent à fabriquer de la télomérase, elles peuvent se diviser indéfiniment (en vert). Cette propriété, qu'acquièrent de nombreuses cellules tumorales, est l'immortalité cellulaire.

De nouveaux traitements du cancer

La télomérase, présente dans différents cancers humains et absente de la plupart des cellules normales, semble être une cible de choix pour les médicaments anticancéreux. Les substances qui inhiberaient la télomérase anéantiraient les cellules tumorales sans perturber le fonctionnement des cellules saines, parce qu'elles permettraient aux télomères de raccourcir (la plupart des traitements dont on dispose aujourd'hui s'attaquent autant aux cellules malignes qu'aux cellules normales, et sont souvent toxiques). De plus, ces médicaments seraient efficaces contre divers types de tumeurs, puisque la télomérase y est généralement présente.

Les laboratoires pharmaceutiques et biotechnologiques explorent cette nouvelle voie de recherche, mais plusieurs questions restent ouvertes. On a déjà identifié quelques cellules saines qui fabriquent de la télomérase ; en existe-t-il d'autres ? Quelle est l'importance de l'enzyme pour ces cellules ? Cette dernière question est importante, car si la télomérase est indispensable à leur fonctionnement, des substances qui inhiberaient l'enzyme leur seraient toxiques. Toutefois, on peut imaginer

La fin d'un dogme

La perspective d'utiliser des drogues antitélomérases pour traiter le cancer est séduisante, à condition que les biologistes démontrent que la télomérase est effectivement indispensable à la multiplication sans fin des cellules tumorales.

Or, Roger Reddel et ses collègues de l'Université de Sidney ont récemment montré que 15 des 35 lignées cellulaires établies *in vitro* qu'ils étudiaient étaient immortelles sans qu'ils puissent détecter d'activité télomérase. Et pourtant, ces lignées télomérase-négatives ont des télomères très longs, plus longs que les cellules normales. De plus, avec John Murnane, de l'Université de San Francisco, nous avons suivi l'évolution de la longueur des séquences télomériques et de l'instabilité chromosomique dans des clones d'une lignée télomérase-négative. Nous avons montré la grande hétérogénéité de la taille des séquences télomériques et l'importance de l'instabilité chromosomique qui en résultait : même en l'absence apparente de télomérase, certains télomères étaient beaucoup plus longs que dans les cellules normales.

On ignore encore comment, dans ces lignées télomérase-négatives, la taille des télomères est maintenue ou allongée. Plusieurs hypothèses sont avancées : la télomérase agirait, mais de façon fugace ; la télomérase

serait mutée et perdrait le contrôle de la longueur des télomères ; des mécanismes de recombinaison, dont l'existence a été montrée dans la levure, compenseraient par transfert de fragments chromosomiques le raccourcissement des télomères ; enfin, des éléments transposables, des fragments d'ADN qui « sautent » d'un endroit à l'autre d'un chromosome, compenseraient la perte de sous-unités télomériques.

Ces résultats remettent en cause le dogme selon lequel la télomérase est indispensable pour conférer leur immortalité aux cellules cancéreuses.

Si ces mécanismes de compensation existent *in vivo*, des drogues antitélomérase seraient bénéfiques au début du traitement, car elles élimineraient les cellules cancéreuses synthétisant de la télomérase. Au bout de quelque temps, ne resteraient que les cellules tumorales ne fabriquant pas de télomérase et auxquelles les longs télomères confèreraient un potentiel de divisions cellulaires notablement supérieur à celui des cellules normales. Les drogues antitélomérase risqueraient de sélectionner des cellules tumorales se divisant de nombreuses fois, c'est-à-dire accumulant les mutations potentiellement dangereuses : elles auraient un pouvoir malin supérieur.

Laure SABATIER – CEA

Département de radiobiologie et de radiopathologie

que les substances inhibitrices de la télomérase détruiraient les cellules cancéreuses bien avant les cellules saines, puisque leurs télomères sont plus courts dans certaines tumeurs.

On devra également démontrer que l'inhibition de la télomérase détruit effectivement les tumeurs qui produisent l'enzyme. En septembre 1995, nous avons montré qu'un inhibiteur de la télomérase provoque effectivement un raccourcissement des télomères de cellules tumorales en culture ; les cellules meurent au bout de 25 divisions environ. Malheureusement, ces cellules compensent parfois la perte de télomérase en réparant les extrémités raccourcies par un mécanisme de recombinaison, par exemple (un chromosome prélève de l'ADN sur un autre chromosome). Si ces mécanismes de compensation sont fréquents dans les tumeurs humaines, les substances visant la télomérase ne pourront traiter efficacement les cancers.

Les études animales nous aideront à répondre à ces questions. Elles montreront également si des inhibiteurs de la télomérase éliminent des tumeurs et s'ils agissent suffisamment rapidement pour que les tissus sains ne soient pas lésés.

Pour mettre au point des inhibiteurs de la télomérase, on devra également comprendre comment agit l'enzyme. Comment se lie-t-elle à l'ADN ? Comment « décide »-t-elle du nombre de sous-unités télomériques à ajouter ? L'ADN du noyau est soumis à l'action de diverses protéines, notamment à celles qui s'associent aux télomères ; comment ces protéines commandent-elles l'activité de la télomérase ? Leur inhibition modifierait-elle la longueur des télomères ?

Les recherches sur les télomères devraient avoir d'autres applications, en thérapie génique par exemple. Cette méthode consiste à prélever des cellules sur un patient, à y insérer le gène thérapeutique, puis à réinjecter au malade les cellules corrigées génétiquement. Cette méthode reste délicate, car les cellules se développent difficilement en culture. L'adjonction de télomérase, seule ou associée à divers facteurs, augmenterait la capacité répliquative des cellules cultivées, de sorte que l'on pourrait réinjecter au patient davantage de cellules corrigées.

La recherche sur les télomères a considérablement progressé depuis la découverte des premières sé-

quences répétées aux extrémités des chromosomes de *Tetrahymena*. L'élongation des télomères par la télomérase, qui semblait initialement une petite astuce permettant à quelques êtres unicellulaires de maintenir la longueur de leurs chromosomes, s'est révélée bien plus importante qu'on ne le croyait. Pour la plupart des animaux, la télomérase permet aux cellules nucléées de protéger les segments terminaux des chromosomes, et l'étude de cette « astuce » aboutira peut-être à des traitements anticancéreux efficaces.

Carol GREIDER est biologiste moléculaire au Laboratoire Cold Spring Harbor. Elizabeth BLACKBURN dirige le Département de microbiologie et d'immunologie de l'Université de San Francisco.

G.L. YU, J.D. BRADLEY, L.D. ATTARDI et E.H. BLACKBURN, *In Vivo Alteration of Telomere Sequences and Senescence Caused by Mutated Tetrahymena Telomerase RNAs*, in *Nature*, vol. 344, pp. 126-132, 8 mars 1990.

Telomeres, sous la direction de E.H. Blackburn et C.W. Greider, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1995.

Des explosions au cœur des galaxies

SYLVAIN VEILLEUX • GERALD CECIL • JONATHAN BLAND-HAWTHORN

Les flots de gaz brûlants qui s'échappent du centre des galaxies proches seraient à l'origine des étoiles et du milieu intergalactique.

A lors que des millions de galaxies luisent grâce à la lumière combinée de leurs milliards d'étoiles, certaines seulement ont un noyau central dont l'éclat est prépondérant. Ces noyaux sont trop petits pour que les télescopes, même les plus puissants, en révèlent la structure, mais des débris des colossales explosions dont ils sont le siège apparaissent parfois en dehors du cœur compact où elles se produisent. Ces débris, des gaz chauffés à des millions de degrés, sont éjectés suffisamment loin des noyaux galactiques pour être visibles de la Terre.

Les traînées de cette matière surchauffée, dans le gaz et la poussière interstellaires, nous renseignent sur la nature et sur l'histoire des forces à l'œuvre au sein des noyaux galactiques. Aujourd'hui, les astrophysiciens identifient les moteurs de ces phénomènes et les effets de leurs gigantesques flots sur l'évolution des galaxies.

De surcroît, ces cataclysmes, qui ont commencé très tôt dans l'histoire de l'Univers, ont contribué à forger l'environnement où a évolué la Voie lactée. L'étude de ces événements pourrait éclairer la répartition des éléments chimiques dans notre Galaxie, cruciale pour comprendre la formation des planètes et l'existence de la vie.

Les astrophysiciens ont proposé deux mécanismes différents pour expliquer l'origine de ces noyaux actifs de galaxies. Le premier est l'œuvre de Martin Rees, de l'Université de Cambridge, et de Roger Blandford, de l'Institut de technologie de Californie. Au début des années 1970, tous deux cherchaient à expli-

quer la forte luminosité des quasars (des milliers de fois celle de la Voie lactée), ainsi que l'origine des «jets radio» spectaculaires qui proviennent de ces objets lointains, donc jeunes : noyaux de galaxies hyperactives, les quasars émettent des jets de matière (visibles dans le domaine radio) qui s'étendent sur des millions d'années-lumière autour des noyaux. M. Rees et R. Blandford supposèrent qu'un

trou noir massif, guère plus grand que le Soleil mais un million de fois plus massif, fournissait à un quasar l'énergie nécessaire à ces émissions de matière.

Les trous noirs n'émettent pas de lumière, mais ils attirent un disque de gaz qui s'échauffe en tombant sur du gaz plus dense. La partie interne du disque, plus chaude, produit des photons dans une large



1. LA GALAXIE MESSIER 82, située à plusieurs millions d'années-lumière de la Terre (a, b), laisse échapper du gaz incandescent de la région proche de son noyau (c). Les astrophysiciens en ont déduit qu'une intense formation d'étoiles à proximité du noyau est responsable de ce bouleversement. L'échauffement et l'émission (de rayons X, en particulier) qui en découlent évacuent le gaz et la poussière du disque galactique. L'activité de la galaxie peut avoir été déclenchée par l'interaction avec sa voisine, la galaxie Messier 81.

bande de fréquence, de l'ultraviolet jusqu'aux rayons X. Une partie de ces photons est absorbée par le gaz environnant, qui émet à son tour de la lumière visible et des ultraviolets. Dans les années qui suivirent la formulation de l'hypothèse de M. Rees et R. Blandford, les astrophysiciens ont compris que l'énergie des galaxies actives les plus proches provenait de trous noirs possédant de tels disques d'accrétion.

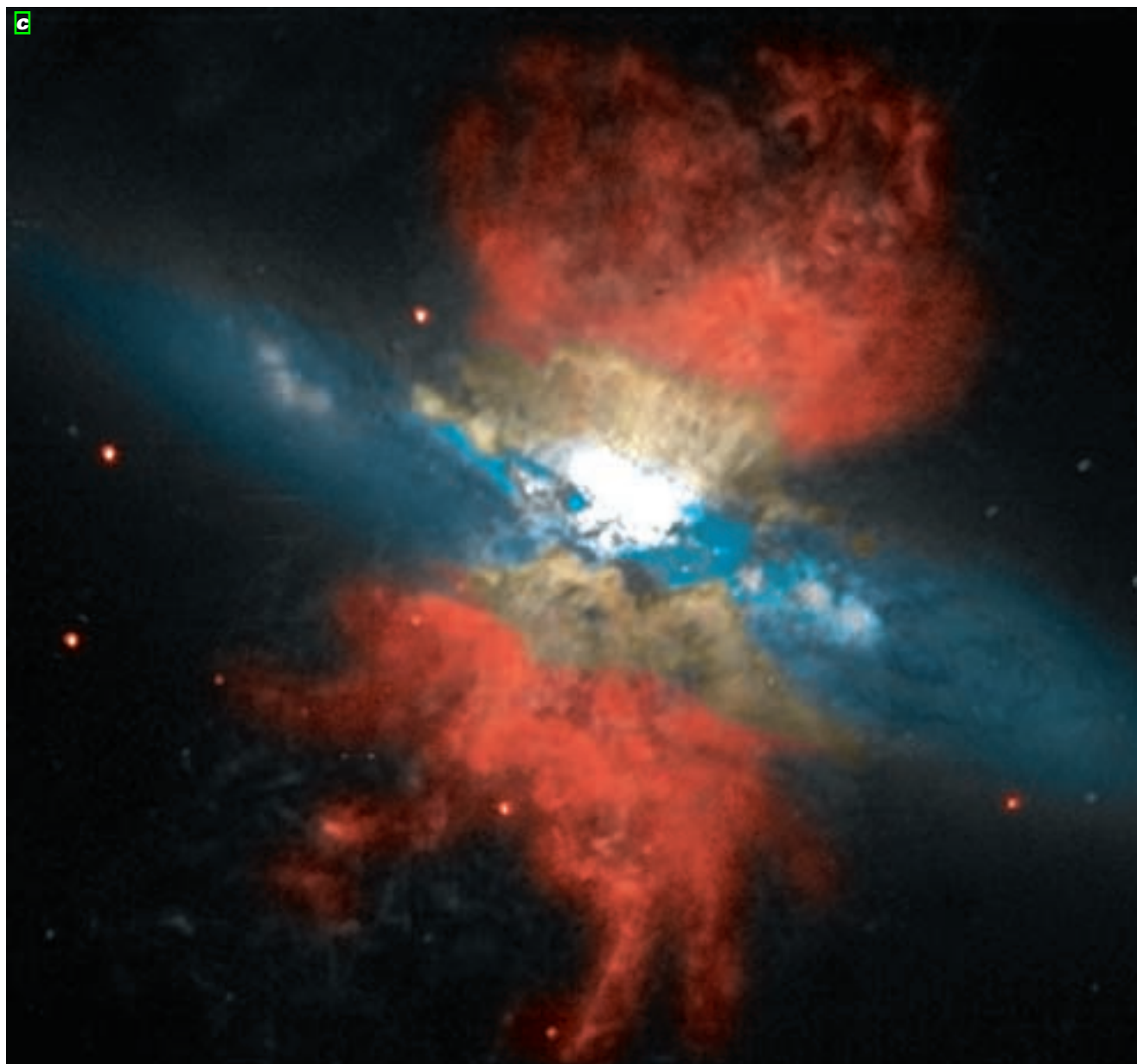
À mesure que le disque s'échauffe, le gaz avoisinant est chauffé à des températures de plusieurs millions de degrés. En se dilatant, il s'éloigne rapidement du noyau galactique. Ce flot de matière, analogue aux vents stellaires à une échelle bien supérieure, repousse le gaz interstellaire loin du

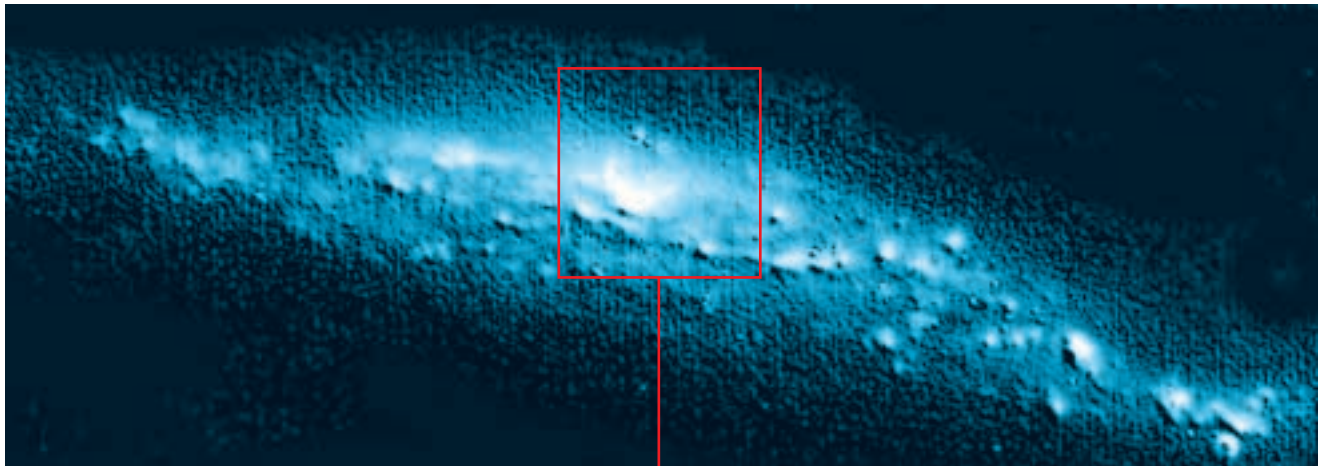
noyau. Les ondes de choc qui en résultent couvrent plusieurs milliers d'années-lumière (ce qui est comparable aux tailles visibles des galaxies elles-mêmes) et sont étudiées à partir des observatoires spatiaux ou terrestres. Certaines de ces galaxies engendrent également des jets radio ; ceux-ci sont des filaments gazeux, très rapides, qui émettent des ondes radio en traversant le champ magnétique, parfois ancré au disque d'accrétion.

Les trous noirs ne sont pas les seules sources d'événements galactiques violents. Certaines galaxies connaissent de brefs épisodes de formation stellaire intense dans leurs cœurs. Les nouveaux astres émettent alors de puissants vents stellaires. Puis, lorsque les étoiles vieillissent, elles dispersent leur matière

lors des supernovae ; cette matière, éjectée à grande vitesse, percute alors la poussière et le gaz interstellaires environnants, ce qui les chauffe à des millions de degrés.

En se dilatant, la bulle formée par le gaz chaud pousse, tel un piston, les poussières et le gaz froids du milieu interstellaire, qui s'accumulent en une coquille dense en surface de la bulle, ralentissant sa vitesse d'expansion. Près de cette coquille, à la frontière entre le flot de gaz en expansion à grande vitesse dans la bulle et le milieu interstellaire non perturbé (quasi stationnaire), une zone de turbulence est visible de la Terre. Si l'énergie de la bulle est suffisante, la perturbation dépasse les limites du disque gazeux galactique et éjecte les fragments de



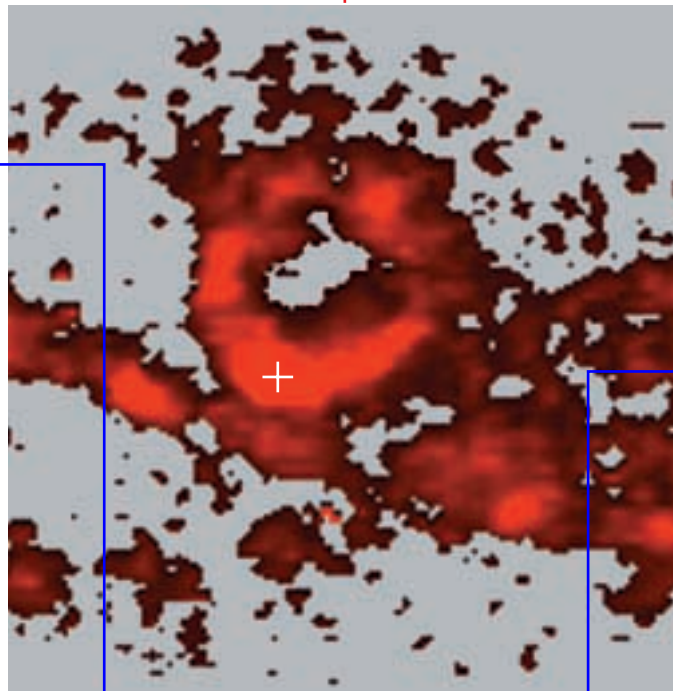


la coquille ainsi que le gaz chaud dans le halo galactique et au-delà, à des milliers d'années-lumière de leurs origines.

Roberto Terlevich et ses collègues de l'Institut d'astronomie de Cambridge ont cherché si les flambées d'étoiles pouvaient entraîner, à elles seules, les déversements de gaz chauds caractéristiques des galaxies actives. En 1985, ils soutenaient que beaucoup de ces galaxies contenaient des étoiles peu communes, qu'ils nommèrent « radiateurs ». Ces étoiles extrêmement chaudes (leur température de surface est supérieure à 100 000 degrés, alors que celle du Soleil n'est que de 5 000 degrés) produisent de puissants vents stellaires. Elles apparaîtraient naturellement lorsqu'une flambée stellaire se produit dans une région enrichie en éléments chimiques lourds par des supernovae antérieures, et donneraient lieu aux spectres et à diverses caractéristiques de certaines galaxies actives.

Trou noir ou flambée ?

Comment savoir si les galaxies actives contiennent un trou noir ou si elles sont plutôt le siège d'une flambée stellaire ? Alors qu'un trou noir convertit en énergie jusqu'à dix pour cent de la masse de la matière en effondrement, la formation d'étoiles résulte de la fusion nucléaire, qui ne peut libérer que 0,1 pour cent de la masse réagissante ; elle



2. UNE FLAMBÉE GALACTIQUE, due à la naissance de nombreuses étoiles au centre de la galaxie NGC 3079, semble être responsable de l'activité observée (en haut). Le centre de la galaxie semble renfermer un trou noir. Un gros plan de la région proche du noyau (celui-ci est marqué par une croix blanche) révèle le contour d'une énorme bulle en expansion dans le milieu interstellaire, gonflée par la chaleur des étoiles qui se forment en son sein.

requiert donc 100 fois plus de matière, dont la majorité s'accumule comme combustible non brûlé. Sur l'ensemble de la vie d'un quasar alimenté par des flambées d'étoiles, la masse accumulée dans le noyau de la galaxie atteindrait un milliard de fois la masse du Soleil, soit presque la masse de la Voie lactée.

Plus un noyau galactique est massif, plus les vitesses orbitales des étoiles sont grandes. Les observations à partir du sol, dans le domaine visible, sont limitées par la turbulence atmosphérique et n'ont longtemps révélé aucun mouvement rapide dans un noyau de

galaxie. Récemment, toutefois, des observations à l'aide de radiotélescopes ont montré qu'un disque d'accrétion d'une demi-année-lumière de rayon interne, tournant rapidement autour d'une masse 20 millions de fois supérieure à celle du Soleil était confiné au centre de la galaxie spirale proche NGC 4258.

Aujourd'hui, plusieurs groupes d'astrophysiciens mesurent la répartition des mouvements stellaires à travers les noyaux galactiques à l'aide du spectrographe du télescope spatial *Hubble*. Cette technique a déjà prouvé son efficacité en montrant que, dans le cœur de la galaxie active M 87, le gaz se mouvait de manière analogue à un disque d'accrétion autour d'un trou noir.

Les flambées d'étoiles et les trous noirs diffèrent également par les spectres des photons les plus énergétiques qu'ils engendrent. Près des trous noirs, la conjugaison d'un champ magnétique intense et d'un disque d'accrétion dense crée un plasma de particules chaudes et rapides qui émettent des rayons X et des rayons gamma. En revanche, dans le cas des flambées d'étoiles, la majorité du rayonnement de haute énergie provient de la collision de la matière éjectée par les supernovae avec la poussière galactique et le gaz environnants. Cette collision chauffe le gaz à une température de un milliard de degrés et ne peut produire de rayonnement gamma, qui nécessiterait une température dix fois

supérieure. L'Observatoire spatial *Compton* a détecté un important rayonnement gamma en provenance de certains quasars, ce qui indiquerait que des trous noirs se terrent en leur centre (voir *L'Observatoire Compton*, par N. Gehrels, C. Fichtel, G. Fishman, J. Kurfess et V. Schönfelder, *Pour la Science*, février 1994).

Une dernière différence entre les deux mécanismes tient aux forces qui canalisent le gaz éjecté. Quand un trou noir est présent, les lignes de champ magnétique ancrées au disque d'accrétion canalisent la matière (un plasma ionisé) en un jet étroit, le long de l'axe de rotation du disque. En revanche, la matière en expansion d'une bulle créée par une flambée d'étoiles suit simplement le chemin de moindre résistance dans le milieu galactique. Une puissante flambée d'étoiles dans une galaxie spirale éjectera le gaz perpendiculairement au plan du disque galactique (où la densité de matière est moindre), et le flot se répartira dans une région en forme de sablier (voir la figure 1c). C'est pourquoi les jets radio étroits qui s'étendent sur des millions d'années-lumière, loin du noyau de certaines galaxies actives, indiquent la présence de trous noirs.

