

LES AVALANCHES • ADN ET ÉVOLUTION • L'AUTISME • BALLONS ET DIRIGEABLES

■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Mars 2000

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

*Combien d'espèces
d'hominidés
ont-elles coexisté ?*

**Nos cousins
préhistoriques**



BLOC-NOTES

de Didier Nordon



JEU-CONCOURS

Tournoi de bridge

par Pierre Tougne

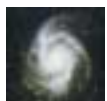
TRIBUNE DES LECTEURS



POINT DE VUE

Eugénisme et diagnostic

par Israël Nisand



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

À quelle distance sont les étoiles ?

par Ulrich Bastian



SCIENCE ET GASTRONOMIE

La détection des saveurs

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Une tombe princière au Kazakhstan

■ Le renouveau du X ■ Une oreille bionique

■ L'érosion des plages... ■ Quand la toxine rétrograde

■ Une puce de biodétection



VISIONS MATHÉMATIQUES

Sculptures réelles et virtuelles

par Ian Stewart

LOGIQUE ET CALCUL

Le dilemme du renvoi d'ascenseur

par Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu



IDÉES DE PHYSIQUE

Une affaire de dimensions

par Roland Lehoucq



ANALYSES DE LIVRES

■ De la fécondation croisée des Orchidées

par les insectes et des bons résultats du croisement,

de Charles Darwin, traduction de L. Rerolle

■ L'homme des origines, de Claudine Cohen

■ Bonobos, le bonheur d'être singe, de Frans de Waal et Frans Lanting



Chaque mois, retrouvez le sommaire complet de la revue **en ligne** avec pour chaque article une bibliographie et un complément d'information

www.pourlascience.com

Des ballons dans l'espace

26

par Steve Smith et James Cutts

À l'aide de ballons, météorologistes et planétologues étudient les couches supérieures de l'atmosphère, sur la Terre et sur d'autres planètes

Les zeppelins du XXI^e siècle

34

par Klaus Hagenlocher

Les nouveaux zeppelins ne pourront s'enflammer, comme l'ont fait les anciens appareils. Leur structure est perfectionnée, et leur manœuvrabilité est supérieure.

Le ballon qui a fait le tour du monde

40

par Phil Scott

Pour faire le tour du monde en ballon, les ingénieurs ont tourné une page de l'histoire de l'aéronautique.

Six milliards d'hommes sur Terre

44

par Malcolm Potts

Dans beaucoup de pays, la population accède trop difficilement à la contraception. Si l'on ne prévient pas la crise démographique, de graves problèmes surviendront.



La physique des avalanches

52

par Mohamed Naaim, Florence Bouvet-Naaim et Lionel Vidal

Une meilleure compréhension de la physique des avalanches et la modélisation de leurs mécanismes améliorent la prévention des risques.



À la recherche de l'îlot superlourd 60

par Iouri Oganessian, Vladimir Utyonkov et Kenton Moody

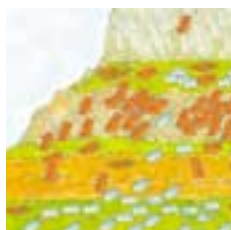
La synthèse de l'élément 114 a confirmé des prévisions théoriques anciennes : un îlot de stabilité nucléaire existe.



SOS génome : réparation et évolution 66

par François Taddei, Ivan Matic et Miroslav Radman

La vie repose sur un équilibre fragile entre stabilité et modification des gènes : conservatisme et mutations excessives nuisent.



Autrefois, nous n'étions pas seuls 74

par Ian Tattersall et Jay Matternes

Homo sapiens est aujourd'hui le seul hominidé sur la Terre. Pourtant, pendant des millions d'années, plusieurs espèces d'hominidés ont coexisté.



Le destin ultime de la vie 80

par Lawrence Krauss et Glenn Starkman

Des milliards d'années durant, l'Univers était trop chaud pour que la vie apparaisse. Dans un avenir très lointain, il sera trop froid et la vie disparaîtra.