Les signatures spectrales

Toutes nos connaissances sur les galaxies, que celles-ci soient actives ou non, proviennent du rayonnement qu'elles émettent. À l'Observatoire d'Hawaii, nous nous sommes intéressés à la partie visible du spectre électromagnétique, qui permet de déterminer les températures, pressions et concentrations de divers atomes du gaz chauffé par les explosions galactiques. Nous comparons les raies d'émission d'atomes et de molécules excités, ou ionisés, aux raies créées dans des laboratoires terrestres ou déduites de calculs théoriques.

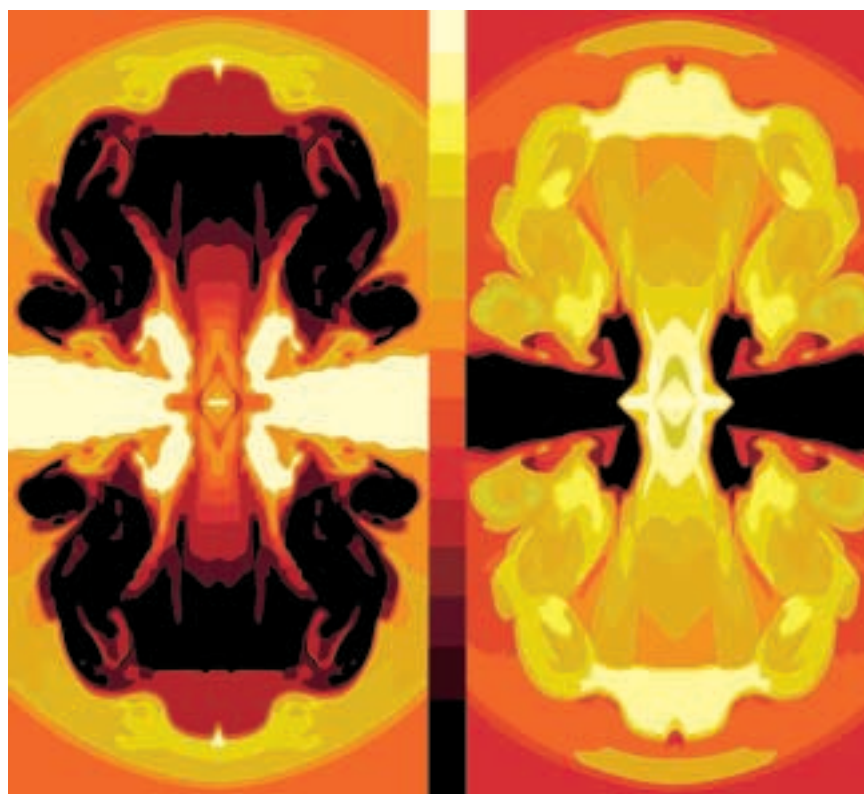
Grâce à l'effet Doppler, qui modifie la fréquence et la longueur d'onde de la lumière émise par des sources mobiles, nous déterminons aussi la vitesse du gaz : la lumière émise par le gaz qui s'approche de la Terre est décalée vers la partie bleue du spectre, tandis que celle émise par le gaz qui s'éloigne est décalée vers le rouge, tout comme la sirène d'une ambulance qui approche est plus aiguë que la sirène d'une ambulance qui s'éloigne.

Naguère les astrophysiciens étudiaient le gaz par deux méthodes complémentaires : l'imagerie des raies d'émission et la spectroscopie à longue fente. La première forme des images à partir de la lumière qui traverse un filtre qui sélectionne la lumière d'une longueur d'onde particulière émise par un élément comme l'hydrogène. Ces images révèlent souvent les spectaculaires structures filamenteuses des explosions, mais n'indiquent ni la vitesse ni la direction des mouvements de gaz, car le filtre ne révèle pas les décalages vers le rouge ou vers le bleu. Les spectromètres à longue fente, qui séparent la lumière en ses rayonnements constitutifs, fournissent des informations détaillées sur les mouvements gazeux, mais pour une région minuscule.

Depuis près d'une décennie, notre groupe utilise un instrument qui combine les avantages des deux méthodes. L'interféromètre à imagerie Fabry-Pérot d'Hawaii (HIFI) fournit des informations spectroscopiques détaillées sur un large champ spatial. Inventés par les Français Charles Fabry et Alfred Pérot au tournant du siècle, ces inter-

féromètres sont utilisés en astronomie. Au sein de l'appareil, on trouve deux lames de verre parallèles, séparées par moins d'un vingtième de millimètre. Les faces internes des lames sont réfléchissantes, de sorte que la lumière incidente est réfléchiée plusieurs fois entre les lames ; les interférences destructrices engendrées atténuent toute les longueurs d'onde de la lumière à l'exception de certaines, déterminées par la séparation entre les lames. En ajustant cette dernière, on obtient une série d'images qui représente une cartographie spectrale du champ observé : l'interféromètre fournit le spectre en chaque point.

Le spectrographe que nous utilisons est installé sur le télescope de 2,2 mètres de diamètre de l'Université d'Hawaii et sur le télescope Canada-France-Hawaii de 3,6 mètres, au sommet du Mauna Kea, à 4 200 mètres d'altitude. Des caméras à transfert de charges, stables et sensibles à la lumière ténue des galaxies, collectent les photons. En une nuit, cette instrumentation performante enregistre jusqu'à un million de spectres qui couvrent toute une galaxie.



3. UN EPANCHEMENT DE GAZ devient rapidement turbulent dans cette simulation numérique d'une galaxie active dont l'apport énergétique provient d'une flambée d'étoiles. Une carte des températures (à gauche) illustre comment le gaz chaud émanant du noyau déplace le gaz galactique plus froid qui l'entoure. Le choc qui en résulte apparaît sur une carte de la densité du gaz (à droite).

Les galaxies actives proches

Nous avons utilisé notre interféromètre pour étudier NGC 1068, une galaxie spirale active distante de 46 millions d'années-lumière. Cette galaxie, la plus proche et la plus brillante de ce type visible dans l'hémisphère Nord, a été beaucoup étudiée. Aux longueurs d'onde radio, NGC 1068 ressemble à un quasar miniature : deux jets s'étendent jusqu'à 900 années-lumière du cœur, avec une émission diffuse qui provient de régions plus lointaines. On suppose que les jets radio résultent de l'émission d'un plasma gazeux qui se déplace à des vitesses proches de

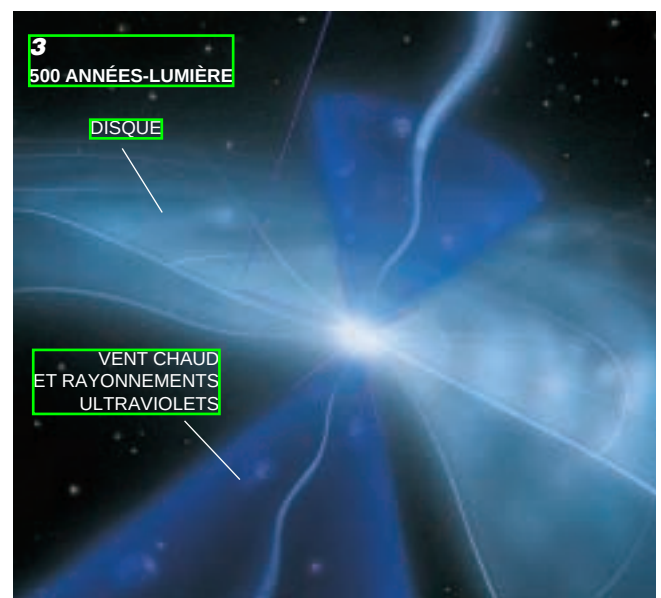
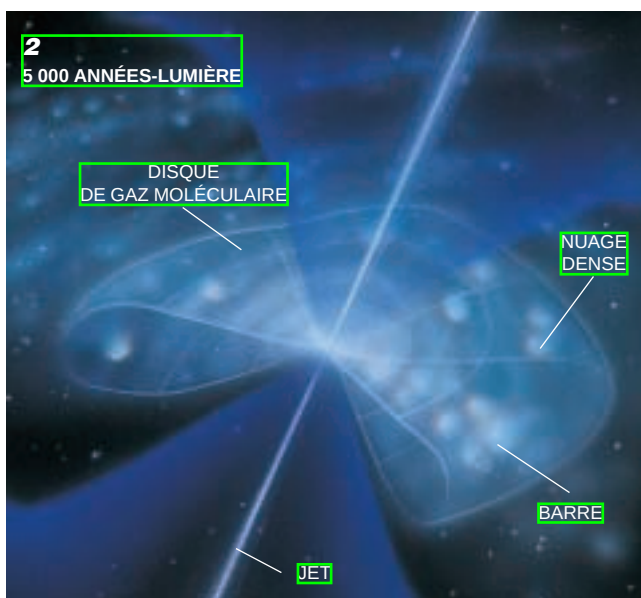
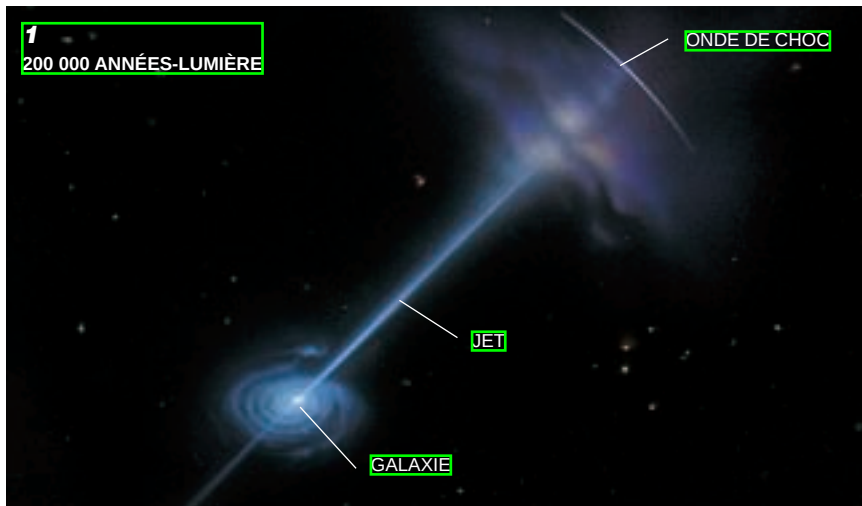
celle de la lumière ; le plasma qui rencontre la matière du disque galactique engendre des «lobes radio» qui émettent d'intenses ondes radio. À l'instar d'un avion supersonique, le bord d'attaque du jet Nord-Est crée un front de choc en forme de V.

Les mêmes régions émettent aussi de grandes quantités de lumière visible et d'ultraviolets. Nous avons toutefois découvert que dix pour cent seulement de la lumière provient du noyau. Le gaz du disque galactique accumulé au bord en expansion du lobe radio Nord-Est contribue pour cinq pour cent supplémentaires. Tout le reste provient de deux faisceaux de gaz rapide, s'éloignant du centre à des vitesses de 1 500 kilomètres par

seconde. Ces deux faisceaux coniques se composent de filaments denses de matière qui ont été balayés par le vent chaud produit par le disque d'accrétion. L'axe des cônes n'est pas aligné avec l'axe polaire galactique.

L'activité dans le noyau se fait sentir à plusieurs milliers d'années-lumière, bien au-delà des lobes radio : le gaz interstellaire diffus se trouve à des températures exceptionnellement élevées, auxquelles une grande partie des atomes et des molécules ont été ionisés, ayant perdu certains de leurs électrons. Simultanément des phénomènes au sein du disque semblent perturber le noyau : des images dans l'infrarouge dévoilent une barre allongée d'étoiles qui s'étend à plus de 3 000 années-lumière du noyau. Les mesures de vitesse par interférométrie indiquent que la barre déforme l'orbite circulaire du gaz dans le disque et canalise la matière vers le centre de la galaxie. Cet afflux de matière pourrait alimenter le trou noir central.

Une autre explosion colossale se déroule dans le cœur de l'une des galaxies les plus proches de nous, M 82, distante de quelques millions d'années-lumière. Ce cataclysme est un prototype des systèmes engendrés par une flambée d'étoiles. Des images prises à travers un filtre ne laissant passer que la lumière rouge des atomes d'hydrogène en formation montrent un tissu de filaments qui s'échappent par les pôles galactiques. La cartographie spectrale de l'émission des filaments per-



4. LES FORCES COLOSSALES qui sont à l'œuvre au centre des galaxies actives se font sentir à plus d'un demi-million d'années-lumière parce qu'elles engendrent des jets de gaz qui pénètrent à des vitesses proche de celle de la lumière dans le halo galac-

tique, créant d'énormes ondes de choc (1). Plus près du centre de la galaxie (2, 3), un disque équatorial dense de poussière et de gaz moléculaire alimente le noyau actif en matière tandis que du gaz chaud et du rayonnement s'échappent des pôles. La den-

pendiculaires au disque galactique révèle deux masses principales de gaz, l'une s'éloignant et l'autre s'approchant de la Terre. La différence de vitesse entre les deux augmente avec l'éloignement du cœur, atteignant environ 350 kilomètres par seconde à une distance de 3 000 années-lumière. À 4 500 années-lumière du noyau, la différence de vitesse s'amenuise.

La flambée observée dans le noyau de M 82 semble résulter d'une rencontre récente avec les galaxies voisines M 81 et NGC 3077. Sa luminosité infrarouge est 30 milliards de fois supérieure à la luminosité totale du Soleil, et les radio-astronomes y ont identifié les restes d'un grand nombre de supernovae. Le tissu filamentaire, visible de la Terre, résulte de deux bulles ovoïdes orientées perpendiculairement au disque de M 82, de part et d'autre du noyau. Des observatoires spatiaux équipés de systèmes de détection des rayons X ont enregistré l'émission du vent chaud qui gonfle ces bulles ; leur apparence mousseuse provient d'instabilités dans le gaz chaud qui se refroidit.

Une activité ambiguë

Dans de nombreux cas, la source principale d'énergie des galaxies actives est difficilement identifiable. Parfois une flambée d'étoiles semble coexister avec un trou noir. Comme M 82, beaucoup de ces galaxies sont anormalement brillantes aux longueurs d'onde

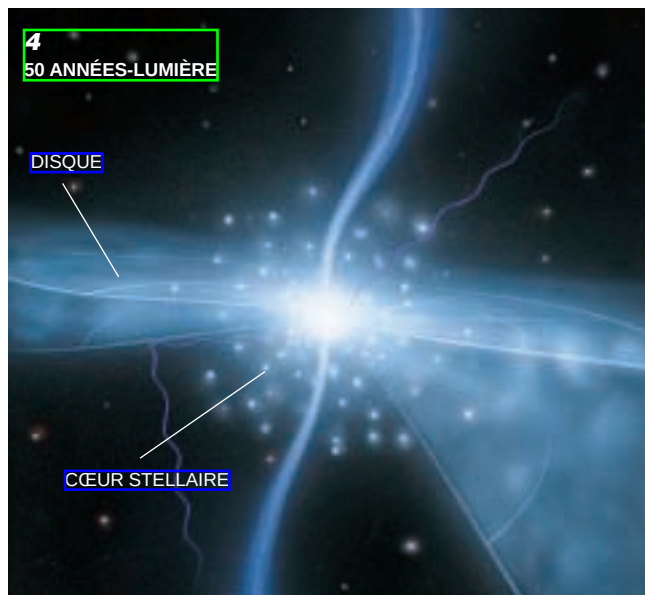
infrarouges et riches en gaz moléculaire, le matériau de base des étoiles. Leur émission radio et leur spectre dans le domaine visible ressemblant à ceux d'un quasar, il est probable qu'un trou noir se trouve en leur sein.

Cette ambiguïté complique l'interprétation du comportement de la galaxie proche NGC 3079. Nous voyons cette galaxie spirale par la tranche – position avantageuse pour étudier le gaz éjecté du noyau. Comme M 82, NGC 3079 est anormalement brillante dans l'infrarouge et contient un disque massif de gaz moléculaire qui s'étend sur 8 000 années-lumière autour du cœur. Ce dernier est très brillant aux longueurs d'onde radio ; en sortent des structures fines et droites, qui émettent dans ce même domaine spectral et qui indiquent une éjection de matière collimatée. Plus loin, l'émission radio présente une structure complexe, s'étendant sur plus de 6 500 années-lumière de part et d'autre du disque galactique.

Des images formées par la lumière rouge de l'hydrogène montrent un anneau presque circulaire de 3 600 années-lumière de diamètre à l'Est du noyau ; les mesures de vitesse confirment que cet anneau délimite les bords d'une bulle. L'extrémité pointue de la bulle ovoïde repose sur le noyau, et son grand axe est aligné avec le pôle galactique. Une autre bulle se trouve à l'Ouest du noyau, mais les poussières du disque galactique en dis-

simulent la plus grande partie. Nos observations spectrales indiquent que l'énergie totale de cet écoulement violent est dix fois supérieure à celle des explosions dans NGC 1068 ou M 82. L'alignement de la bulle ovoïde avec l'axe polaire de la galaxie hôte indiquerait que la collimation du flot est due à la poussière et au gaz galactique plutôt qu'à un trou noir, mais de très nombreuses autres caractéristiques de la galaxie font penser qu'un trou noir est tapi en son cœur.

Une flambée d'étoiles dans le noyau est-elle seule responsable de cette gigantesque explosion ? Pour y répondre, nous avons analysé le rayonnement infrarouge qui émane de la région de formation d'étoiles. La majorité du rayonnement ultraviolet des étoiles naissantes enveloppées dans des nuages moléculaires est absorbée, puis réémise dans l'infrarouge. De fait, la luminosité infrarouge du noyau de NGC 3079 constitue un bon indicateur de la vitesse à laquelle les supernovae et les vents stellaires injectent de l'énergie au centre de la galaxie. En comparant les prédictions du modèle de flambée d'étoiles avec nos observations, nous trouvons que les vents stellaires et les supernovae possèdent suffisamment d'énergie pour dilater la bulle : le trou noir dans le cœur de NGC 3079 contribue peut-être à l'éjection de matière, mais la flambée d'étoiles, à elle seule, pourrait être responsable de l'explosion.



sité élevée du gaz qui s'effondre sur le centre, dans un rayon de quelques dizaines d'années-lumière, provoque un sursaut de formation d'étoiles (4). Encore plus près du centre (5), le disque rayonne aux longueurs d'onde ultraviolettes et X, s'amincissant



vers l'intérieur pour alimenter ce que les astrophysiciens pensent être un trou noir ; malgré sa masse plusieurs millions de fois supérieure à celle du Soleil, ce trou noir serait trop petit pour être visible.

Comment se forment les galaxies actives?

Bien que les astrophysiciens comprennent aujourd'hui les mécanismes de base qui animent les galaxies actives, de nombreux détails demeurent obscurs. Quels mécanismes amorcent la flambée d'étoiles ou forment le trou noir central? Comment le combustible est-il acheminé vers le noyau? Des interactions gravitationnelles avec des galaxies riches en gaz redistribuent le gaz dans la galaxie hôte, peut-être en formant une barre

d'étoiles comme celle de NGC 1068. Des simulations numériques indiquent que la barre, une fois formée, demeure assez stable (voir Les collisions de galaxies, par Joshua Barnes, Lars Hernquist et François Schweizer, *Pour la Science*, octobre 1991). De surcroît, NGC 1068 ne possède aujourd'hui aucune compagne proche, ce qui confirme que la barre doit y être stable.

Les astrophysiciens ne sont pas d'accord sur l'ordre d'apparition des mécanismes. La flambée d'étoiles constitue peut-être une première phase

de l'évolution des galaxies actives, qui finit par s'éteindre en laissant un amas dense de vestiges stellaires qui s'effondre en un trou noir massif.

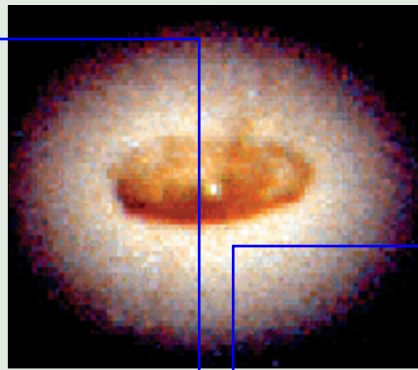
Les puissants flots de gaz visibles dans les galaxies actives qui ont été étudiées ne sont que des exemples remarquables de mécanismes généraux, mais moins violents, qui touchent beaucoup de galaxies. Les galaxies infrarouges lumineuses sont nombreuses, et de plus en plus d'indices conduisent les astrophysiciens à croire qu'un nombre important de

Trous noirs, étoiles chaudes et galaxies actives

Depuis la découverte des quasars dans les années 1960, la présence d'un trou noir très massif en leur centre expliquait l'énergie considérable – l'équivalent de l'énergie produite par des centaines de millions d'étoiles – qui s'échappe de régions à peine plus grande que le Système solaire! Pourtant, les théories utilisant des trous noirs ne parviennent pas à expliquer l'ensemble des observations associées aux galaxies à noyaux actifs. Pour y remédier, R. Terlevich eut l'idée d'un autre mécanisme : concentrées dans la galaxie, des étoiles très massives et très chaudes rendraient compte de l'état du gaz et des propriétés spectroscopiques des noyaux actifs.

Les deux théories, celle du trou noir, présentée comme classique, et celle des «radiateurs» (étoiles chauffantes) ont fait l'objet d'âpres débats. Malheureusement, la théorie des radiateurs présente, elle aussi, des difficultés dont la principale est que nous ignorons si de telles étoiles existent! Ces étoiles n'ont jamais été observées et, quand bien même elles existeraient, les astrophysiciens ne s'accordent pas sur leur propriété : certains pensent que leurs atmosphères seraient trop opaques pour reproduire les observations. C'est pourquoi la plupart des astronomes admettent aujourd'hui qu'une théorie combinant les deux approches serait la plus plausible.

Pourtant, les images et les spectres du télescope spatial *Hubble* étayaient l'hypothèse de l'existence au cœur de galaxies non actives de trou noir massifs entourés et alimentés par des disques de gaz et de poussières. Après le trou noir de 2,4 milliards de fois la masse du Soleil au cœur de la galaxie elliptique M87, les astronomes ont observé à l'aide du télescope spatial un nouveau trou noir dans la galaxie NGC 4261, également dans la constellation de la Vierge (voir la photographie). Finalement, au mois de janvier 1996, un trou noir de deux milliards de masses solaires fut découvert dans la galaxie NGC 3115, située à 30 millions d'années-lumière dans la constella-



AU CŒUR de la galaxie NGC 4261, un disque de poussière et de gaz tombe sur un trou noir de 1,2 milliard de masses solaires.

tion du Sextant. Ces résultats montreraient que la plupart, voire toutes les galaxies, contiennent des trous noirs en leur centre. Ces trous noirs étaient actifs il y a longtemps, ce qui expliquerait le grand nombre de quasars dans l'Univers primordial (à grande distance).

Notons que, mis à part l'aspect spectaculaire des images du télescope spatial, les contraintes les plus fortes sur les dimensions des régions émettrices proviennent de l'étude de la variabilité, qui est peu évoquée dans l'article. La dimension de la région émettrice est inférieure au temps caractéristique de variation multipliée par la vitesse de la lumière. Plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps. Ainsi, dans l'hypothèse où le cœur des noyaux de galaxies abriterait une intense activité de formation stellaire, la variabilité résulterait de l'interaction de la matière éjectée par l'explosion des étoiles massives avec le milieu interstellaire dense environnant. Dans cette étude, R. Terlevich fait figure de pionnier.

En France, de nombreux chercheurs, dont Danielle Alloin, au Service d'astrophysique de Saclay, Monique Joly et Suzy Collin, à l'Observatoire de Paris-Meudon, étudient les propriétés d'un disque de gaz et de poussière accrété par le trou noir central. Simultanément, ces astronomes participent à des campagnes de «surveillance» dans tout le spectre électromagnétique, ce qui permet d'échantillonner la variabilité des noyaux actifs de galaxies.

Une théorie réunissant les trous noirs et les étoiles très massives verra-t-elle le jour? On peut penser que la formation d'étoiles qui constituent le bulbe des galaxies est à l'origine des trous noirs et des nombreux quasars observés à grande distance. Une fois le trou noir établi, le phénomène peut devenir récurrent : si de la matière continue à tomber sur le trou noir, le noyau produira des phénomènes d'activité violente ou conduira peut-être même à de nouveaux épisodes de formation d'étoiles.

Daniel KUNTH – Institut d'astrophysique de Paris

leurs noyaux sont le siège d'explosions. Ces événements modifient profondément la formation des étoiles dans tout le voisinage galactique. Par exemple, la bulle de NGC 3079 est percée au sommet et laisse ainsi échapper de la matière dans le halo galactique et peut-être même dans l'espace intergalactique. Les réactions nucléaires à l'œuvre dans l'avalanche de supernovae provoquée par la flambée d'étoiles enrichissent ce vent chaud en éléments chimiques lourds. Il en résulte que le vent chauffera son environnement, mais aussi en modifiera la composition chimique.

On connaît encore trop mal l'état des galaxies plus lointaines pour estimer l'impact de ce «bain de mousse cosmique» sur l'histoire de l'Univers. Grâce aux images de galaxies lointaines qui seront prises par le télescope *Hubble*, quand des astronautes l'auront perfectionné, en 1997, nous pourrions clarifier certaines de ces questions. Nos instruments, collectant la lumière émise par ces galaxies il y a des milliards d'années, nous révèlent sans doute un analogue de notre propre préhistoire galactique, qui se déroule ailleurs dans l'Univers.

Sylvain VEILLEUX est professeur d'astronomie à l'Université du Maryland. Gerald CECIL est professeur d'astronomie et de physique à l'Université Chapel Hill. Jonathan BLAND-HAWTHORN est astronome à l'Observatoire de Sydney.

Jonathan BLAND et R. Brent TULLY, *Large-Scale Bipolar Wind in M82*, in *Nature*, vol. 334, pp. 43-45, 7 juillet 1988.

G. CECIL, J. BLAND et R.B. TULLY, *Imaging Spectrophotometry of Ionized Gas in NGC 1068, Part 1 : Kinematics of the Narrow-Line Region*, in *Astrophysical Journal*, vol. 355, pp. 70-87, 20 mai 1990.

Relationships between Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies, Proceedings of the Taipei Astrophysics Workshop, 1991, sous la direction d'Alexei V. Filippenko, Astronomical Society of the Pacific, 1992.

S. VEILLEUX, G. CECIL, J. BLAND-HAWTHORN, R.B. TULLY, A.V. FILIPPENKO et W.L.W. SARGENT, *The Nuclear Superbubble of NGC 3079*, in *Astrophysical Journal*, 1^{ère} partie, vol. 433, pp. 48-64, 20 septembre 1994.

R.B. TULLY, J. MORSE et P. SHOPBELL, *Dissecting Cosmic Explosions*, in *Sky and Telescope*, vol. 90, n° 1, pp. 18-21, juillet 1995.

L'origine bactérienne des ulcères

MARTIN BLASER

La bactérie Helicobacter pylori infecte l'estomac d'une personne sur trois de par le monde ; elle déclenche souvent des ulcères et des cancers.

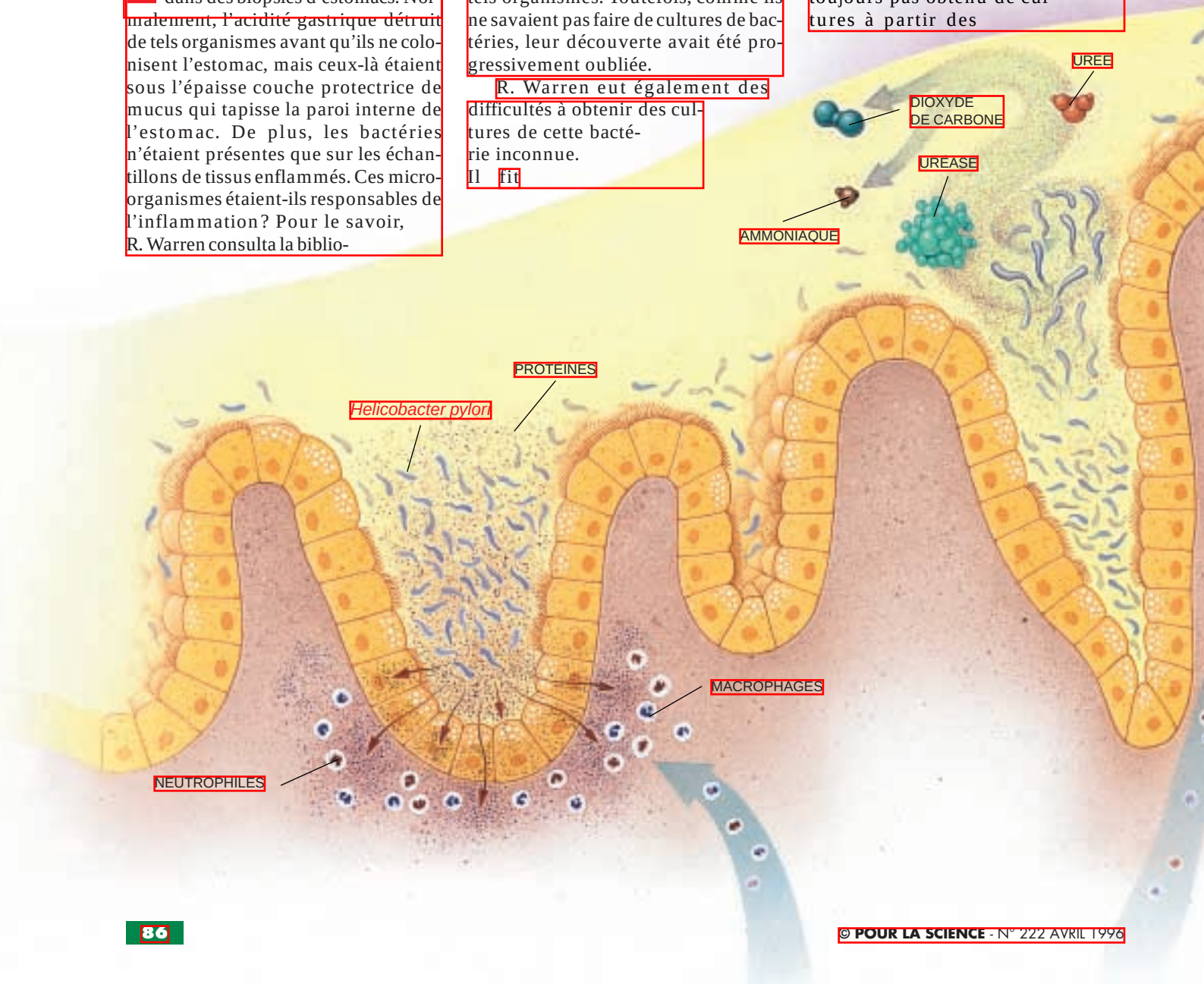
En 1979, le médecin australien Robin Warren remarqua la présence de bactéries incurvées et spiralées dans des biopsies d'estomacs. Normalement, l'acidité gastrique détruit de tels organismes avant qu'ils ne colonisent l'estomac, mais ceux-là étaient sous l'épaisse couche protectrice de mucus qui tapisse la paroi interne de l'estomac. De plus, les bactéries n'étaient présentes que sur les échantillons de tissus enflammés. Ces micro-organismes étaient-ils responsables de l'inflammation ? Pour le savoir, R. Warren consulta la biblio-

graphie et y découvrit que des anatomopathologistes allemands avaient déjà observé, 100 ans auparavant, de tels organismes. Toutefois, comme ils ne savaient pas faire de cultures de bactéries, leur découverte avait été progressivement oubliée.

R. Warren eut également des difficultés à obtenir des cultures de cette bactérie inconnue.

Il fit

ses premiers essais en 1981, aidé par un jeune étudiant enthousiaste, Barry Marshall. En avril 1982, ils n'avaient toujours pas obtenu de cultures à partir des



prélèvements effectués sur 30 malades différents. Puis vinrent les vacances de Pâques, et certaines cultures furent incubées pendant cinq jours, au lieu d'être renouvelées au bout des deux jours habituels : le cinquième jour, des colonies de bactéries apparurent ! Les deux chercheurs les nommèrent *Campylobacter pyloridis*, en raison de leur ressemblance avec les bactéries pathogènes du genre *Campylobacter*, qui colonisent l'intestin. Au début de l'année 1983, R. Warren et B. Marshall publièrent leur premier compte rendu et, en quelques mois, des scientifiques du monde entier isolèrent la bactérie. Après avoir constaté qu'elle n'appartenait pas au genre *Campylobacter*, mais à un nouveau genre, *Helicobacter*, différentes équipes confirmèrent qu'une infection à *Helicobacter pylori* est géné-

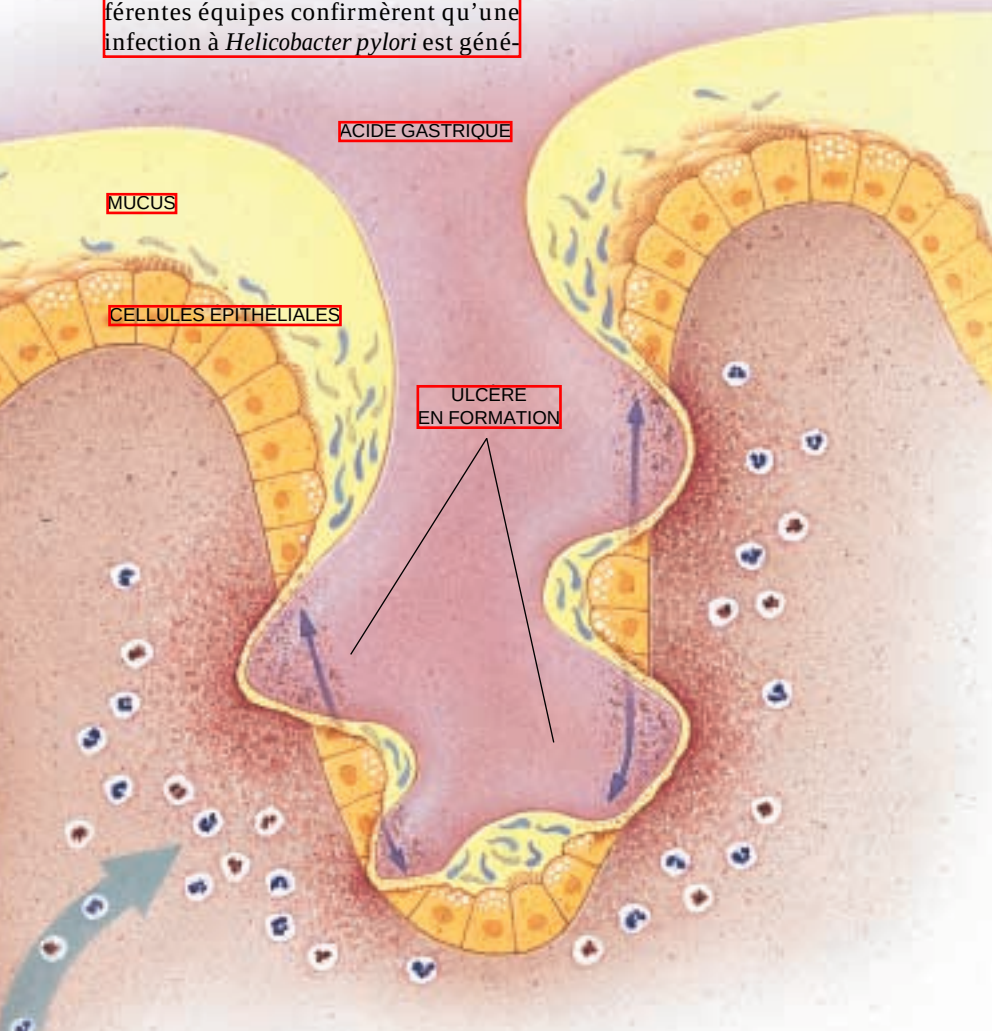
ralement associée à une inflammation persistante de l'estomac, nommée gastrite chronique superficielle.

L'inflammation des tissus favorisait-elle l'installation de *Helicobacter pylori* ou, au contraire, les bactéries étaient-elles responsables de l'inflammation ? Les études ont validé la seconde hypothèse. Notamment B. Marshall et un autre volontaire dont l'estomac était initialement sain absorbèrent des bactéries ; bientôt ils souffrirent de gastrite. De même, une gastrite apparut chez des animaux à qui l'on avait fait absorber *Helicobacter pylori*. L'administration d'antibiotiques éliminait l'infection et soulageait l'irritation ; lorsque la bactérie était éra-

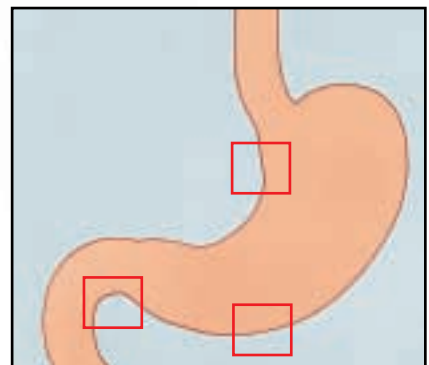
diquée, l'inflammation disparaissait, mais quand l'infection réapparaissait, la gastrite réapparaissait aussi. Aujourd'hui, il est établi que toute personne infectée par *Helicobacter pylori* souffre d'une gastrite chronique. En l'absence de traitement, l'infection et l'inflammation peuvent durer des dizaines d'années, voire toute la vie, engendrant des ulcères de l'estomac et du duodénum (la partie de l'intestin grêle située à la sortie de l'estomac). Enfin, *Helicobacter pylori* peut même être responsable de divers cancers de l'estomac.

Depuis plus de 40 ans, les médecins savent que la plupart des personnes atteintes d'ulcères gastro-duodénaux ont également une gastrite chronique. Paradoxalement, lorsqu'on associa infections à *Helicobacter pylori* et gastrites, les médecins n'ont pas conclu que ces bactéries pouvaient aussi être responsables d'ulcères gastro-duodénaux : plusieurs générations d'étudiants en médecine ont appris que le stress était responsable d'une augmentation de la production d'acide gastrique, lequel provoquait les ulcères. Cette théorie résultait des travaux du physiologiste allemand K. Schwartz, qui, en 1910, avait remarqué que les ulcères du duodénum apparaissent seulement chez les personnes dont l'estomac contient de l'acide ; il en fit une maxime : « Pas d'acide, pas d'ulcère. » Toutefois, si l'acidité gastrique est effectivement nécessaire à la formation d'ulcères, elle ne suffit pas à justifier leur apparition : de nombreux malades atteints d'ulcères ont des concentrations en acide gastrique normales, tandis que d'autres dont la concentration en acide gastrique est élevée n'ont jamais d'ulcère.

La théorie de l'ulcère par le stress et par l'acidité gastrique semblait corroborée, dans les années 1970, par les études de médicaments (des antago-



1. LES BACTÉRIES RESPONSABLES DES ULCÈRES (*Helicobacter pylori*) sont présentes dans la couche de mucus (en jaune pâle) qui recouvre la face interne de l'estomac ; elles y sont partiellement protégées de l'acide gastrique (en rose). Ces micro-organismes sécrètent des protéines qui agissent sur les cellules épithéliales de l'estomac et attirent des macrophages et des neutrophiles, c'est-à-dire des cellules responsables d'inflammations (à l'extrême gauche). En outre, les bactéries produisent de l'uréase, une enzyme qui décompose l'urée en ammoniac et en dioxyde de carbone (au centre) ; l'ammoniac neutralise l'acide gastrique. *Helicobacter pylori* sécrète aussi des toxines qui favorisent l'apparition des ulcères d'estomac (ci-dessus). Ces bactéries prolifèrent souvent dans les régions de l'estomac indiquées sur le schéma situé à droite.



nistes des récepteurs de type 2 de l'histamine) qui réduisent l'acidité gastrique. Pour la première fois, de nombreux malades disposaient d'un médicament qui calmait leurs douleurs et faisait souvent disparaître complètement les ulcères. Toutefois, les douleurs revenaient dès que les malades cessaient de se traiter : les malades en étaient réduits à absorber ces antihistaminiques pendant des années. Comme cinq à dix pour cent de la population mondiale est atteinte d'ulcère à un moment ou à un autre de sa vie, les antagonistes des récepteurs de type 2 de l'histamine sont devenus les médicaments les plus rentables pour l'industrie pharmaceutique, laquelle a montré peu d'empressement à chercher d'autres traitements de l'ulcère gastro-duodénal.

Bactéries et ulcères

Certains ulcères sont dus à des médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens – notamment l'aspirine –, souvent prescrits pour traiter l'arthrite chronique. Toutefois la quasi-totalité des ulcères ne sont pas d'origine médicamenteuse, mais sont provoqués par *Helicobacter pylori*. Presque tous ces malades sont infectés par *Helicobacter pylori*, alors que seulement 30 pour cent environ des sujets témoins du même âge le sont. En outre, on détecte *Helicobacter pylori* dans le duodénum de presque tous les patients ayant un ulcère duodénal. On estime qu'une infection à *Helicobacter pylori*, associée

à une gastrite chronique, augmente de 3 à 12 fois le risque d'ulcère gastrique dans les 10 à 20 années qui suivent l'infection. Enfin, dernier argument en faveur de l'origine bactérienne des gastrites : certains traitements antimicrobiens sont efficaces contre les infections à *Helicobacter pylori* et contre les gastrites, et réduisent notablement les risques de récurrence des ulcères ; peu de personnes surmontent une infection à *Helicobacter pylori* sans antibiotiques.

Lorsqu'une personne est contaminée par *Helicobacter pylori*, son système immunitaire fabrique des anticorps, c'est-à-dire des molécules capables de se lier à certains envahisseurs et de les inactiver. Ces anticorps n'éliminent pas les microbes, mais révèlent leur présence : on détecte aisément la présence de *Helicobacter pylori* en dosant ces anticorps. Dans les pays industrialisés, une personne sur trois, voire une sur deux, est contaminée par *Helicobacter pylori*. Les enfants des pays industrialisés sont rarement infectés, mais plus de la moitié des personnes de plus de 50 ans sont contaminées. Dans les pays en développement, 60 à 70 pour cent des enfants de plus de 10 ans sont contaminés, et la proportion d'adultes infectés est élevée. De même, l'infection à *Helicobacter pylori* est fréquente chez les enfants qui vivent dans des orphelinats.

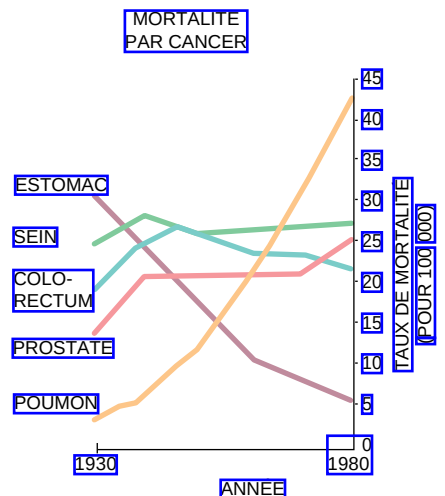
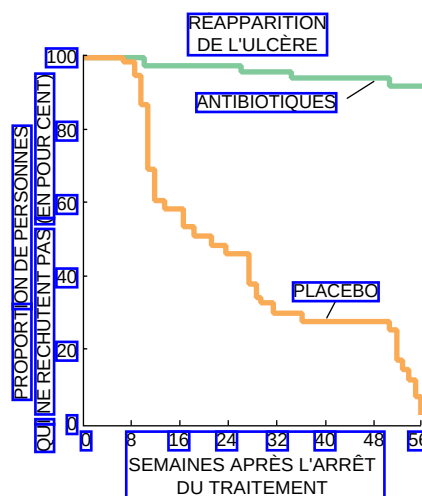
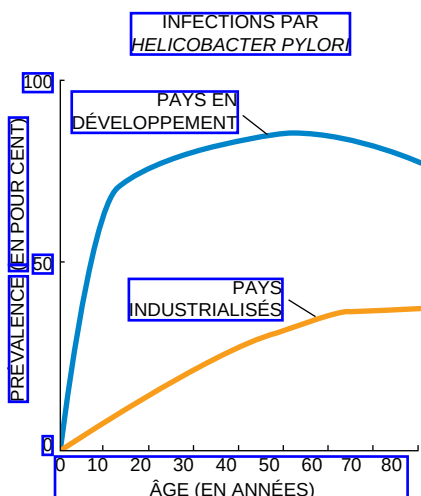
On ignore encore les modes de contamination, mais on sait que le manque d'hygiène et la promiscuité facilitent la transmission. Comme les conditions de vie se sont améliorées de

par le monde depuis 100 ans, la proportion des personnes infectées par *Helicobacter pylori* a diminué, et l'âge moyen de la contamination a augmenté. Au cours des 80 dernières années, le cancer de l'estomac s'est raréfié : dans les pays industrialisés, il n'est plus la principale cause de décès par cancer, comme il l'était au début du XX^e siècle. On ignore précisément pourquoi, mais on soupçonne la diminution du nombre des infections par *Helicobacter pylori*, en raison de l'amélioration des conditions sanitaires.

De l'ulcère au cancer

Dans les années 1970, le médecin américain Pelayo Correa supposa que le cancer de l'estomac résultait d'une longue série de modifications survenant dans l'estomac : un estomac sain serait d'abord atteint d'une gastrite chronique (nous savons aujourd'hui que la bactérie *Helicobacter pylori* en est responsable). Dans une deuxième étape, durant parfois plusieurs dizaines d'années, cette gastrite engendrerait des lésions plus graves, et l'atrophie gastrique résultante serait responsable de métaplasies et de dysplasies intestinales, des transformations cellulaires qui précèdent généralement les cancers. *Helicobacter pylori* était-elle responsable du passage de la gastrite chronique à l'atrophie gastrique, puis au cancer ?

Trois études indépendantes, qui ont abouti aux mêmes conclusions, ont établi, en 1991, le lien entre *Helicobacter*



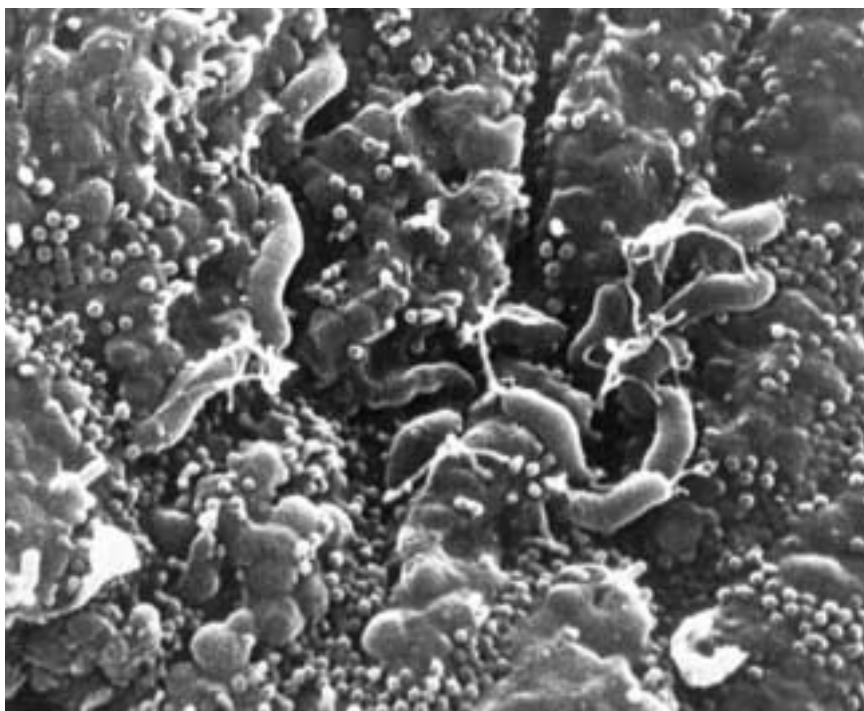
2. LA PROPORTION DES PERSONNES INFECTÉES par *Helicobacter pylori* varie selon les pays. Dans les pays industrialisés, l'infection est rare chez les enfants, mais sa prévalence augmente avec l'âge. Dans les pays en développement, davantage de personnes sont atteintes, quel que soit l'âge (à gauche). Comme ces infections déclenchent des ulcères, un traitement antibiotique

réduit notablement le risque de récurrence (au centre). Depuis 100 ans, le nombre des infections à *Helicobacter pylori* a diminué dans les pays industrialisés, ainsi que le nombre de décès par cancer de l'estomac (à droite), ce qui confirme que, dans certaines circonstances, une infection à *Helicobacter pylori* dégénère en cancer.

pylori et les cancers de l'estomac. L'étude à laquelle j'ai participé, avec Abraham Nomura, d'Honolulu, a porté sur des hommes qui avaient habité Hawaii en 1942. Cette année-là, un an après le bombardement de Pearl Harbor, de jeunes Américains d'origine japonaise ont fait leur service militaire à Hawaii. Au milieu des années 1960, des médecins de Hawaii examinèrent les dossiers médicaux de ceux qui, parmi eux, étaient nés entre 1900 et 1919, au cours d'une enquête épidémiologique sur les maladies de cœur, les cancers et d'autres maladies. À la fin des années 1960, ils avaient ainsi sélectionné un groupe de 8 000 hommes environ, leur avaient distribué des questionnaires et avaient récupéré des échantillons de sang congelé. Ils avaient ensuite continué à consigner l'état de santé de ces hommes.

Lorsque nous avons commencé notre étude, nous ne disposions d'informations suffisantes que pour 5 924 des 8 000 hommes du groupe d'origine. Parmi eux, 137, soit un peu plus de deux pour cent, avaient eu un cancer de l'estomac entre 1968 et 1989. Nous avons sélectionné 109 de ces malades, en les associant à un membre sain du groupe, et nous avons repris les échantillons de sang congelé dans les années 1960, pour y rechercher des anticorps anti-*Helicobacter pylori*. Ces échantillons de sang avaient tous été prélevés 13 ans environ avant le diagnostic des cancers. En les analysant, nous avons effectivement prouvé que les hommes infectés par *Helicobacter pylori* étaient six fois plus nombreux que les hommes indemnes à avoir eu un cancer au cours des 21 ans qui ont suivi le prélèvement sanguin. Quand nous ne tenions compte que des cancers de la partie inférieure de l'estomac (où *Helicobacter pylori* prolifère souvent), le risque était même multiplié par 12.

Au cours des cinq dernières années, d'autres recherches épidémiologiques ont confirmé le lien entre une infection à *Helicobacter pylori* et cancer de l'estomac. En juin 1994, l'Organisation mondiale de la santé a classé *Helicobacter pylori* parmi les agents cancérogènes de classe 1, les plus dangereux. Une forme plus rare du cancer de l'estomac, le lymphome gastrique, semble également dû à *Helicobacter pylori*. Selon certains résultats récents, les traitements antimicrobiens contre *Helicobacter pylori* feraient régresser certaines



3. CES ORGANISMES INCURVES, agrandis ici 8 000 fois, sont des bactéries *Helicobacter pylori* présentes dans l'estomac d'un volontaire qui en avait absorbé plus d'un an avant ce prélèvement ; ce patient a ensuite souffert de gastrite chronique superficielle.

de ces tumeurs : cette observation intéresse autant les médecins que les biologistes spécialistes du cancer.

De la contamination à l'infection permanente

Contrairement à la plupart des bactéries, *Helicobacter pylori* n'est pas détruit en milieu acide, mais ce n'est pas la seule exception. Depuis la découverte de cette bactérie, les biologistes ont isolé 11 autres organismes de l'estomac de divers primates, tels le chien, le chat, des rongeurs, le furet et même le guépard. Ces bactéries, membres de la famille *Helicobacter*, semblent avoir un ancêtre commun. Elles ont toutes une forme de spirale et une grande facilité à se mouvoir, ce qui leur permet de résister aux contractions musculaires qui assurent régulièrement la vidange gastrique. Elles se développent bien lorsque la concentration en oxygène est égale à cinq pour cent, ce qui est précisément le cas dans le mucus de l'estomac. De surcroît, ces bactéries fabriquent de grandes quantités d'uréase, une enzyme qui décompose l'urée en ammoniac et en dioxyde de carbone. L'ammoniac ainsi libéré neutralise l'acidité de l'environnement immédiat des bactéries, ce qui leur permet de survivre.

On ignore de quoi se nourrit *Helicobacter pylori*, mais on soupçonne naturellement qu'elle absorbe soit le mucus où elle vit, soit la nourriture qui passe dans l'estomac. Nos calculs montrent toutefois que *Helicobacter pylori* ne survivrait pas longtemps si elle n'avait pas d'autre ressource et qu'une interaction des bactéries et des cellules hôtes est nécessaire. L'inflammation pourrait être cette interaction : *Helicobacter pylori* l'utiliserait pour attirer à elle des substances nutritives. Bien que *Helicobacter pylori* n'envahisse pas le tissu gastrique, elle l'irrite : les bactéries semblent libérer des substances chimiques que le tissu gastrique absorbe, et ces substances attirent des cellules phagocytaires (des leucocytes et des macrophages) qui déclenchent la gastrite.

Exposé aux substances nocives libérées par *Helicobacter pylori*, l'organisme humain réagit en fabriquant notamment des anticorps. Apparemment, cette réaction immunitaire n'est pas très efficace, puisque les bactéries et les anticorps coexistent pendant des dizaines d'années. Face à un agent pathogène difficile à éliminer, l'homme avait deux stratégies évolutives : ou bien il combattait *Helicobacter pylori* jusqu'à l'anéantir, et il risquait alors de perturber gravement la fonction de l'estomac, ou bien il s'accoutumait à l'organisme et tentait de l'ignorer. Je pense

que l'évolution a choisi la tolérance. La réaction à d'autres agents pathogènes tenaces, tels ceux du paludisme et de la lèpre, est peut-être identique : une réaction immunitaire atténuée après adaptation de l'hôte.

Heureusement, il n'est pas dans l'intérêt évolutif de *Helicobacter pylori* de profiter de cette passivité, de proliférer et de tuer celui qu'elle infecte : procédant ainsi, la bactérie réduirait ses chances de se propager. En outre, la stratégie adoptée permet à la bactérie d'atteindre des effectifs imposants dans l'estomac, entre dix millions et dix milliards de cellules. Enfin, une croissance plus rapide épuiserait les mécanismes immunitaires, ce qui aboutirait à une inflammation grave, à une atrophie gastrique et à une diminution de l'acidité gastrique ; or, si l'acidité gastrique était trop faible, des bactéries de l'intestin, telle *Escherichia coli*, remonteraient dans l'estomac et le coloniseraient. Bien que *Helicobacter pylori* puisse survivre plus longtemps qu'*Escherichia coli* dans un environnement acide, la seconde prolifère beaucoup plus que la première dans un milieu moins acide. Ainsi, pour éviter toute concurrence avec les bactéries intestinales, *Helicobacter pylori* doit éviter une inflammation excessive et maintenir une acidité suffisante dans l'estomac.

Helicobacter pylori est-elle une bactérie symbiotique qui aurait évolué

récemment pour devenir un organisme pathogène ? Ou, au contraire, est-elle en lente évolution vers un état symbiotique ? Nous l'ignorons encore, mais pouvons comparer cet agent pathogène à *Mycobacterium tuberculosis*, responsable de la tuberculose. Cette bactérie infecte aussi un tiers environ de la population mondiale, mais, comme dans le cas des infections à *Helicobacter pylori*, dix pour cent seulement des personnes infectées deviennent malades, les autres ne présentant aucun symptôme. Les variations de la virulence des souches microbiennes et de la sensibilité des individus expliqueraient pourquoi toutes les personnes contaminées ne sont pas malades. De surcroît, divers facteurs environnementaux, par exemple la qualité de l'alimentation ou le tabac, influeraient sur l'évolution de l'infection. L'âge de la contamination aurait également un rôle. Tous ces facteurs agissent sur l'évolution d'une infection à *Helicobacter pylori*, mais nous détaillerons surtout le rôle des différences génétiques entre les souches.

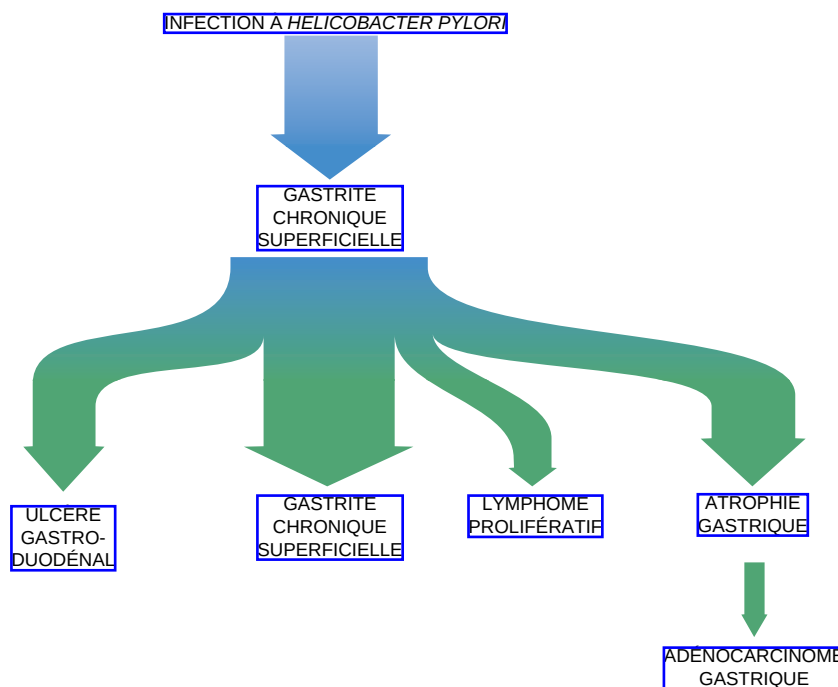
Inégalités chez les bactéries

Étant donné son abondance de par le monde, il n'est pas étonnant que *Helicobacter pylori* ait une grande varia-

bilité génétique. Les souches ont des structures et des caractéristiques biochimiques et physiologiques communes, mais elles ne sont pas toutes aussi virulentes. Les différences sont essentiellement dues à deux gènes : l'un code une grosse protéine produite par 60 pour cent de toutes les souches. Identifié et cloné en 1993, il est nommé *cagA*. Si les souches portant le gène *cagA* infectent seulement un patient atteint de gastrite chronique sur deux, elles infectent la quasi-totalité de ceux qui ont un ulcère du duodénum. En reprenant les résultats de l'étude menée à Hawaï, nous avons constaté qu'une infection par une souche *cagA* double le risque de cancer de l'estomac. Plusieurs équipes ont montré que les souches *cagA* entraînent des inflammations et des lésions tissulaires plus graves que les autres souches.

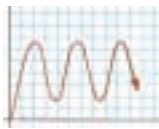
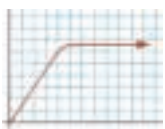
L'autre gène de *Helicobacter pylori* qui semble déterminer l'évolution de la maladie code une toxine : en 1988, Robert Leunk, de la Société Procter et Gamble a découvert qu'un extrait de culture de *Helicobacter pylori* déclenchait la formation de vacuoles, c'est-à-dire de petits trous, dans une culture de tissus. Nous avons montré qu'une toxine en est responsable ; elle est synthétisée par *Helicobacter pylori* tant *in vitro* qu'*in vivo*. En 1991, nous l'avons purifiée et nous avons confirmé que 50 à 60 pour cent seulement des souches de *Helicobacter pylori* la produisent. En mai 1992, nous avons publié une courte séquence d'acides aminés de cette toxine et, l'année suivante, nous avons cloné ce gène avec d'autres équipes ; nous l'avons nommé *vacA*.

Chacune des équipes a apporté une partie de la solution. Progressivement on a ainsi appris que toutes les souches de *Helicobacter pylori* ont un gène *vacA*, qu'elles produisent ou non la toxine en culture ; que le gène *vacA* est très variable selon les souches ; que des bactéries injectées directement dans l'estomac de souris produisent de graves lésions ; que les souches qui produisent la toxine sont plus fréquentes (30 à 40 pour cent) chez les patients atteints d'un ulcère que chez les personnes souffrant seulement d'une gastrite ; enfin, que les souches produisant la toxine ont généralement le gène *cagA* et que ce dernier est éloigné du gène *vacA* sur le chromosome.



4. UNE INFECTION A *HELICOBACTER PYLORI* évolue en quelques mois vers une gastrite chronique superficielle qui, chez la plupart des malades, persiste toute la vie quand elle n'est pas traitée. Toutefois, chez certains individus, cet état évolue vers un ulcère gastro-duodénal, une maladie proliférative, ou une atrophie gastrique grave, aboutissant à un cancer de l'estomac.

Quel traitement choisir?

ANCIENNES THEORIES		NOUVELLES THEORIES	
CAUSE 	Excès de sécrétions acides qui attaque les tissus et déclenche l'inflammation.	Helicobacter pylori libère des toxines et déclenche une inflammation de l'estomac qui peut léser les tissus.	
TRAITEMENT   	Régime léger : des laitages toutes les heures ; des repas légers ; ni citron ni mets épicés ; pas d'alcool ni de café. Les antagonistes des récepteurs de type H2 de l'histamine diminuent la concentration sanguine en histamine, ce qui diminue la production d'acide gastrique. Une intervention chirurgicale élimine les ulcères sur lesquels les médicaments n'agissent pas ou qui saignent. Dans les années 1970, c'était l'opération que l'on enseignait le plus souvent aux internes en chirurgie.	Les antibiotiques : Aux États-Unis, on recommande, depuis février 1994, de traiter l'ulcère par deux antibiotiques prescrits pendant deux semaines : l'amoxicilline ou une tétracycline, le métronidazole, et du subsalicylate de bismuth. En France, depuis octobre 1995, on recommande l'association d'un inhibiteur de la pompe à protons (qui diminue l'acidité gastrique) et de deux antibiotiques (amoxycilline et clarithromycine) ; ou l'association d'un inhibiteur de la pompe à protons, d'un des deux antibiotiques précédents et d'un antifongique (métronidazole). Le traitement est prescrit pour une semaine en moyenne.	
REUSSITE 	Lorsque les malades sont traités par des antagonistes de l'histamine, un ulcère sur deux réapparaît dans les six mois qui suivent l'arrêt du traitement, et la quasi-totalité des personnes traitées rechute deux ans après l'arrêt du traitement.	Pas de récurrence après l'élimination de l'infection bactérienne.	
COUT 	Les antihistaminiques H2 coûtent environ 300 francs par mois ; il faut compter des dizaines de milliers de francs pour l'ensemble des soins. Une opération peut coûter jusqu'à 100 000 francs.	Moins de 500 francs pour un traitement standard de deux semaines.	

Des bactéries à action lente

Au cours des 15 dernières années, Les études de *Helicobacter pylori* ont bouleversé les conceptions médicales à propos de la gastrite (que l'on pensait inévitablement associée au vieillissement de l'estomac), de l'ulcère gastrique et du cancer de l'estomac. De nouveaux traitements et des méthodes de dépistage en sont issus. En outre, le domaine de la microbiologie et de l'immunologie de l'estomac humain, que l'on commence tout juste à explorer, nous éclairera certainement sur les mécanismes des infections persistantes dans les muqueuses.

Ainsi, *Helicobacter pylori*, une bactérie à action lente, est responsable d'une inflammation chronique – l'ulcère gastrique – que l'on croyait d'origine métabolique. Or, cette infection augmente le risque d'apparition de cancers, par exemple d'adénocarcinomes et de lymphomes. Dès lors, nous postulons que des microbes per-

sistants participent à diverses inflammations chroniques d'origine inconnue, telles que la recto-colite hémorragique, la maladie de Crohn, la sarcoïdose, la granulomatose de Wegener, le lupus érythémateux et le psoriasis, ou encore à des cancers,

tels des carcinomes du côlon, du pancréas ou de la prostate. *Helicobacter pylori* est probablement la première d'une catégorie de bactéries à action lente qui seraient responsables de diverses maladies restées énigmatiques.

Martin BLASER dirige la Division des maladies infectieuses de l'Université Vanderbilt, à Nashville.

Barry J. MARSHALL et J. Robin WARREN, *Unidentified Curved Bacilli in the Stomach of Patients with Gastritis and Peptic Ulceration*, in *Lancet*, n° 8390, pp. 1311-1315, 16 juin 1984.

A. NOMURA, G.N. STEMMERMANN, P.-H. CHYOU, I. KATO, G.I. PEREZ-PEREZ et M.J. BLASER, *Helicobacter pylori Infection and Gastric Carcinoma among Japanese Americans in Hawaii*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 325, n° 16, pp. 1132-1136, 17 octobre 1991.

Pelayo CORREA, *Human Gastric Carcinogenesis: A Multistep and Multifactorial Process*, in *Cancer Research*, vol. 52, n° 24, pp. 6735-6740, 15 décembre 1992.

Enno HENTSCHEL et al., *Effect of Ranitidine and Amoxicillin plus Metronidazole on the Eradication of Helicobacter pylori and the Recurrence of Duodenal Ulcer*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 328, n° 5, pp. 308-312, 4 février 1993.

A.C. WOTHERSPOON et al., *Regression of Primary Low-Grade B-Cell Gastric Lymphoma of Mucosa-Associated Lymphoid Tissue Type after Eradication of Helicobacter pylori*, in *Lancet*, vol. 342, n° 8871, pp. 575-577, 4 septembre 1993.

Martin J. BLASER et Julie PARSONNET, *Parasitism by the «Slow» Bacterium Helicobacter pylori Leads to Altered Gastric Homeostasis and Neoplasia*, in *Journal of Clinical Investigation*, vol. 94, n° 1, pp. 4-8, juillet 1994.

Quarks et simulation numérique

DONALD WEINGARTEN

Des années de calculs numériques ont confirmé la théorie qui décrit les quarks. Simultanément les physiciens ont identifié une nouvelle particule dans des enregistrements anciens.

Plus d'un comptable fronderait les sourcils s'il apprenait que nous avons fait fonctionner en continu un supercalculateur durant plusieurs années pour n'obtenir qu'une dizaine de résultats. Pourtant nous n'avons pas perdu notre temps : seul l'ordinateur pouvait venir à bout des tâches que nous lui avons confiées, afin de résoudre des problèmes clés de la théorie des particules fondamentales.

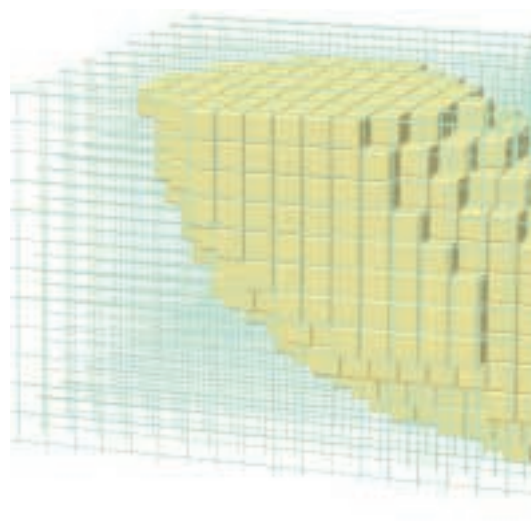
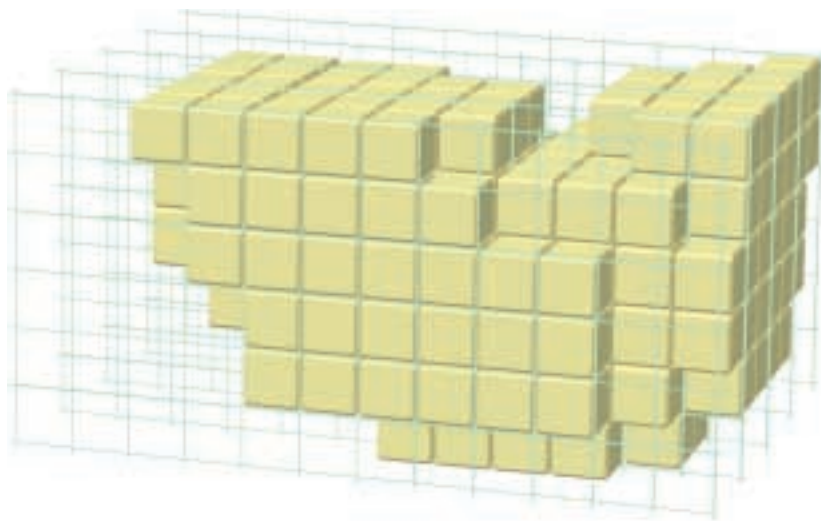
Les problèmes qui nous intéressaient sont nés de la chromodynamique quantique, la théorie qui décrit le comportement des quarks. Formulée dans les années 1970, cette théorie stipule que les quarks s'associent par deux ou par trois pour former des hadrons, c'est-à-dire des particules sur lesquelles s'exerce la force nucléaire forte. Cette famille comprend les protons et les neu-

trons, qui composent les noyaux atomiques, ainsi que d'autres particules moins familières qui apparaissent brièvement dans les accélérateurs de particules ou dans les gerbes de rayons cosmiques. Les expériences qui consistent à bombarder des hadrons à l'aide d'électrons, afin de sonder la structure interne des particules, ont contribué à corroborer la chromodynamique quantique, laquelle est devenue l'une des clefs de voûte du Modèle standard, la théorie la mieux admise de la physique des particules.

Cependant la confirmation était imparfaite, car la chromodynamique quantique aurait dû permettre de calculer la masse du proton, du neutron ou de n'importe quel hadron (le problème était de calculer la masse des hadrons et non de la mesurer, ce qui a été fait depuis longtemps ; les masses

du proton et du neutron, par exemple, ont été découvertes au début de ce siècle). Toutefois la résolution des équations mathématiques requise pour déduire de telles masses de la théorie était largement au-delà des capacités de calcul humaines. Même les ordinateurs les plus rapides des années 1970 auraient mis plus de 100 ans pour faire les calculs.

Aussi, en 1983, au Centre de recherches IBM de Yorktown Heights, nous avons commencé la construction d'un ordinateur parallèle spécialisé dans la résolution des équations de la chromodynamique quantique. L'ordinateur devait effectuer jusqu'à 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde et devait être ainsi plusieurs centaines de fois plus puissant que les ordinateurs les plus puissants de l'époque (aujourd'hui une telle puissance de cal-



cul n'a plus rien d'exceptionnel : c'est celle de 200 ordinateurs personnels équipés de la dernière puce de la Société Pentium).

En 1991, après huit ans d'études, nous avons utilisé l'ordinateur pour nos premiers calculs de chromodynamique quantique. Puis, après environ un an de calcul, notre ordinateur, GF11, a produit son premier résultat, en déterminant la masse du proton et de sept autres hadrons. Les différences entre nos prévisions et les mesures expérimentales, inférieures à six pour cent, résultaient de l'algorithme utilisé pour les statistiques plutôt que des incertitudes dues à la théorie elle-même.

En novembre 1995, nous avons achevé un autre ensemble de calculs, obtenu cette fois en faisant fonctionner l'ordinateur en continu pendant deux ans. En examinant une table de résultats expérimentaux du passé, l'ordinateur détermina la masse et le taux de désintégration d'une particule subatomique insaisissable appartenant à la sous-famille des hadrons, les «boules

de glu». Cette boule de glu, créée lors d'une expérience, n'avait pas été reconnue ; c'était la première fois que des calculs massifs identifiaient une nouvelle particule.

Simultanément, ce travail sur les masses des hadrons et sur la masse et le taux de désintégration des boules de glu a confirmé la chromodynamique quantique, et il a indiqué une nouvelle façon de traiter les problèmes de physique fondamentale. En raison des coûts exorbitants des accélérateurs de particules et de la complexité des problèmes théoriques actuels, les calculs numériques deviendront, dans certains cas, le seul recours possible pour les physiciens.

Les quarks et le champ de couleur

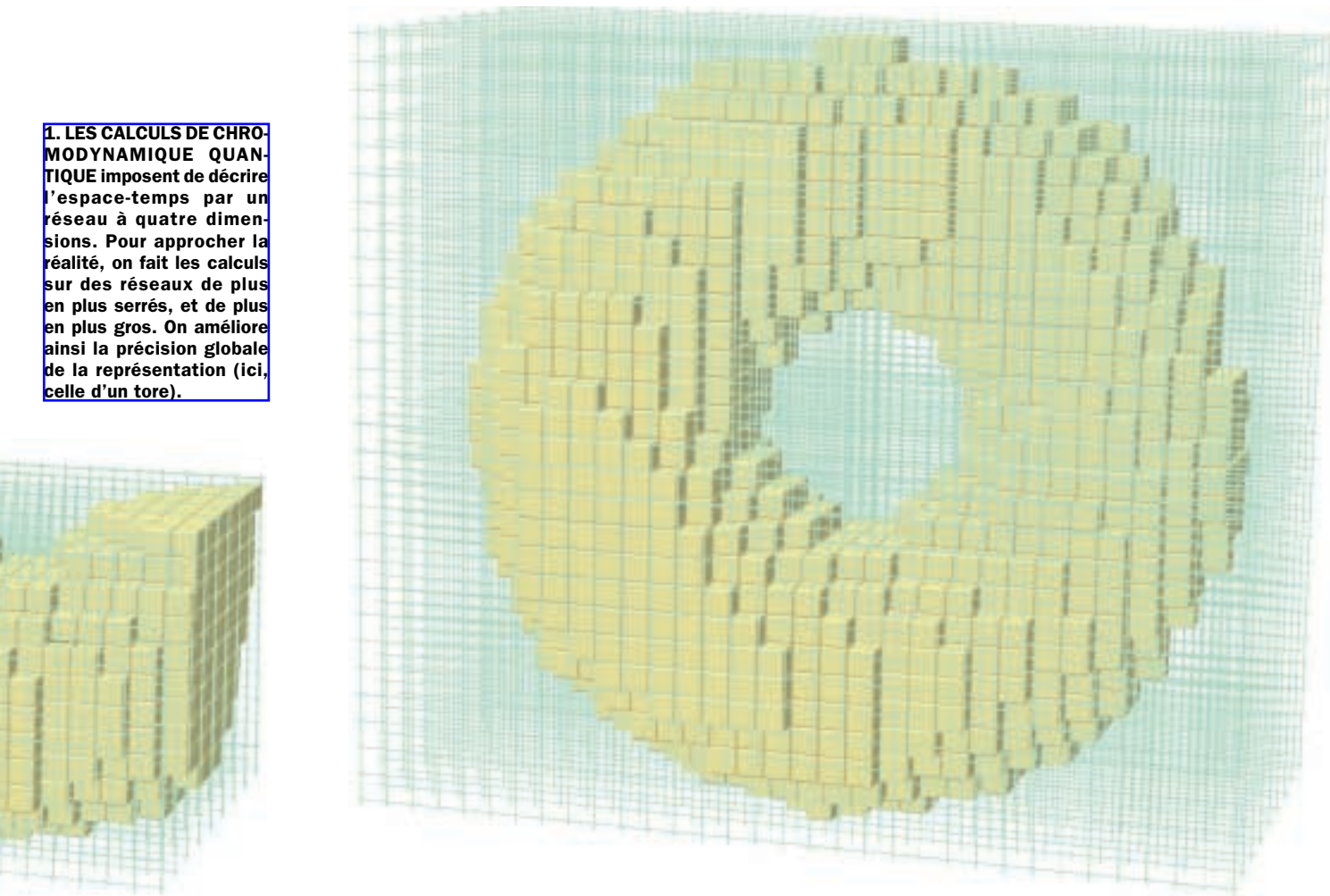
Pourquoi les quarks ont-ils un comportement si complexe ? En partie, parce qu'ils s'associent de façons variées. Il existe six «saveurs», c'est-à-dire six sortes de quarks : u , d , s , c , t

et b . Chacun peut porter l'une des trois «couleurs de charge» dénommées rouge, vert et bleu.

Ainsi les caractéristiques des quarks sont décrites par 18 combinaisons possibles de saveurs et de couleurs. En outre, à chaque type de quark correspond un antiquark, caractérisé par son antisaveur et son anticouleur. La chromodynamique quantique stipule que les quarks ou les antiquarks ne peuvent être isolés ; aussi les physiciens déduisent leurs propriétés en observant les interactions entre des paires de hadrons ou entre des hadrons et d'autres particules élémentaires, tels les électrons et les photons.

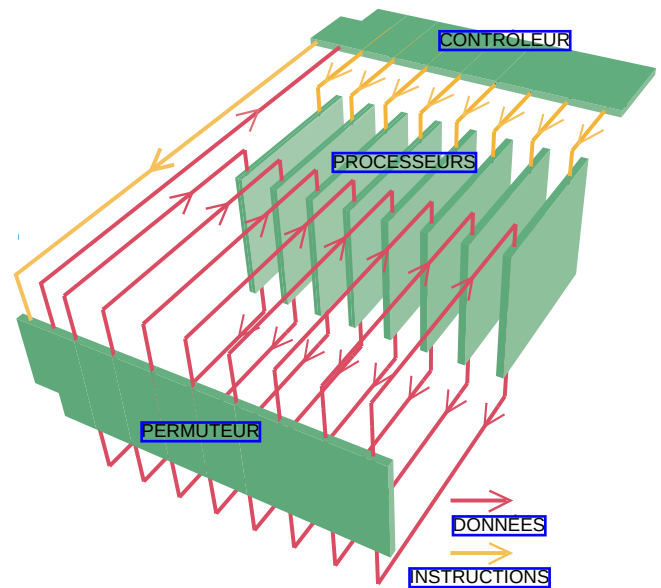
La chromodynamique quantique est complexe, parce que les charges de couleur engendrent un champ confinant, nommé «champ chromoélectrique» : les charges de couleur des quarks sont analogues aux charges électriques ordinaires, qui créent un champ électromagnétique autour des particules chargées. Et tout comme un champ électromagnétique lie les électrons chargés

1. LES CALCULS DE CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE imposent de décrire l'espace-temps par un réseau à quatre dimensions. Pour approcher la réalité, on fait les calculs sur des réseaux de plus en plus serrés, et de plus en plus gros. On améliore ainsi la précision globale de la représentation (ici, celle d'un tore).





2. LE SUPERORDINATEUR GF11 est composé de 566 processeurs qui calculent en parallèle. Le «permuteur» collecte et redistribue les données aux processeurs ; le contrôleur coordonne toutes les activités. Sur la photographie, les processeurs sont les cartes couleur bronze qui coulisent dans les armoires ; les câbles font partie du système contrôleur-permuteur.



négativement aux charges positives présentes dans le noyau d'un atome, le champ chromoélectrique lie les quarks et les antiquarks en hadrons (la matière et l'antimatière peuvent coexister pendant un temps limité avant de s'annihiler mutuellement). La chromodynamique quantique prévoit donc une vaste gamme de hadrons, qui résultent des différentes combinaisons possibles entre les 36 types de quarks et d'antiquarks.

Le champ chromoélectrique est toujours plus compliqué que le champ électromagnétique : il peut interagir fortement avec lui-même pour créer des agrégats variés. Dans un hadron, le champ se condense en une corde dense et fine qui contient une partie notable de la masse totale du hadron. C'est la raison principale pour laquelle on n'obtient pas la masse d'un hadron en additionnant simplement les masses des quarks qu'il contient. C'est aussi, en dernière analyse, la raison pour laquelle on détermine si difficilement la masse des hadrons par la chromodynamique quantique.

Les cordes du champ chromoélectrique peuvent aussi former une boucle fermée, créant ainsi une particule sans quarks ni antiquarks. Comme le champ chromoélectrique «colle» les hadrons faits de quarks, les particules composées uniquement de ce champ sont nommées des boules de glu.

Un réseau d'espace

La prévision de phénomènes physiques nouveaux à partir de la chromodynamique quantique impose une inter-

prétation mathématique plus spécifique du comportement des quarks et du champ chromoélectrique. Les méthodes numériques qui ont été appliquées sont toutes fondées sur une formulation de la théorie proposée en 1974 par Kenneth Wilson, de l'Université de l'Ohio.

K. Wilson a proposé de décrire comment la configuration des quarks et du champ chromoélectrique dans le monde réel change au cours du temps. Par exemple, dans une configuration, un quark serait sur le point d'entrer en collision, à midi pile, avec un autre quark, à une vitesse de un mètre par seconde, le champ chromoélectrique étant nul partout dans l'espace. Dans une autre configuration, à deux heures de l'après-midi par exemple, les quarks repartiraient dans des directions opposées et à 90 degrés de leur trajectoire initiale, le champ chromoélectrique étant devenu non nul en certains points de l'espace.

La théorie de K. Wilson permet de calculer la probabilité que la transition entre les deux configurations survienne entre midi et 14 heures. La chromodynamique quantique donne ainsi des prévisions, parce qu'elle permet de calculer des probabilités de transition.

La formulation de K. Wilson s'applique à un monde assez inhabituel, où l'espace-temps, continu et illimité, est approché par un réseau, c'est-à-dire une sorte de damier à quatre dimensions (trois dimensions pour l'espace et une pour le temps). On limite l'étendue de ce réseau, de sorte que l'en-

semble de l'espace et du temps est approché par un nombre fini de points ; à chaque point correspond une configuration spécifique des quarks et du champ chromoélectrique. C'est la raison pour laquelle la formulation donnée par K. Wilson est nommée chromodynamique quantique sur réseau.

Comme le monde ainsi modélisé diffère du monde réel, on cherche une meilleure description en considérant des réseaux de plus en plus serrés et de plus en plus gros : on fait tendre vers zéro la distance entre deux nœuds adjacents du réseau et l'on fait tendre vers l'infini le volume du réseau.

En principe, on doit additionner un très grand nombre de termes afin d'obtenir la probabilité d'une transition : à chacune des façons possibles de construire une sorte de tableau correspond un terme de la somme. Plus précisément, les colonnes et les rangées du tableau correspondent respectivement aux points du réseau et aux configurations de quarks et du champ chromoélectrique en chaque point.

Le nombre de tableaux possibles est vertigineux : pour chaque point du réseau, on doit utiliser 32 nombres réels pour représenter le champ chromoélectrique, de sorte que, pour un réseau de seulement dix unités de côté, dans chaque dimension, le tableau du champ est composé de 320 000 nombres réels (32 nombres pour chacun des $10 \times 10 \times 10 \times 10$ points du réseau). Pour les besoins d'un calcul d'ordre de grandeur, négligeons la

nécessité de conserver en mémoire la trace des quarks au cours des calculs et supposons (ce qui n'est pas exact) que les 320 000 nombres valent seulement zéro ou un. Chaque tableau possible serait composé d'une série de 320 000 zéros et uns, et le nombre total de ces tableaux possibles – c'est-à-dire le nombre total de termes dans la somme de K. Wilson – serait égal à 2 à la puissance 320 000, un nombre qui s'écrit en système décimal par un 1 suivi de 96 000 zéros!

Casino et mécanique quantique

En 1979, au Laboratoire de Brookhaven, Michael Creutz, Lawrence Jacobs et Claudio Rebbi reprirent une idée de K. Wilson et inventèrent une méthode numérique pour venir à bout de ces calculs rédhibitoires. Leur méthode est une forme d'«intégration de Monte-Carlo», qui consiste à approcher la solution d'un problème complexe par le biais d'un échantillonnage statistique, un peu comme on utilise des sondages pour prédire le résultat des élections (voir l'encadré ci-contre).

Plutôt que d'additionner la totalité des termes associés aux configurations possibles du réseau, on effectue un échantillonnage et l'on estime la somme cherchée en additionnant un petit nombre de termes sélectionnés aléatoirement. Par cette méthode, on traite le cas d'un réseau de dix unités de côté en seulement 20 milliards d'opérations arithmétiques. En 1979, un ordinateur de puissance moyenne effectuait un demi-million d'opérations arithmétiques par seconde : la méthode de Monte-Carlo donnait une approximation suffisamment précise en moins d'un jour.

Malheureusement on n'obtenait ce résultat qu'en appliquant une forme simplifiée de la chromodynamique quantique, où l'on ne tient compte que du champ chromoélectrique et pas des quarks. Avant d'effectuer des calculs similaires en utilisant la théorie complète, on a dû résoudre une série de problèmes techniques. En 1981, Federico Fucito, Enzo Marinari et Giorgio Parisi, à Rome, Donald Petcher et moi, à Yorktown Heights, et d'autres physiciens ont proposé des versions de l'algorithme de Monte-Carlo qui prenaient

Chromodynamique quantique et méthode de Monte-Carlo

Pour résoudre les équations de la chromodynamique quantique sur des réseaux, les physiciens utilisent la méthode de Monte-Carlo. Ils déterminent ainsi des «amplitudes de transition», c'est-à-dire la probabilité que les quarks et le champ chromoélectrique évoluent vers un état final particulier. Quand on jette un dé, l'amplitude de transition est simplement la probabilité d'apparition d'une des faces. Supposons maintenant que le dé soit pipé et que vous ignoriez quelles faces sont chargées. Le résultat dépend de l'orientation du dé avant le jet et du temps pendant lequel il est secoué avant d'être lancé.

La méthode de Monte-Carlo consiste à lancer le dé et à observer ce qui se passe, comme un joueur le ferait lors d'une véritable partie dans un casino (d'où le nom de la méthode). Pour trouver l'amplitude de transition du dé entre la position avec un point sur la face visible et la position avec six points une minute plus tard, par exemple, vous tiendriez le dé avec la face à un point en l'air, le secoueriez pendant un moment et le jetteriez de sorte qu'il s'arrête au bout d'une minute ; puis vous regarderiez si la face à six points est sortie ou non. Vous répéteriez l'opération plusieurs fois. La proportion de lancers qui aboutissent à un six serait l'amplitude de transition désirée.

En chromodynamique quantique, la détermination des amplitudes de transition n'est

pas très différente. Initialement on spécifie la configuration du champ désignée au temps initial (ce qui correspond à l'orientation particulière du dé dans la main). L'ordinateur crée alors une série temporelle aléatoire de champs selon la dimension temps du réseau (il secoue le dé), et il s'arrête dans une configuration de champ au temps final spécifié (il lance le dé). On examine alors le résultat pour déterminer si la configuration finale souhaitée a été obtenue (on regarde si un six est sorti). La proportion de tirages conduisant à la configuration finale spécifiée donne l'amplitude de transition recherchée. Une fois l'amplitude de transition trouvée, on déduit les masses des hadrons.



UN LANCER DE DÉ ne contribue à l'amplitude de transition 1-6 que si un six est finalement obtenu (premier et troisième jet).

Dans les calculs de chromodynamique quantique, on confie à chacun des 566 processeurs parallèles de l'ordinateur GF11 une partie des calculs. Les algorithmes qui engendrent des champs chromoélectriques aléatoires et déterminent les mouvements des quarks sont intégrés dans des programmes qui déterminent en détail les calculs, dans la partie confiée à chaque processeur. En chaque point du réseau, le processeur «secoue» le champ chromoélectrique – l'analogue chromodynamique de l'agitation du dé – d'une façon qui dépend du champ en ce point et aux sites voisins.

Avec le GF11, nous avons comparé des masses calculées aux masses observées dans le monde réel, où la distance entre deux points adjacents du réseau tend vers zéro et où le volume du réseau tend vers l'infini. Nous avons calculé les masses pour des volumes et des mailles de réseau différentes. Tout d'abord, nous avons considéré de grands volumes, en choisissant une maille de $1,5 \times 10^{-14}$ centimètre, connue pour donner des résultats pas trop éloignés des masses limites obtenues quand la maille tend vers zéro. Nous avons alors calculé les masses des hadrons pour différents volumes du réseau. Les résultats obtenus pour un réseau de 16 unités de côté étaient cohérents à cinq pour cent près avec les valeurs limites pour un réseau infini, et à un pour cent près pour un réseau de 24 unités de côté. Puis nous avons entrepris de faire tendre la maille du réseau vers zéro. Nous avons calculé les masses des hadrons sur un réseau de 24 unités de côté et de maille égale à 1×10^{-14} centimètre, puis sur un réseau de 32 unités de côté et de maille égale à $0,75 \times 10^{-14}$ centimètre, toujours avec un volume de 16 unités de côté. Ces trois calculs nous ont permis d'extrapoler nos prédictions à la limite où la maille du réseau tend vers zéro.

en compte la présence de quarks. Ces divers algorithmes comprenaient notamment une mesure de la difficulté pour les quarks et les antiquarks à passer de leur configuration initiale à une configuration finale.

La prise en compte des quarks et des antiquarks imposait toutefois un accroissement excessif du nombre d'opérations arithmétiques : le plus rapide des ordinateurs de l'époque n'aurait donné des résultats réalistes qu'en un siècle et demi de calcul ininterrompu !

Cette difficulté provenait de l'énergie de chaque configuration de quarks et du champ chromoélectrique : dans toute région de l'espace où un champ chromoélectrique est présent, une énergie importante est émise quand des paires de quarks-antiquarks apparaissent fugacement, puis disparaissent.

En 1981, j'ai imaginé une technique d'«approximation de valence» pour compenser cet effet : on supprime la contribution des paires de quarks-anti-

quarks en divisant toutes les charges de couleur par une constante «chromoélectrique». Puis nous avons découvert qu'on atteignait une bonne description du monde réel en considérant des réseaux de 32 unités de côté, par dimension ; 10^{17} opérations arithmétiques permettaient d'effectuer un calcul complet.

Toutefois les ordinateurs les plus rapides du début des années 1980 exécutaient 40 millions d'opérations arithmétiques par seconde, soit 10^{15} opérations par an. Ainsi, même avec la méthode de l'approximation de valence, le calcul des masses des hadrons aurait pris 100 ans. C'était encore excessif.

Enfin des prévisions

En 1983, avec mes collègues Monte Deneau et John Beetem, j'ai entrepris la construction d'un ordinateur spécialisé dans les calculs de chromodynamique quantique. Nous visions une

puissance de 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde, soit 11 gigaflops (d'où le nom de l'ordinateur : GF11).

Pour obtenir une telle machine, 250 fois plus rapide que les meilleurs ordinateurs de l'époque, nous avons prévu de faire travailler 566 processeurs en parallèle. La fréquence d'horloge, correspondant à la vitesse à laquelle un processeur peut exécuter une addition ou une multiplication, devait être égale à 50 milliards de hertz, et chaque processeur, d'une capacité de 20 mégaflops, devait envoyer une donnée aux autres processeurs toutes les 200 nanosecondes (plusieurs dizaines de superordinateurs d'aujourd'hui sont plus rapides que GF11 ; le plus rapide de tous est environ dix fois plus rapide). Avec James Sexton, j'ai réalisé les programmes du système d'exploitation, du compilateur et un jeu de programmes de diagnostic du matériel. Puis nous avons collaboré avec un groupe important du Centre de recherche pour la mise au point finale de la machine.

À la fin de 1991, nous avons fait les premiers calculs de masses hadroniques. Nous avons d'abord étudié les masses de 11 hadrons formés de combinaisons des trois saveurs des quarks et des antiquarks les plus légers, u , d et s . Les quarks u et les quarks d sont les constituants des neutrons (un u et deux d) et des protons (deux u et un d). Les quarks s sont présents dans un grand nombre de hadrons instables. Nous avons calculé la masse de chaque hadron pour des réseaux de tailles diverses. Dans chaque cas, nous avons ajusté des paramètres en utilisant la masse connue de trois hadrons : nous avons modifié ces paramètres jusqu'à ce que la masse calculée concorde avec la masse connue.

Il nous est ainsi resté huit prédictions de masse à faire pour chaque type de réseau. Pour trouver la valeur des masses aux limites, quand le réseau a un volume infini et une maille de longueur nulle, nous avons extrapolé les prédictions obtenues pour des réseaux de volume croissant et de maille décroissante.

La différence entre chaque prédiction et la masse déterminée expérimentalement a été, dans tous les cas, inférieure à six pour cent, ce qui était dans la gamme des incertitudes que nous attendions, du fait de l'utilisa-

Calcul et physique théorique

La simulation numérique sur réseau prend une importance croissante dans un domaine de la physique des particules nommé physique des interactions fortes. La disponibilité de moyens de calcul de puissance, rapidement croissante, permet maintenant une exploration de la chromodynamique quantique dont l'étude avait résisté à des efforts plus analytiques. Des résultats, que je qualifierais de semi-quantitatifs, ont été obtenus, qui valident définitivement, à la fois la théorie et cette démarche numérique. Il est possible d'envisager dans un avenir proche, non seulement une reproduction de résultats déjà établis expérimentalement, mais aussi la prédiction de résultats nouveaux. Il faut noter toutefois que la prise en compte précise des degrés de liberté des quarks exigera des puissances de calcul encore supérieures, probablement d'un facteur 100 à 1 000.

Dans certains domaines de la physique, la simulation numérique pourrait-elle, à terme, remplacer l'expérience quand cette dernière est trop

difficile ou trop onéreuse? La simulation numérique ne peut intervenir que dans des domaines où la théorie a déjà des bases suffisamment solides, elle ne peut rien tant que les modèles physiques ne sont pas encore connus. Croire qu'un jour le calcul rendra l'expérience totalement inutile est absurde. Ainsi il est très peu vraisemblable que la simulation numérique joue le moindre rôle dans la solution d'un problème aussi fondamental que celui de la particule de Higgs.

La France est peu présente dans ce domaine d'activité, alors même que nos physiciens (en particulier au Service de physique théorique du CEA-Saclay) ont contribué de façon très importante aux premières études de la chromodynamique sur réseau. Cependant l'absence de moyens de calcul compétitifs pendant les années 1980, au moment où le sujet s'est développé, ont conduit plusieurs équipes à abandonner le domaine. La situation est aujourd'hui meilleure, mais le changement est apparu tardivement.

Jean ZINN-JUSTIN
CEA-Saclay

tion de la méthode de Monte-Carlo. Bien que ces résultats aient été obtenus dans le cadre de l'approximation de valence, cette approximation n'aurait probablement pas fourni huit résultats corrects si la chromodynamique quantique avait été faussée. Autrement dit, nos résultats confirment à la fois les prédictions de masse de la chromodynamique quantique et la fiabilité de l'approximation de valence.

Plus récemment, nous avons exploré les propriétés de la plus légère des boules de glu (les boucles fermées du champ chromoélectrique, mentionnées précédemment). Les premiers calculs, effectués par des ordinateurs plus lents que le *GF11*, étaient trop peu précis pour que l'on identifie clairement des boules de glu. En utilisant 448 des processeurs de *GF11* en continu pendant deux ans, nous avons calculé la masse de la boule de glu la plus légère et étudié sa désintégration en d'autres particules plus stables. Les calculs ont montré que cette particule était apparue dans des expériences effectuées au cours des 12 dernières années ; personne ne l'avait reconnue, car il n'existait pas de profil suffisamment détaillé de ses propriétés. Ainsi nos calculs «découvraient» une particule subatomique.

Malgré ces succès, il reste à confirmer directement la chromodynamique quantique, sans aucune approximation. À cette fin, on devra utiliser des ordinateurs plusieurs centaines de fois plus rapides que le *GF11* ou des algorithmes des centaines de fois plus efficaces que les meilleurs algorithmes actuels. Trois machines de cette envergure sont étudiées à l'Université Columbia, à l'Université de Rome et au Japon. On espère que ces ordinateurs expliqueront également certaines diffusions de particules observées dans les collisionneurs.

La physique théorique expérimentale

Au-delà de la découverte des masses des hadrons et des boules de glu, nos calculs sont le signe d'un changement fondamental de la physique des particules. Alors que les méthodes numériques étaient utilisées dans la plupart des disciplines, papier et crayon restaient les outils des physiciens théoriciens. Nos études numé-

HADRON	MASSE (EN MILLIONS D'ÉLECTRONVOLTS)	
	CALCULÉE	OBSERVÉE
KAON (Dans un état excité)	898 ± 12	896
PROTON	936 ± 80	941
PHI	1 026 ± 25	1 022
DELTA	1 205 ± 94	1 235
SIGMA	1 391 ± 62	1 388
XI + SIGMA – PROTON	1 484 ± 57	1 576
XI (Dans un état excité)	1 582 ± 50	1 537
OMEGA	1 768 ± 69	1 676
BOULE DE GLU LA PLUS LÉGÈRE	1 740 ± 70	1 710

3. LES MASSES CALCULÉES DES HADRONS sont comparées aux valeurs mesurées expérimentalement. Les calculs sont plus simples quand on additionne les masses de la particule xi, de la particule sigma et du proton.

riques, toutefois, se sont imposées parce que les méthodes analytiques avaient échoué et que les ordinateurs étaient devenus assez puissants pour exécuter les algorithmes essentiels.

Cette évolution, du papier à l'ordinateur, a toutefois des conséquences profondes, car, dans les travaux théoriques, sur le papier, chaque étape peut (en principe) être vérifiée ; en étudiant l'enchaînement logique des étapes d'un calcul, on confirme le résultat. En revanche, la physique expérimentale ou le calcul numérique ne donnent pas cette certitude, cette confiance absolue dans les résultats. Dans ces deux cas, des résultats jugés plausibles sont acceptés si suffisamment de tentatives pour les réfuter ont échoué. Nous acceptons le résultat expérimental que toute pierre tombe, et non l'inverse, car personne n'a jamais vu une pierre s'élever spontanément dans l'air ; néanmoins, du strict point de vue logique, il n'est pas certain que les pierres tombent toujours.

Notre travail a été l'analogue d'une recherche infructueuse de pierre qui

ne tombe pas. Toutefois, si nous avions pu calculer la masse du proton sur un réseau à maille bien plus petite que celle que nous avons effectivement utilisée du fait de notre puissance de calcul limitée, nous aurions peut-être trouvé une valeur de 2 000 mégaélectronvolts (un mégaélectronvolt, ou MeV, correspond à $1,78 \times 10^{-30}$ gramme), en contradiction avec notre valeur extrapolée de $1,67 \times 10^{-27}$ gramme. Par conséquent, notre prédiction de la masse du proton est testée par la série de nombres entrant dans notre extrapolation, mais elle n'est pas vraiment prouvée.

Nos travaux sont ainsi, ce qui semble une contradiction, de la «physique théorique expérimentale». Compte tenu de la complexité des théories physiques, du coût des énormes projets expérimentaux et de l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs, cette physique théorique expérimentale pourrait, dans certains domaines de la physique, devenir la façon la plus accessible d'étudier les phénomènes naturels.

Donald WEINGARTEN est physicien au Centre de recherches IBM Thomas Watson, à Yorktown Heights.

Ta-Pei CHENG et Ling-Fong LI, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984.

D. WEINGARTEN, *Lattice Quantum Chromodynamics*, in *Particles, Strings and Supernovae*, sous la direction de A. Jevicki et C.-I. Tan, World Scientific, Singapour, 1989.

H.J. ROTHE, *Lattice Gauge Theories*, World Scientific, Singapour, 1992.

F. BUTLER, H. CHEN, J. SEXTON, A. VACCARINO et D. WEINGARTEN, *Hadron Mass Predictions of the Valence Approximation to Lattice QCD*, in *Physical Review Letters*, vol. 70, n° 19, pp. 2849-2852, 10 mai 1993.

M. CREUTZ, *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1993.

I. MONTVAY et G. MUNSTER, *Quantum Fields on a Lattice*, Cambridge University Press, 1994.

Quads et quazars

IAN STEWART

Dans le jeu de Quads, on essaye de former des carrés sur une grille tronquée.

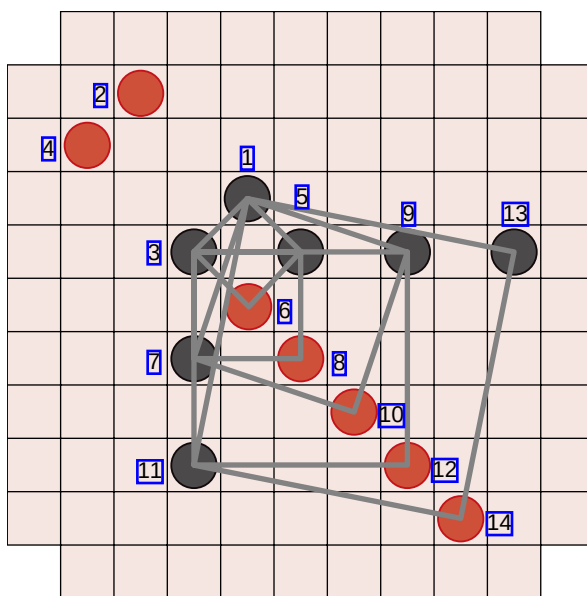
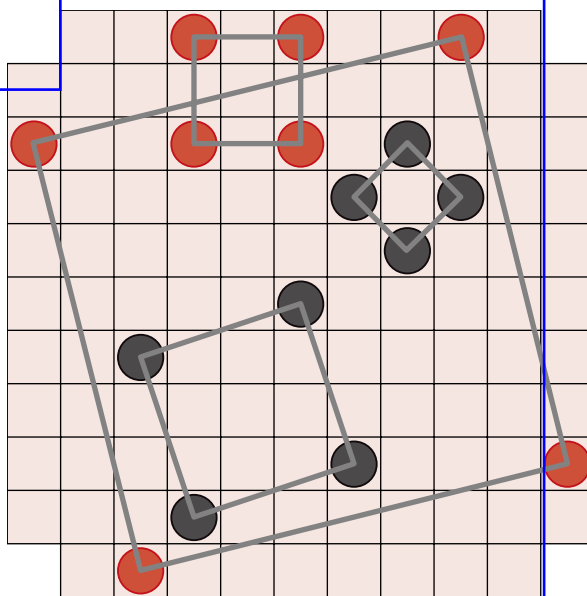
Un informaticien de mes amis, Keith Still, dirige une société qui étudie par simulation les mouvements de foule au stade de Wembley, en Angleterre. Outre ses préoccupations sur la dynamique des foules, K. Still est une personne inventive : il m'a fait part d'un jeu qu'il a conçu il y a quelques années.

Ce jeu, que K. Still a nommé *Quads*, se joue sur une grille formée d'un carré de 11 cases de côté, auquel on a retiré les quatre cases des coins. Le nombre total de cases est donc 117. Les deux joueurs possèdent chacun 20 pions (rouges pour l'un et noirs pour l'autre), nommés *quads*, et sept (ou six pour un jeu court) pions blancs nommés *quazars*. Ils jouent à tour de rôle en plaçant un de leurs *quads* sur une case inoccupée de la grille. Le but du jeu est de former un carré quelconque avec ses *quads* (voir la figure 1 en haut).

En plaçant le quatrième sommet de son carré, un joueur crie : «Quad!» pour annoncer sa victoire. Il arrive qu'un joueur ne remarque pas un carré qu'il a formé au cours du jeu. Si, par chance, l'autre joueur s'en aperçoit, il peut crier : «Quad!» quand vient son tour. Tous ces oublis doivent être relevés dans le cours de la partie.

Le bas de la figure 1 montre une manière pour les noirs de placer une suite de *quads* de sorte que, à chaque tour, les rouges sont forcés de jouer sur une case donnée pour empêcher la victoire des noirs au coup suivant. Ce type de jeu forcé n'est guère intéressant et c'est pour cette raison que les *quazars* entrent en action. Ils sont utilisés précisément pour empêcher l'adversaire de terminer un carré. Ces pions ne comptent donc pas pour la formation des carrés. Ils sont

d'ailleurs blancs pour les deux joueurs. Il y a plusieurs règles pour les utiliser : d'abord, il faut attendre son tour, ensuite, on peut jouer autant de *quazars* que l'on désire, de un à six, mais on doit les jouer avant de jouer son



1. UN CARRE GAGNANT peut être de taille quelconque (en haut), de sorte que les noirs peuvent réaliser une suite de mouvements qui, en l'absence de *quazars*, forcent le jeu des rouges (en bas).

quad. Puis l'on joue ce dernier pour achever son tour.

Deux règles techniques subsistent. Si à la fin de la partie, un joueur a laissé une position qui aurait conduit nécessairement à une victoire au tour suivant s'il avait eu d'autres *quads* à jouer, ce joueur est déclaré vainqueur. Si la partie s'achève sans qu'aucun joueur ait formé un carré et si les joueurs ont joué des nombres différents de *quazars*, celui qui en a utilisé le moins gagne.

En raison du grand nombre de carrés réalisables, les *Quads* peuvent être étonnamment complexes. Par exemple, il est relativement aisé d'effectuer un coup «bicarré», qui crée deux carrés potentiels simultanément – un carré potentiel étant, bien entendu, un carré à trois sommets déjà occupés. L'adversaire peut contrer ces coups bicarrés en un seul tour à l'aide de ses *quazars*. Les coups bicarrés sont favorables car ils obligent l'adversaire à utiliser des *quazars*.

L'expérience montre que placer un *quad* dans la case centrale est une ouverture raisonnable. Par la suite, on doit surveiller les carrés potentiels, ainsi que ceux formés accidentellement qui peuvent avoir une orientation inattendue. Il faut également guetter les carrés multiples pouvant conduire l'adversaire à des coups bicarrés. La figure 2 vous plonge dans le jeu ; tous les carrés potentiels sont indiqués.

VARIANTES

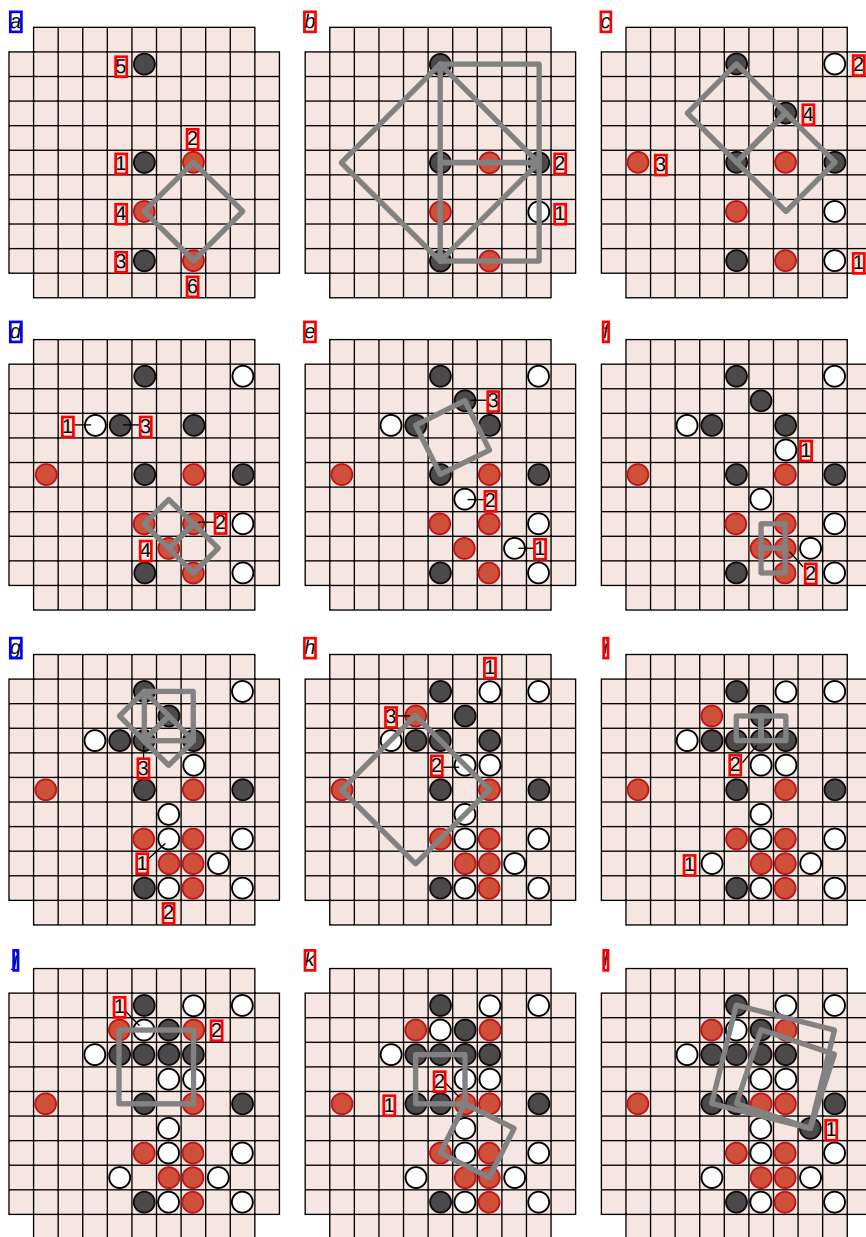
Si ce jeu vous amuse, vous pouvez imaginer un certain nombre de variantes adaptées à diverses circonstances. Par exemple, de jeunes enfants trouveront le jeu plus accessible sur une grille plus petite et avec moins de *quazars* (5 pour une grille de 10 par 10, 4 pour une grille de 9 par 9, et ainsi de suite). De même, si trois joueurs jouent simultanément, chacun reçoit quatre *quazars* et 20 *quads* de trois couleurs différentes (par exemple, noir, rouge et jaune). Quatre joueurs auront chacun trois *quazars*, et cinq ou six joueurs, chacun deux.

K. Still décrit aussi d'autres variantes de ce jeu. Les *Quads* baladeurs sont analogues au jeu classique à deux joueurs, mais chaque joueur n'a que six *quads*

et six *quazars*. Une fois tous les *quads* posés, pour jouer son tour, il faut déplacer un de ses *quads* sur une case libre de son choix. À tout instant, on peut jouer ses *quazars*, mais une fois joués, ils ne peuvent être déplacés. Dans les *Polyquads*, chaque joueur a des *quads* de deux couleurs (voire plus), et il joue un *quad* de chaque couleur à chaque tour. Il ne crie : «Quad!» que lorsqu'il a formé un carré avec quatre *quads* d'une même couleur.

Dans le jeu des *Quads* rapides, chaque joueur reçoit six *quads* et six *quazars*. À chaque tour, il peut soit placer un nouveau *quad*, soit en déplacer un déjà posé. Les *quazars* sont joués, comme d'habitude, avant les *quads*. Les *Quads* croisés requièrent, comme au bridge, quatre joueurs formant deux équipes de deux. Les joueurs d'une même équipe s'assoient face à face autour de la grille ; une équipe a des *quads* noirs, l'autre des rouges. On tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, et il est interdit de parler. Vous devez comprendre quelle est la stratégie de votre partenaire avant que vos adversaires ne l'aient fait. Cependant, vous pouvez lui envoyer des signaux, par exemple en agitant vos bras, en frappant la table de votre tête ou en sautant sur votre chaise. Si des lecteurs ont l'idée d'autres versions amusantes de ce jeu, qu'ils me les communiquent ; elles seront publiées dans «Réaction».

2. CET EXEMPLE DE JEU montre tous les carrés potentiels lorsqu'ils apparaissent dans la partie. Les nombres indiquent l'ordre dans lequel les pièces ont été jouées. Après dix coups, les rouges ont épuisé leurs *quazars*, et les noirs gagnent en jouant un coup bicarré.



Réaction

Le numéro 218 de *Pour la Science* (décembre 1995) a engendré nombre de lettres éclaircissant l'historique de la suite de «Morse-Hedlund» *non-3* : 0110100110010110...

Jeffrey Shallit, de l'Université de Waterloo, écrit : «De nos jours, cette suite est attribuée au mathématicien norvégien Axel Thue, qui traita du problème des répétitions dans une suite d'articles à partir de 1906. Il prouva même qu'elle est sans chevauchement, une propriété encore plus forte. Son application aux échecs fut, remarquée pour la première fois, dans un résumé de Morse dans le *Bulletin de la société américaine de mathématiques*, vol. 44, n° 9, 1938, p. 632. Pour avoir une vision plaisante de cette application du travail de Morse, voir *A mathematician gives an hour to chess*, par D. MacMurray, dans le numéro 10 d'octobre 1938 de la *Chess Review*.»

Jean Brette, du Palais de la découverte, nous signale une référence plus ancienne «cette suite avait déjà été rencontrée

implicitement en 1851 par le mathématicien français E. Prouhet (*Compte rendus de l'académie des sciences*, vol. 33, n° 8, 25 août 1851, p. 225) dans l'étude d'un résultat intéressant : on peut séparer les entiers compris entre 1 et 2^m en deux classes A et B comportant le même nombre d'éléments de façon que la somme des puissances k ième des éléments de A soit égale à celle des puissances k ième des éléments de B, pour tout k inférieur à m . Pour cela on construit la suite de Morse M_m de longueur 2^m . L'ensemble A contient alors tous les entiers j tels que le j ième terme de M_m soit égal à 0 et B contient les autres. Par exemple, pour $m = 3$, la suite M_3 est 01101001, $A_3 = \{1, 4, 6, 7\}$, $B_3 = \{2, 3, 5, 8\}$ et on vérifie bien que $1 + 4 + 6 + 7 = 2 + 3 + 5 + 8 = 18$ et que $1 + 16 + 36 + 49 = 4 + 9 + 25 + 64 = 102$. Dans son article, Prouhet généralise ce résultat aux entiers compris entre 1 et n^m qu'il sépare en n classes vérifiant les mêmes égalités».

Des pois sans poids

SHAWN CARLSON

Faites germer des graines en pesanteur réduite.

Des phénomènes aussi remarquables qu'insoupçonnés ont lieu lorsque vous inclinez une plante : des hormones nommées auxines se rassemblent dans la partie inférieure des racines et de la tige. Elles stimulent la croissance et la division des cellules de la tige, de sorte que le bas de la tige croît plus vite que le haut et provoque son redressement. Dans les cellules des racines, au contraire, les auxines retardent la croissance cellulaire : les cellules pauvres en auxines, proches du haut des racines, se développent beaucoup plus vite que les cellules riches en auxines du bas des racines, ce qui dévie ces

dernières vers le bas. Ainsi les plantes couchées s'alignent sans cesse avec la force de pesanteur.

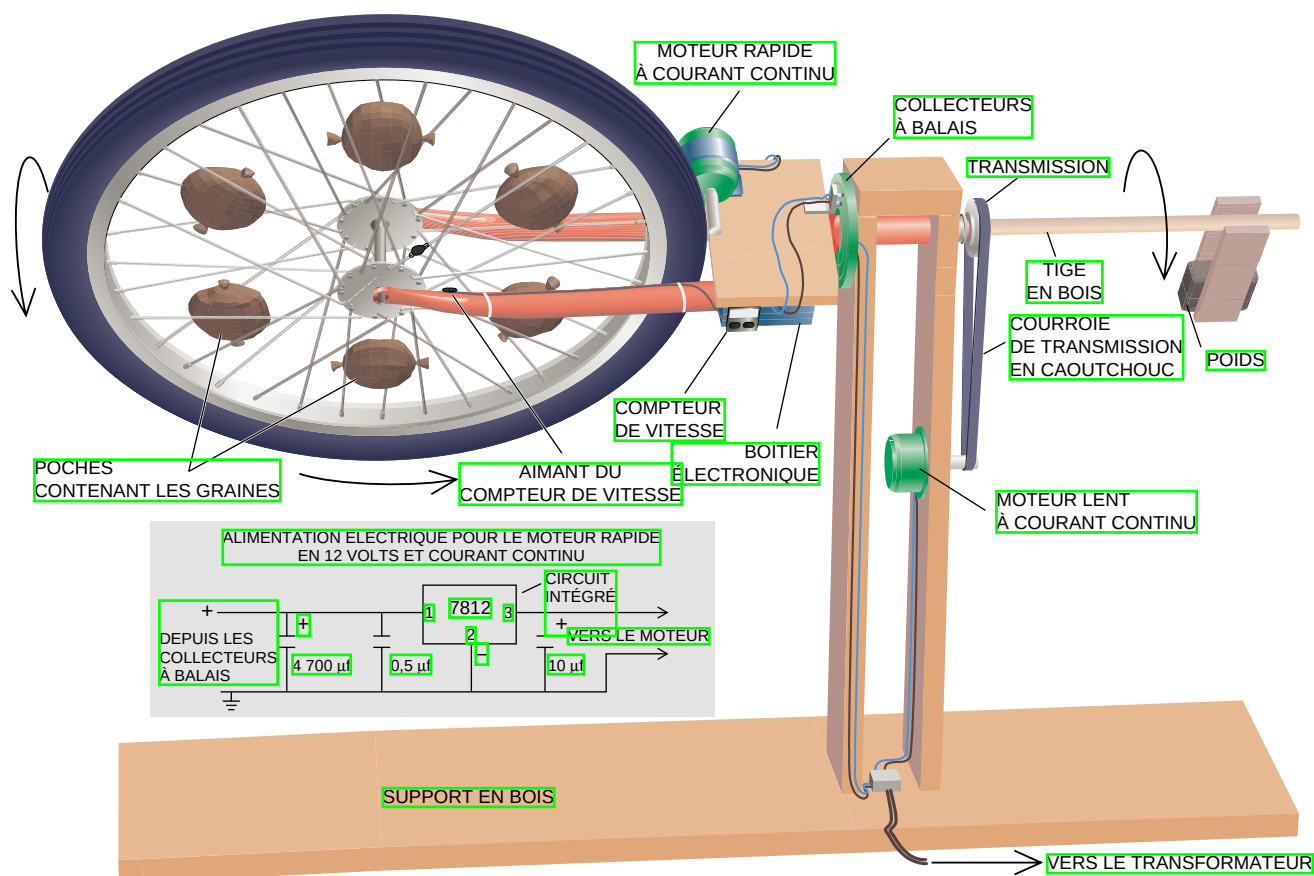
Les botanistes nomment géotropisme cette réaction des plantes à la pesanteur. Au début du XIX^e siècle, ils explorèrent le géotropisme en cultivant des plantes sur des roues en rotation, les exposant ainsi à des forces centrifuges ajoutées à la gravité ; les plantes poussent alors dans la direction opposée à la force résultante qui leur est appliquée, comme l'a montré le Palais de la Découverte.

Les botanistes ont d'abord observé que les plantes réagissent lentement à

la gravité : la plupart des plantes doivent être courbées pendant plus d'une minute avant que les auxines commencent à se répartir. Puis, au début du siècle, ils utilisèrent un appareil nommé clinostat, afin d'étudier les réactions des végétaux dans un environnement où la gravité est presque nulle. Les clinostats restent utilisés aujourd'hui : en faisant tourner lentement la plante aussi bien verticalement qu'horizontalement, le clinostat empêche celle-ci de s'orienter sur la gravité terrestre. La plante pousse alors comme s'il n'y avait pas de gravité du tout. Les clinostats ont fasciné des générations de scientifiques amateurs.

Curieusement, les biologistes professionnels ont prêté peu d'attention à ce qui est peut-être le plus intéressant domaine de recherche : le comportement entre 0 et 1 *g* (où *g* représente l'accélération communiquée à toute masse par la force de pesanteur terrestre, soit environ 9,8 mètres par seconde au carré). C'est une bonne nouvelle pour les amateurs, car un peu d'application peut leur valoir des découvertes originales.

Je vous propose d'utiliser une roue de bicyclette comme plate-forme rotative du dispositif. En choisissant bien la



UNE ROUE DE BICYCLETTE qui tourne transversalement et autour de son moyeu permet à des graines, contenues dans des poches fixées aux rayons, de germer comme à bord d'un vaisseau spatial.

En construisant l'alimentation électrique du moteur rapide, assurez-vous que le condensateur de 4 700 microfarads est situé à plus de cinq centimètres du circuit intégré de type 7812.

vitesse de rotation de la roue et en plaçant les graines à différentes distances de son moyeu, vous ferez germer des graines dans des conditions de pesanteur variées. Observez les accélérations à partir desquelles les plantes commencent à réagir à la gravité et découvrez comment des plantes pousseraient sur Mars (dont la gravité est égale à 0,4 g environ).

Pour obtenir une accélération qui soit en moyenne égale à celle de la rotation, vous devrez simultanément faire tourner la roue autour de son axe et autour d'un axe horizontal. Pour réaliser l'ensemble du système, vous aurez besoin de pièces détachées de bicyclette, telles une fourche avant et sa colonne de direction, que vous vous procurerez pour rien si vous récupérez des pièces détachées d'occasion. Des pièces en bois supporteront le cadre et la roue. Faites un trou à une extrémité de deux lattes de sommier en pin de 2,5 centimètres d'épaisseur ; fixez les extrémités inférieures à une planche qui servira de support, de sorte que les deux lattes soient verticales (voir la figure) et passez la colonne de direction dans les trous. Pour le système de transmission, allez au rayon plomberie ou tuyauterie d'un magasin de bricolage pour acheter cinq centimètres d'un tuyau de plastique de gros diamètre. À l'intérieur de cet anneau, placez un bouchon de bois au centre duquel vous aurez percé un trou, puis collez le tout au bout de la colonne de direction, à la résine époxy.

Insérez ensuite une tige de bois à travers la transmission et la colonne de direction, et fixez-y un poids du type de ceux que les plongeurs s'attachent à la ceinture. Fixez une planche de bois de 8 x 18 centimètres à une extrémité de la tige et attachez temporairement le poids à cette planche avec une ficelle. Orientez la roue de sorte que la courbure de la fourche pointe vers le haut. Faites glisser la tige dans la colonne de direction et ajustez la position du poids à la fois horizontalement et verticalement, jusqu'à ce que la roue et le poids s'équilibrent. Collez alors la tige à la résine époxy et achevez la fixation définitive du poids.

Pour annuler les effets de la gravité, la roue doit faire un tour complet environ une fois par minute. À cette fin, je vous propose d'utiliser un moteur à rotation lente (0,28 tour par seconde) et de relier l'arbre du moteur à la transmission par une courroie en caoutchouc que vous trouverez chez un garagiste. Si votre moteur tourne à un régime très différent de 0,28 tour par seconde, jouez sur le diamètre de votre

L'accélération sur une roue

Une graine sur une roue en rotation subit une accélération centrifuge égale à $(2\pi f)^2 r$, où f est la fréquence de rotation et r la distance de la graine par rapport au moyeu. La formule permettant de déterminer à quelle fréquence on doit faire tourner la roue pour obtenir l'accélération a souhaitée est $f = 1/2\pi\sqrt{(a/r)}$, où a est l'accélération. Par exemple, pour produire une accélération de 9,8 mètres par seconde au carré (soit 1 g) au niveau de la jante d'une roue de 0,3 mètre de rayon, la roue doit tourner à 0,91 tour par seconde. La fréquence f_R à laquelle le moteur rapide fera tourner la roue est $f_m(r_m/R)$, où f_m est la fréquence de rotation du moteur (ici 192 tours par seconde), r_m le rayon de l'arbre du moteur (environ un millimètre) et R le rayon de la roue. Pour trouver l'accélération à n'importe quelle distance r du moyeu de la roue, utilisez la formule :

$$a = 7,72(v^2/R)(r/R)$$

où r et R sont exprimés en centimètres, et v est la vitesse lue sur l'indicateur de vitesse et exprimée en kilomètres par heure.

transmission ou ajoutez une transmission intermédiaire à votre arbre moteur pour obtenir le bon rapport.

À l'aide d'un second moteur, plus rapide, vous ferez tourner la roue de bicyclette autour de son axe pour imposer la gravité artificielle. J'ai moi-même utilisé un moteur fonctionnant au courant continu de 12 volts qui tournait à 192 tours par seconde. Assurez-vous que la bande de roulement est bien lisse et, pour calculer à quelle fréquence tourne la roue, consultez l'encadré ci-dessus.

Dans mon clinostat, le rayon de la roue était égal à 30 centimètres, et la vitesse du moteur à 192 tours par seconde : la roue tournait à 0,64 tour par seconde. Vous pouvez augmenter l'efficacité du moteur en augmentant le diamètre de son arbre : entourez ce dernier de quelques tours de ruban adhésif ou de sparadrap solide ; vous atteindrez ainsi facilement une fréquence de 1,5 tour par seconde. Un transformateur alimentera ce moteur par l'intermédiaire de deux collecteurs à balais, tels que ceux des moteurs électriques. Le circuit décrit sur la figure réglera le courant.

Enfin vous contrôlerez l'accélération centrifuge à l'aide d'un compteur de vitesse pour bicyclette ; trouvez-en un qui utilise un petit aimant placé sur un rayon. Monté près de l'axe de la roue, l'aimant mesurera la vitesse à 0,1 kilomètre à l'heure près.

La croissance en faible gravité a été si peu étudiée que vous obtiendrez des résultats originaux quelle que soit la plante que vous étudierez. J'ai moi-même étudié le maïs. Après avoir laissé les graines germer pendant plusieurs jours, j'ai mesuré la hauteur des germes et leur inclinaison moyenne, pour diverses accélérations. À l'accélération de 1 g, les plantes poussent très droites ;

à très faible accélération, elles commencent à se tordre. En faisant pousser des plantes à différentes distances du moyeu de la roue, vous verrez à partir de quelle accélération les effets de la gravité commencent à se faire sentir sur les plantes.

Mettez cinq graines dans une petite poignée de terreau et placez-les dans un vieux bas de nylon (formez une petite poche en nouant de la ficelle de part et d'autre de la terre, puis en coupant les extrémités du bas qui dépassent). Ces petits paquets légers maintiennent les graines et sont faciles à arroser. Pour avoir une bonne statistique, préparez une trentaine de plantules pour chaque valeur d'accélération : placez six de ces poches à la même distance du moyeu. Disposez-les symétriquement sur les rayons de la roue, de sorte que cette dernière reste bien équilibrée. Vous pouvez placer autant de poches qu'il y a de place et les mettre à des distances différentes du moyeu afin de tester simultanément l'effet de plusieurs accélérations. Retirez les graines après qu'elles auront germé entre trois et six jours. Mesurez ensuite l'inclinaison, soit directement, soit après avoir replanté les graines dans des conditions normales pour voir comment elles se réadaptent.

Pour plus d'informations (en anglais) sur cette expérience, consultez le serveur de l'Association des scientifiques amateurs sur le réseau Internet, à l'adresse <http://www.thesphere.com/SAS/>, ou bien envoyez, à la revue Pour la Science, une enveloppe auto-adressée.

Shawn CARLSON est professeur de physique à l'Université de San Diego.

Du mouvement dans la roche

Non, ce n'est pas une bonne peinture moderne. C'est un petit échantillon de roche dont on a confectionné une lame très mince (trois centièmes de millimètre d'épaisseur) et que l'on regarde au microscope polarisant ; la lumière polarisée permet de visualiser la structure cristalline de la roche. L'échantillon a été prélevé dans les Pyrénées, à Lourdes. Il y a un peu plus de 50 millions d'années, elle a été comprimée dans la chaîne des Pyrénées en voie de formation, par suite de la collision entre les plaques Europe et Ibérie. L'Espagne se rapprochait alors de l'Europe en déformant toute l'écorce terrestre.

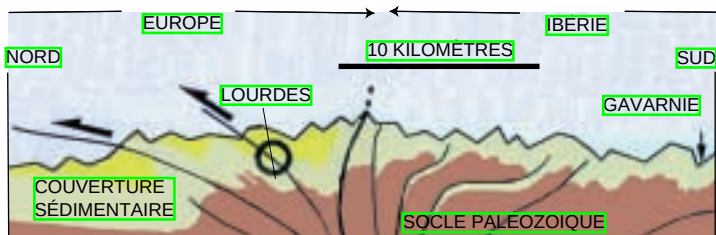
La roche s'est d'abord déposée sous forme de sédiment argileux dans une mer qui à cette époque recouvrait toute la région. Ensuite elle a été entraînée jusqu'à une profondeur d'environ dix kilomètres le long d'une grande faille (voir la figure 1). Sous les effets du réchauffement et des fortes pressions à cette profondeur, des cristaux métamorphiques de pyrite ont d'abord cristallisé dans la roche. La roche s'est ensuite très doucement déformée, pendant plusieurs millions d'années et elle a acquis un clivage ardoisier que l'on appelle «schistosité».

Les deux photographies nous livrent quelques secrets sur ces grands événements géologiques. On perçoit d'abord une incontestable impression de mouvement, évoquée par des fibres courbées et colorées qui se greffent sur les cristaux de pyrite ; chacune des fibres est un cristal de quartz ou de calcite très fin. La pyrite est un minéral très dur comparé à l'ardoise qui l'entoure et cela fait qu'au cours de l'étirement de la roche, celle-ci s'écarte des grains de pyrite en créant un vide qui se remplit de liquide. À grande profondeur, ces liquides cristallisent en fibres, qui s'allongent au fur et à mesure que l'ardoise est plus étirée, en constituant ce qu'on appelle des «ombres de pression».

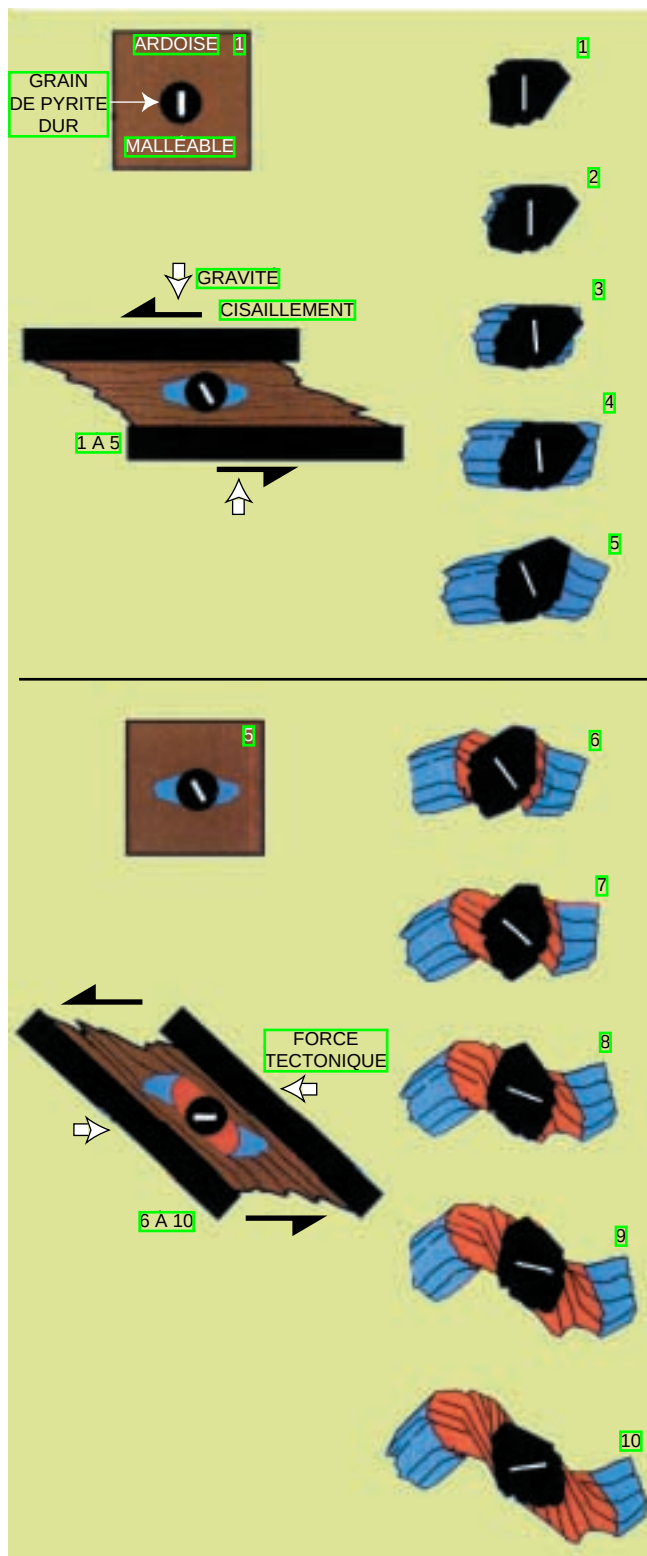
Ces fibres sont donc le résultat d'une déformation géologique lente et le géologue les utilise pour reconstituer l'histoire des mouvements. Sur la figure de gauche, on voit comment notre échantillon enregistre deux épisodes de déformation successifs, avec des directions de fibres spécifiques. On devine une première phase de cisaillement avec une importante influence de la gravité, due au poids des roches supérieures. Il s'est produit ensuite une augmentation des forces tectoniques (horizontales) associée à l'affrontement entre l'Ibérie et la France. Dans un jeu d'équilibre, les forces tectoniques et gravitaires ont ensemble fait tourner les pyrites lorsque les Pyrénées s'avançaient sur son avant-pays.

Pour qui sait bien regarder, cette petite roche de Lourdes livre des messages colorés sur la formation de la chaîne des Pyrénées il y a quelques dizaines de millions d'années. Une aubaine, miraculeuse...

Domingo AERDEN

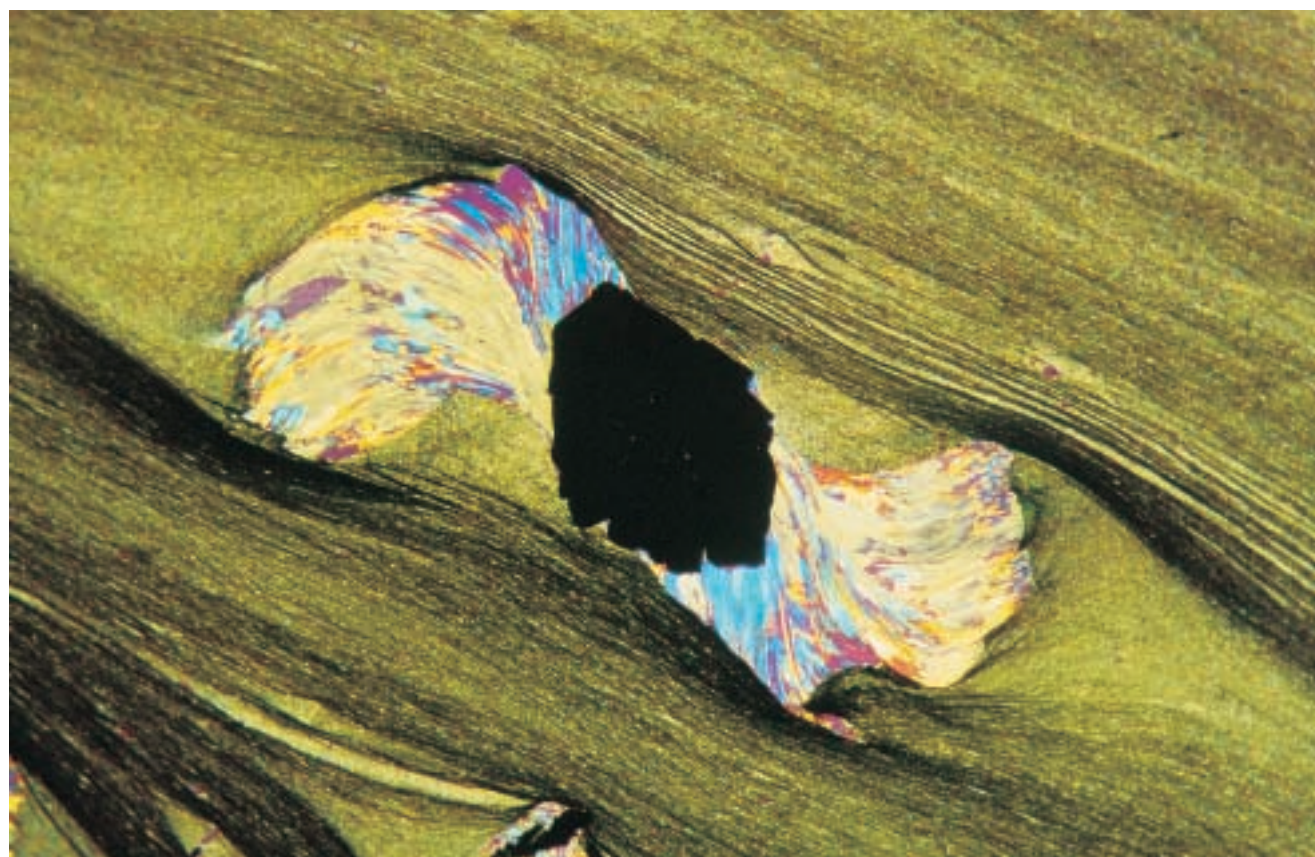


1. Coupe verticale à travers la chaîne des Pyrénées. L'échantillon (cercle noir) est proche d'une faille chevauchante.





2. Lame mince d'une ardoise contenant des grains de pyrite entourés de cristallisations fibreuses (de quartz et calcite) qui soulignent l'étiement de la roche.



3. Agrandissement d'un grain de pyrite avec ses queues de cristallisation.

Histoire

L'art juif

Gabrielle Sed-Rajna, avec la collaboration de Ziva Amishai-Maisels, Dominique Jarrassé, Rudolf Klein et Ronny Reich. Éditions Citadelles et Mazenod, Paris, 1995.

Le *Décalogue* (les «dix commandements» bibliques), qui figurent au chapitre XX de l'*Exode* et au chapitre V du *Deutéronome* – en termes identiques –, comporte notamment les interdictions suivantes :

«Je suis Yahvé, ton Dieu, qui t'ai fait sortir du pays d'Égypte, de la maison de servitude.

«Tu n'auras pas d'autres dieux devant moi.

«Tu ne te feras aucune image sculptée, rien qui ressemble à ce qui est dans les cieux, là-haut, ou sur la terre, ici-bas, ou dans les eaux, au-dessous de la terre.

«Tu ne te prosterner pas devant ces dieux [littéralement : «devant eux»] et tu ne les serviras pas, car moi Yahvé, ton Dieu, je suis un Dieu jaloux...» (*Exode*, XX, 2-5, traduction de B. Couroyer dans la *Bible de Jérusalem*, éditions du Cerf.)

Ces interdits expliquent l'absence en particulier, dans l'art juif, de la statue – sauf récemment. Mais il arrive que l'on donne une bien plus grande extension à ce commandement. C'est ainsi que, rendant visite, lors de l'une de nos missions archéologiques annuelles à Jérusalem, au professeur Nahman Avigad, de l'Université hébraïque de Jérusalem, dans son bureau situé au milieu de ses fouilles sur la colline occidentale de la vieille ville de Jérusalem, nous y avons assisté à une discussion édifiante. De jeunes élèves rabbins contestaient que N. Avigad ait pu découvrir sur cette colline voisine de celle du Temple, dans les ruines de ce quartier détruit au cours de la Première Guerre (ou Révolte) juive (66-70 de notre ère), une *menorah* (chandelier à sept branches) représentée sur un fragment de plâtre. À cette contestation, N. Avigad répondit, avec un fin sourire, que ce chandelier était gravé – donc se trouvait en creux et non pas en relief – dans ce fragment de plâtre ! En revanche, les mosaïques qui, à l'époque byzantine, recouvraient le sol de synagogues de la Galilée – où avait résidé le Patriarche, chef de la communauté des juifs – représentaient,

notamment, des animaux et même des personnages (bibliques ou mythologiques).

Tenter de résumer un ouvrage tel que *L'Art juif* est une tâche délicate. Nous allons donc, plus modestement, citer ce qui en est dit sur la jaquette de celui-ci, présentation à laquelle l'auteur est rarement tout à fait étranger :

«Cent ans de fouilles archéologiques, jalonnées de découvertes inattendues, cinquante ans de recherches foisonnantes ont mis au jour des œuvres d'une telle qualité qu'il n'est plus possible de les considérer comme de simples reflets des grands courants artistiques ou comme des produits de circonstance d'un artisanat populaire. Du berceau de la religion juive, au cœur du Moyen-Orient [il serait plus exact de dire : «du Proche-Orient», celui-ci comprenant tous les pays asiatiques de langues sémitiques, le «Moyen-Orient» commençant donc avec l'actuel Iran], jusqu'à Marc Chagall, l'un des plus grands noms de l'art du XX^e siècle, un parcours exceptionnellement riche et divers est proposé au lecteur. Les sites archéologiques révèlent des édifices, mosaïques et fresques, comme à l'emplacement même du Temple de Jérusalem ou sur les rives de l'Euphrate, à Doura-Europos, où les peintures de la synagogue offrent les premiers jalons de la longue histoire de l'imagerie biblique, qui demeura le thème majeur de l'art européen pendant plus d'un millénaire.

«Dans l'Europe médiévale, l'enluminure, refuge de toutes les aspirations esthétiques, devint le domaine de prédilection des artistes qui perpétuèrent ainsi, du X^e au XV^e siècle, les traditions anciennes communes. Aux XVI^e et XVII^e siècles, les objets rituels (*ketoubah* [contrat de mariage], lampes de *hanoukah* [fête des lumières]...) connurent à leur tour une véritable floraison. La pérennité des formes et l'insistant rappel des symboles assuraient la spécificité d'une production que les courants artistiques locaux ne cessaient de diversifier.

«Si les synagogues, à Venise, Cavaillon, Londres, Amsterdam, Prague, Budapest ou bien encore Vienne, témoignent d'une permanence des préoccupations religieuses, l'art juif subit la laïcisation apportée par le siècle des Lumières : l'art moderne et contemporain, résolument séculier et subjectif, exprime, tout au plus, les relations personnelles que l'artiste entretient avec sa tradition. S'épanouissent alors les talents de Pissarro, Soutine, Pascin, Man Ray et Rothko...

«Présent dans la civilisation européenne à travers ses concepts, ses méthodes et grâce à la pensée qui a inspiré les œuvres, l'art juif révèle au-

delà de la culture juive des aspects fondamentaux de l'art européen.»

Et l'auteur précise dans son ouvrage, en page 9 : «Rendre accessibles les productions artistiques d'une civilisation de trois mille ans a nécessité de nombreuses compétences. Aussi sommes-nous heureux d'avoir obtenu le concours d'éminents collègues dont les connaissances complètent les nôtres : de Dominique Jarrassé, professeur à l'Université de Clermont-Ferrand, pour l'architecture des synagogues médiévales et modernes, de Ziva Amishai-Maisels, professeur à l'Université hébraïque de Jérusalem, pour la peinture moderne et contemporaine. Qu'ils soient vivement remerciés d'avoir accepté cette collaboration. Dans la partie consacrée aux sites, cet ouvrage est particulièrement riche en informations, dont certaines sont peu connues, voire inédites : Ronny Reich, archéologue attaché au Département des antiquités du Musée d'Israël et enseignant à l'Institut d'archéologie de l'Université hébraïque, a bien voulu se charger de fournir les données les plus récentes sur les synagogues antiques d'Israël. Rudolf Klein, professeur d'architecture actuellement en poste à Budapest, a mis à notre disposition les documents réunis au cours de ses voyages sur les synagogues d'Europe centrale et de l'Est qui, jusqu'à ces dernières années, restaient d'un abord difficile. Nombre de ces synagogues sont publiées ici pour la première fois. Les conseils de Nicolas-Jean Sed ont permis d'apporter à ce livre de nombreuses améliorations.»

Au milieu des louanges que mérite un tel livre, nous glisserons trois légères critiques archéologico-historiques.

D'une part, en l'an 70 de notre ère, à la fin de la Première Guerre (ou Révolte) juive, ce n'est pas le «Second Temple» de Jérusalem qui fut détruit, mais le «Troisième» ; en effet, le premier fut construit par Salomon, le deuxième au retour de l'exil à Babylone et le troisième par Hérode le Grand. Telle est la réalité archéologique et historique, même si, d'un point de vue théologique, il existe une indéniable continuité entre l'époque du deuxième Temple et celle du troisième.

D'autre part, en ce qui concerne l'orientation des synagogues de Massada et de l'Hérodioum (ou Hérodioum), évoquée dans les pages de cet ouvrage qu'il consacre aux «Synagogues antiques», R. Reich prétend que celle de Massada a son bâtiment «orienté vers Jérusalem» et que, s'agissant de celle de l'Hérodioum, l'orientation de cette synagogue n'a pas de signification, puisqu'elle était installée dans un local existant». En fait, ces synagogues, qui

sont antérieures à la destruction, en l'an 70, du Temple de Jérusalem, ont leur façade, comme celle du Temple lui-même, tournée vers l'Orient, très précisément à l'Hérodium, qui est une butte en grande partie artificielle, moins précisément à Massada, à cause de l'irrégularité naturelle du bord occidental du rocher, bord près duquel elle a été construite. Et ce n'est qu'après la destruction du Temple que les synagogues furent tournées vers Jérusalem, en mémoire du sanctuaire détruit (voir en particulier, à ce sujet, l'archéologue israélien Gideon Foerster, qui a notamment travaillé à l'Hérodium depuis que, en 1967, après la «Guerre des Six Jours»,

ce site est passé sous contrôle israélien ; voir aussi notre article, *À propos des deux plus anciennes synagogues actuellement connues de Palestine*, dans la *Revue des études juives*, tome 144, fasc. 1-3, pp. 297-301, janvier-septembre 1985).

Enfin, nous ne saurions suivre l'auteur lorsqu'elle écrit : «Aucun indice ne permet de supposer que les insurgés ont réellement occupé Jérusalem, ne fût-ce que provisoirement. Alors que des lots importants de monnaies furent découverts à Hérodion, à Hébron et dans ses environs, à Dahariyeh et à El Fawar, aucune pièce ne fut trouvée à Jérusalem». Car, d'une part, la plupart des spé-

cialistes de l'histoire ancienne de la Palestine ayant traité de cette question postérieurement aux découvertes effectuées dans des grottes du désert de Juda, concernant la Seconde Révolte juive, ont estimé que Jérusalem était tombée aux mains des hommes de Bar-Kokhba pendant la Seconde Révolte juive (132-135 de notre ère). En toute logique, cette opinion conduisait à faire l'hypothèse que Bar-Kokhba restaura l'ancienne religion et rétablit le sacerdoce et les sacrifices jusqu'à ce que l'insurrection fût noyée dans le sang par les Romains (voir notamment, à ce sujet, la contribution d'André Caquot intitulée *Le judaïsme depuis la captivité de Babylone jusqu'à*



1. Le pavement de la synagogue de Beth-Alpha (Galilée) : mosaïque du VI^e siècle de notre ère. En haut, le zodiaque ; au milieu, le char du Soleil

la révolte de Bar-Kokheba, dans *Histoire des Religions*, Encyclopédie de la Pléiade, II, p. 182, 1972). Cela suppose que le chef de la Seconde Révolte juive avait restauré, avec l'autel des sacrifices, les rudiments d'un temple : le quatrième Temple de Jérusalem, donc. Ajoutons qu'en fait deux monnaies de Bar-Kokheba (monnaies de la deuxième année de cette révolte) sont sorties des fouilles conduites par Benjamin Mazar dans la vieille ville de Jérusalem, au Sud-Ouest du Haram esh-Shérif établi à l'emplacement du Temple, et que d'autres monnaies de Bar-Kokheba ont été découvertes en des endroits même plus septentrionaux que Jérusa-

lem. De plus, soulignons qu'il est précisé dans certains des documents recueillis dans des grottes du désert de Juda que ceux-ci ont été rédigés à Jérusalem au cours de l'une des années de la Seconde Révolte juive.

Concluons. Ce superbe volume de 640 pages, aux très nombreuses illustrations réparties en plusieurs chapitres dotés, chacun, de précieuses pages de présentation, montre bien et les limites et, à l'intérieur de celles-ci, l'ampleur de l'art juif. On ne peut que se réjouir de la publication d'un tel ouvrage d'ensemble, qui n'a pas de rival dans notre langue, si ce n'est plus.

Ernest-Marie LAPERROUSAZ

Sciences cognitives

L'inscription corporelle de l'esprit

Francisco Varela, Evan Thompson et Eleanor Rosch. Éditions du Seuil, 1993.

Le sous-titre *Sciences cognitives et expérience humaine* indique, plus clairement que le titre, l'audacieux projet des auteurs : mettre en relation les sciences cognitives, c'est-à-dire ce qu'il y a de plus abstrait, de plus désincarné dans l'activité scientifique récente, avec ce qu'ils nomment l'expérience humaine, c'est-à-dire ce qui vient du vécu, du subjectif, du viscéral, de tout ce qui s'éprouve et que nous avons appris à rejeter au profit de ce qui se prouve par une méthode objectivement justifiée.

Ce livre foisonnant élargit encore le vaste champ couvert par l'ouvrage précédent de Francisco Varela (*Autonomie et connaissance*, publié par le même éditeur, en 1989) en développant son concept d'*énaction* (de l'anglais *to enact* : procéder à, mettre en œuvre), ou *cognition incarnée*, en rupture avec la science occidentale, fondée sur la séparation radicale du corps et de l'esprit. Si la «voie moyenne» à laquelle F. Varela faisait allusion à la fin du précédent livre se plaçait entre les opinions divergentes de N. Wiener et de J.M. von Neumann à propos de la cybernétique et de l'informatique, elle est ici largement développée en référence à la voie *Madhyamika*, qui remonte au bouddhisme indien du II^e siècle de notre ère.

En insistant sur l'origine biologique des fonctions cognitives et en gommant le fossé qui sépare, depuis des siècles, la démarche scientifique de cette «expérience humaine», les auteurs visent à dépasser les clivages fondamentaux qui structurent nos habitudes intellectuelles. Pour ces raisons, et par les enjeux d'une pensée sans sujet, sans représentations et sans fondements qu'il nous propose, en l'assimilant à ce qu'est l'«expérience du vide» pour les Orientaux, ce livre stimulant est d'un accès difficile.

La thèse centrale consiste à ouvrir une troisième voie pour les sciences cognitives et les neurosciences, par rapport à celles qui tiennent du cogniti-



2. Autre représentation du pavement de la synagogue de Beth-Alpha : le sacrifice d'Isaac par Abraham.

visme strict (le cerveau assimilé à un ordinateur), d'une part, et à celles qui se rattachent au connexionnisme (modèles par réseaux de neurones formels interconnectés, c'est-à-dire où l'on assimile le cerveau à un ensemble d'unités de calcul très simples, reliées les unes aux autres), d'autre part. Il s'agit de rechercher les origines de la cognition en deçà de ces deux voies, qui ont en commun d'accepter l'intelligence comme fondée sur ses propres représentations.

La cognition n'est plus conçue comme aptitude à résoudre des problèmes se rapportant aux constituants supposés d'un monde en soi. Elle est la capacité de faire émerger le monde vécu en même temps que l'intelligence qui l'interprète, cela à partir du même substrat infiniment complexe qu'est le monde naturel. La seule condition est que puissent s'y maintenir des possibilités d'action et d'interaction (engendrant un «couplage structurel») entre des agents simplement viables, sans même aller vers une adaptation optimale. Il s'agit pour les auteurs d'une simple «dérive naturelle» entre ces agents, dont les capacités individuelles peuvent être très limitées.

De récents modèles d'intelligence artificielle peuvent illustrer ce point de vue : un ensemble de petits robots très simples peut parvenir spontanément à un début d'organisation semblable à celle d'une colonie de fourmis. Or, chacun de nos milliards de neurones est déjà l'équivalent d'un microprocesseur, ce qui rend plausible l'auto-émergence d'une intelligence comme la nôtre, qui se manifeste comme «capacité d'entrer dans un monde partagé de significations», car *le monde ne contient pas sa propre signification*. C'est dire toute la puissance, l'audace, mais aussi le mystère de cette théorie de l'énaction.

Les auteurs expliquent d'abord ce qu'ils entendent par «expérience humaine», qui doit s'affranchir à la fois du réalisme naïf (qui prend les choses telles qu'elles nous apparaissent) et des modèles idéalisés de la physique mathématique. Ce qui les amène à rappeler quelques subtilités de la phénoménologie (Husserl, Merleau-Ponty)... L'objectivité est mise entre parenthèses : le sujet n'est pas toujours détaché de son expérience, il doit aussi être de plain-pied avec elle. Il faut donc trouver une approche à la fois explicative *a posteriori* et immédiatement descriptive des faits vécus. Ils invoquent pour cela une tradition philosophique du bouddhisme *Mahayana* (celui du *Grand Véhicule*), dite de la «voie moyenne» (*Madhyamika*), qui fournirait la meilleure

démarche d'accès à une science de l'esprit capable de prendre en compte la *corporéité* (c'est-à-dire l'origine biologique) des *fonctions cognitives*. Car, disent-ils, la raison ne peut plus être un moyen d'investigation du fonctionnement de l'esprit. Et des arguments sont avancés pour justifier ce choix épistémologique, qui ne craint pas de s'aventurer entre science et expérience mystique. Ils sont formulés dès le premier chapitre, précisés dans le troisième et largement développés dans toute la dernière partie.

F. Varela et ses collègues veulent élaborer un savoir positif, capable d'éclaircir globalement l'énigme du fonctionnement de la pensée. Ils refusent d'en rester à un savoir par défaut, qui constate les anomalies provoquées par telle ou telle lésion dans diverses régions du cerveau ou qui cherche parmi les multiples clés des récepteurs serrures le passe-partout d'une fallacieuse mécanique de la cognition.

L'intérêt qu'ils portent aux traditions théoriques de l'hindouisme et du bouddhisme savants ne se limite pas à leurs aspects spéculatifs, comme ce fut le cas pour des ténors de la mécanique quantique (Bohr, Schrödinger, Heisenberg...). Ils sont persuadés qu'elles offrent aussi une alternative, en fournissant à la fois une méthode (dite de l'attention/vigilance) et des pratiques psychophysiques (une certaine forme de méditation) longuement élaborées et soigneusement codifiées, pour explorer cette «inscription corporelle de l'esprit».

Bien qu'ils aient donné un répertoire de certaines de ces pratiques dans les annexes de leur livre, on n'a pas le sentiment que les auteurs se soient eux-mêmes fermement engagés dans la voie de l'ascèse qu'elles impliquent... Ils ont su, en revanche, donner un contenu et un sens précis, en rapport avec le champ le plus actif de nos sciences contemporaines, à cette recherche du «vide» (*sunyata*) si déroutante et étrangère à nos modes d'être et de penser.

Les démarches du bouddhisme, comme celles de l'Inde classique (en particulier par ses différents *yogas*) dont il est issu, n'ont jamais été une activité purement abstraite, malgré leur très haut degré d'élaboration, contrairement à nos philosophies issues de la tradition grecque. Elles sont restées vivantes et productives depuis les temps archaïques jusqu'à l'époque actuelle, mais longtemps méprisées ou ignorées par les élites occidentales, en dehors d'un court accès d'enthousiasme au cours du XIX^e siècle (Roger-Pol Droit, *L'oubli de l'Inde*, PUF, 1989). Ces phi-

losophies de l'Orient ont, de plus, toujours manifesté une sorte de fascination pour les problèmes du fonctionnement de l'esprit et pour tout ce qui met en œuvre l'action sur le corps par l'esprit et l'action sur l'esprit par le corps (André Padoux, *L'énergie de la Parole*, éditions Hermès, 1995).

Tout cela mérite bien qu'on en tire enfin parti. C'est ce que propose ce livre, dans la perspective d'enjeux novateurs pour le grand public attentif aux rapports entre théories et réalités sensibles, aussi bien que pour les chercheurs en sciences cognitives qui élaborent cette «science des choses qui pensent», à l'instar de la science des choses qui vivent qu'a été la biologie.

Maurice PASDELOUP

Chimie

La chimie dans la société

Sous la direction de G. Bram, F. Chamozi, A. Fuchs, A. Grelon, C. Lanciano-Morandat et L. Mordenti. Éditions CNRS-L'Harmattan, 1995.

A quelques détails près, les rapports de la chimie et de la société sont harmonieux, qu'il s'agisse de la chimie-industrie ou de la chimie-science. La première émerge revigorée de sa contestation par les écologistes : elle est devenue l'une des industries les plus sûres et les plus propres, ayant supprimé ses nuisances, augmentant constamment la part du recyclage dans sa production. Déjà consciente de ses devoirs généraux envers la société, l'industrie chimique l'est davantage encore de sa dette à la science chimique, tributaire qu'elle est de son avancement pour améliorer ses procédés et pour renouveler ses effectifs.

Aussi finance-t-elle massivement les laboratoires universitaires : par l'octroi de contrats de recherche, aisés à obtenir ; par des crédits d'installation généreux, doublés d'une dotation en produits chimiques et verrerie à tout nouvel enseignant ; par des bourses de doctorat finançant la formation par la recherche de ses futurs chercheurs et cadres ; par sa participation, enfin, plus directe, au financement d'instituts de recherche avancée, dotés de tous les équipements lourds nécessaires.

Ne restreignons pas pour autant le rapport chimie-société à cette résonance

FRANCE INFO
et
POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 30 avril 1996.



entre industrie chimique et science chimique. Mentionnons encore, pêle-mêle : l'édition par une firme commerciale de l'un des deux meilleurs périodiques mondiaux de chimie fondamentale ; le retentissement donné, dans les pages scientifiques des journaux et des hebdomadaires, aux percées faites dans les laboratoires ; la qualité architecturale et, n'hésitons pas à l'écrire, le confort de ceux-ci, qu'ils soient universitaires ou industriels ; la valeur des services de documentation chimique et leur informatisation efficace.

Ce tableau idyllique, brossé à la va-vite, est celui de la chimie allemande, le lecteur l'aura déjà compris. La chimie, en France, pose davantage problème, d'où l'organisation, en 1994, d'un colloque à Biarritz dont L'Harmattan vient de publier les actes. Citons Michel Calton, sur la chimie française (p. 250) : «La recherche académique y est peu soutenue par les pouvoirs publics et bénéficie de débouchés industriels importants, alors que les industriels se dotent de moyens considérables en recherche de base. La dynamique de l'innovation agit à la fois sur le modèle linéaire et sur le modèle interactif : sur le modèle linéaire en raison de la cloison établie par les entreprises entre leurs propres recherches et les recherches faites en amont ; sur le modèle interactif parce que le seul débouché des chimistes académiques, en dehors du débouché conceptuel, est l'industrie.»

Il eût été fructueux, je pense, de se livrer à une analyse comparative des deux chimies, allemande et française. Prendre le pouls de cette dernière, hyperstasiée à l'université, sans relativiser le propos par référence à d'autres contextes, procède d'une erreur et d'une tactique. La tactique, en une période où la chimie française manque dramatiquement de moyens – ceux énumérés ci-dessus pour la chimie allemande –, est d'amuser la galerie, de détourner l'attention ou d'esquiver les responsabilités, en imputant à la société (à la Société) et à sa chimiophobie tous les maux dont souffre la chimie dans notre pays.

Il fallait rappeler ces évidences avant d'aborder quelques-unes des thèses de ce livre, attachant par certains côtés, irritant par d'autres. Les lecteurs de *Pour la Science* ont la chance de connaître déjà les positions d'Alain Fuchs, l'un des organisateurs du colloque de Biarritz : les chimistes feraient un complexe de persécution et tiendraient un «discours emphatique, fermé, automystificateur, corporatiste», au lieu de l'indispensable compréhension de leur métier comme «pratique sociale» (voir *Pour la Science*,

juin 1995, pp. 112-113). Le reproche aux scientifiques de leur élitisme, de leur enfermement dans une tour d'ivoire n'est pas neuf ; je regrette qu'il coïncide avec le virulent mouvement antiscience qui sévit aujourd'hui et avec la stagnation, voire le recul, des moyens alloués à la recherche.

D'autre part, la présentation de l'activité scientifique par ceux-là mêmes qui la font serait suspecte ; seuls «anthropologues, historiens, sociologues et économistes» auraient qualité à exprimer la science dans ce qu'elle a d'authentique. Il faudrait savoir : on ne peut pas affirmer simultanément une chose (les scientifiques ne savent pas ce qu'ils font) et son contraire (les scientifiques tiennent des discours mystificateurs pour donner le change et masquer des «pratiques cyniques»).

Il ne suffit pas de parler sociologie. Il importe aussi d'appliquer ses concepts, à la chimie en l'espèce. Efforçons-nous de le faire ici. Suivant M. Crozier, qui signale que «le raisonnement stratégique part de l'acteur pour découvrir le système qui seul peut expliquer par ses contraintes les apparentes irrationalités du comportement de l'acteur», j'identifie trois griefs majeurs de A. Fuchs. Il oppose aux valeurs mandarinales une organisation égalitaire de la science. Il souhaite une recherche non pas ludique, mais répondant aux besoins de la société. Il rejette la culture, symbolisée par les arts et les lettres, au profit d'une définition bien moins restrictive.

Par-delà l'objectif d'une organisation égalitaire de la science – que nous avons déjà, car la recherche est des plus égalitaire –, A. Fuchs vise l'organisation de la science comme méritocratie, mais il confond celle-ci et système mandarinal.

Mettre la science au service de l'homme est un objectif généreux. Le malheur est que, comme beaucoup de slogans, il est vide de sens. Alors qu'une phrase telle que «la SNCF est au service des usagers» en a un (espérons-le, tout au moins), l'énoncé «mettre la science au service de l'homme (ou de la société)», bien que syntactiquement correct, est, au mieux, une tautologie ; au pire, un non-sens. Un brin de philosophie analytique suffit, pour se convaincre du manque d'intérêt du slogan «mettre la science au service de l'homme». En est responsable l'adjacence sémantique des deux compléments («la science», «l'homme») du verbe «mettre au service de». Il suffit, pour s'en persuader, de substituer X et Y, dans l'expression «mettre X au service de Y», par des termes tels que

«homme, société, science, langage, outil, aristocratie, démocratie, parti politique». On produit de la sorte des dizaines d'énoncés qui n'ont d'autre sens que l'intention de ceux qui les utilisent. C'est du Newspeak orwellien, dont il faut se garder comme de la peste (brune ou rouge).

Venons-en maintenant à tout ce qui fait l'attrait et l'intérêt de ce livre : les sections «Chimie, histoire et culture», «Chimie et médias» et quelques chapitres, tels que ceux de Claude Bonnette-Lucas, d'André Grelon, de Jean-Alain Héraud, de Pierre Lascoumes, de Pierre Rolle. D'autres chapitres, parce qu'ils sont rédigés comme des rapports de commission, ont un moindre impact. Il est une autre manière d'écrire dans le sable, pseudo-conceptualiser une pseudo-factualité en publiant un sondage ou une mini-enquête, en l'assortissant de quelques commentaires. Certes, on cherche ainsi à cerner l'attente du public à l'égard de la chimie, mais, faute d'outils intellectuels appropriés, la plupart des auteurs de ce recueil – un fourre-tout hétéroclite de plus de 400 pages – se confortent ainsi dans leur mentalité d'as-

siégés : la chimie est incomprise, mal connue, peu étudiée et perçue comme à haut risque.

Si le refuge dans le ghetto de notre insularité franco-française était une tentation, irrésistible pour la plupart, l'attrait du superficiel en fut une autre (exemple : le débat sur l'interdiction des chlorofluorocarbures). Une excellente initiative fut l'étude de cas, celui du laboratoire bordelais, «Loin de l'équilibre». Sa recherche, de grand niveau international, fut portée à bout de bras par Adolphe Pacault. Elle s'inscrivait malaisément dans le découpage des commissions du CNRS. Elle ne bénéficia que d'une reconnaissance tardive, aux États-Unis d'abord, en France ensuite. L'approche «anthropologique», représentée ici par Michel Callon, semble avoir peu de prise sur ces aspects institutionnels pourtant déterminants.

Pour résumer, ce livre donne le sentiment d'énormément d'efforts et de bonne volonté pour un résultat somme toute maigre, faute d'avoir élargi la visée au moins à l'Europe et faute de s'être interrogé sur le point, crucial pour toute communication, de ce qu'en attend le public.

Pierre LASZLO

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Slim Films Pp. 10 et 11 : documents PLS. P. 14 : Photo INSERM. P. 16 : *De revolutionibus orbium Coelestium, libri vi*, Copernicus – éditions Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966. P. 17 : documents PLS, d'après Denis Savoie. P. 20 : INRA Nantes, Service de microscopie – Daniel J. Gallant. P. 23 : DIAF – Tim de Waele. P. 24 (*en haut*) : DR. P. 24 (*en bas*) : Tourreilles-Gallet. P. 25 : DR. P. 26 (*en haut*) : Tourreilles-Gallet. P. 26 (*en bas*) : Sophie Bassouls/Sygma. P. 28 : Bibliothèque mathématique d'Orsay. P. 29 : Tourreilles-Gallet. P. 31 : PLS/Roland Bechmann. P. 32 (*en haut*) : Ed Bridges, American Museum of Natural History. P. 32 (*au milieu*) : Christian Kille, BIOS. P. 32 (*en bas*) : Musée paléontologique de La Voulte. P. 33 : Aline Raynal-Roques. P. 34 (*en haut*) : document PLS. P. 34 (*en bas*) : Renée Kraan-Korteweg. Pp. 35 à 37 : documents PLS. P. 38 : Avec l'aimable autorisation de Hansen Planetarium Publication, Salt Lake City et W. Sullivan III, University of Washington. P. 40 : RMN/Musée des antiquités nationales, Saint-Germain-en-Laye. P. 41 (*en haut*) : document PLS. P. 41 (*en bas*) : Éric Boix. P. 42 (*à gauche*) : Yves Couder, École normale supérieure. P. 42 (*à droite*) : documents PLS. P. 44 : Conti/S. Bukowski, SIPA. Pp. 46 à 50 : IPSN/PLS. P. 53 : Jacques Rey. Pp. 54 et 55 : documents PLS. P. 56 (*en haut*) : Jacques Rey. Pp. 56 (*en bas*) et 57 : PLS/Jacques Rey. P. 58 : Jacques Rey.

P. 61 : Alfred T. Kamajian. P. 62 (*en haut*) : Jared Schneidman Design. P. 62 (*en bas*) : Carey Ballard. P. 63 (*en haut*) : Alfred T. Kamajian. P. 63 (*en bas*) : Louis Psihoyos, Matrix. Pp. 64 et 65 (*en haut*) : Jared Schneidman Design. P. 65 (*en bas*) : Thomas A. Herring. Pp. 67 et 68 : Barry Ross. P. 69 (*en haut*) : Michael J. Buckingham et al. P. 69 (*en bas*) : Michael J. Buckingham. P. 70 : John R. Potter. P. 73 (*photographie*) : Scott Henderson et David Spector, Cold Spring Harbor Laboratory. P. 73 (*dessin*) : Tomo Narashima. Pp. 74 et 75 : Seward Hung. P. 76 (*en haut*) : Tomo Narashima. P. 76 (*en bas*) : Jana Brenning. P. 78 (*en haut*) : U.S. Information Service. P. 78 (*en bas*) : Hale Observatories. Pp. 79 et 80 : Avec l'aimable autorisation de Gerald Cecil. P. 81 : Avec l'aimable autorisation de Gerald Cecil, d'après Anatoly A. Suchkov et al. Pp. 82 et 83 : Alfred T. Kamajian. P. 84 : HST/NASA. P. 86 et 87 : Roberto Osti. P. 88 : Dimitry Schidlovsky. P. 89 : avec l'aimable autorisation d'Arthur J. Morris, Gordon I. Nicholson et Martin J. Blaser. P. 90 : Dimitry Schidlovsky. P. 91 : Roberto Osti et Lisa Burnett. Pp. 92 et 93 : Michael Goodman. P. 94 (*à gauche*) : IBM Thomas J. Watson Research Center. Pp. 94 (*à droite*) et 95 : Michael Goodman. Pp. 100 et 101 : Johnny Johnson. P. 102 : Michael Goodman. Pp. 104 et 105 : Domingo Aerden. Pp. 109 et 110 : Holy Vews Ltd., Jérusalem.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Aubineau. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Paul Decaix, Agnès Labigne, Marie-Thérèse Landousy, Jérôme Legenne, Xavier Lurton, Philippe Machetel, Anne Masé, Claude Olivier, Guy Paulus, Laure Sabatier, Jacqueline Stern, Jean Zinn-Justin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Co-Chairman Pierre Gerckens. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degutis, Linnéa Elliott, Martin Paul.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (1) 46 34 21 42. Téléc. : LIBELIN 202978F. Télécopieur : 43 25 18 29.

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada.

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay.

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront, en pages centrales, un encart publicitaire Club Français du Livre, et en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.