Les origines de l'autisme 88

par Patricia Rodier

Un gène qui règle le développement du système nerveux est en partie responsable de l'autisme.



Les adaptations suscitées

Les mutations qui transforment l'ADN sont rares, et c'est heureux pour la vie, sinon, comme la plupart de ces mutations sont délétères, trop peu de cellules mutées surviendraient assez longtemps pour se reproduire. Aussi les erreurs de reproduction sont-elles réparées au sein de la machinerie moléculaire. On peut s'interroger : pourquoi les défauts ne sont-ils pas tous absents ? Parce que les bactéries, exemple le plus étudié, examinent, en bonnes gestionnaires, le coût des corrections : les mécanismes d'élimination qui amèneraient au zéro défaut sont « biologiquement coûteux » et les bactéries ont avantage à ne pas être trop tatillonnes.

De surcroît, s'il n'en faut point trop, de nécessaires mutations permettent aux bactéries de survivre quand le milieu change. Aussi le comptable bactérien sait-il qu'il faut introduire un peu d'« entropie » dans sa gestion de la reproduction. Combien et quand ? Les lamarckiens pensaient que les conditions extérieures pouvaient diriger les mutations vers une meilleure adaptation. Leur point de vue n'est plus partagé par la communauté biologique. Les auteurs de *SOS génome : réparation et évolution* (page 66) montrent que « si l'environnement ne dirige pas les mutations (comme le voudrait la théorie néolamarckienne), il peut en augmenter la fréquence, les mutations conférant une meilleure adaptation étant alors sélectionnées ».

Cela étant, les chemins de l'évolution ne sont pas uniques : l'équipe de Richard Leski étudie, depuis dix ans, l'évolution en tube à essai d'une douzaine de populations bactériennes. Ces populations utilisent aujourd'hui mieux les ressources que leurs ancêtres, mais avec des efficacités variables traduisant leurs aptitudes inégales à l'adaptation.

Admirez la patience de ces chercheurs ! Quelle belle résistance, je présume, à la pression des bailleurs de fonds, qui exigent quelquefois indûment des résultats rapides... Les chercheurs ne peuvent pas écrire, à la demande, les lois de la nature, seulement les découvrir à mesure qu'elles se manifestent. Les pressions extérieures exercées sans discernement trahissent un néolamarckisme social...

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Un bon indien parle une langue morte

Les hommes qui aiment le secret s'ingénient à créer des codes «inviolables». Alors que leurs congénères curieux s'emploient à déchiffrer ces codes afin de lire les messages. Exceptionnels sont les codes ayant résisté à tous les assauts. Du coup, l'escalade est sans fin : il faut inventer sans cesse des codes de plus en plus élaborés.

Pendant la Seconde Guerre mondiale, les Américains se sont avisés que les Navajos – tribu indienne réduite à peu de membres, illettrée, méprisée – parlaient une langue isolée dans sa branche. En outre, aucun chercheur allemand n'était venu l'étudier avant la guerre, contrairement aux autres langues indiennes. Bref, la langue des Navajos semblait offrir un code secret excellent. De fait, utilisé dans la guerre du Pacifique, le code Navajo n'a pas été percé par les Japonais. Ainsi, le sommet de l'artifice a consisté à utiliser ce qui était là, donné d'emblée : une langue naturelle. Beau sujet de méditation.

Le renseignement est tiré d'un livre de Simon Singh, *Histoire des codes secrets* (J.-C. Lattès, 1999). La cryptographie est une espèce de «phénomène total» : elle concerne aussi bien le déchiffrement des écritures et l'exploit de Champollion ; les aléas de l'histoire et l'exécution de Marie Stuart trahie par un code insuffisamment sûr ; les codes à clé publique et la sécurité sur Internet. Si bien que le livre de Simon Singh est tout à fait curieux à lire.



Un phénomène rare

Considérons les deux phrases suivantes :
1) Les tremblements de terre sont rares en France.

2) Les pagodes sont rares en France.
Ces phrases sont correctes et claires. En outre, elles sont vraies, mais, exceptionnellement, ce n'est pas ce qui m'intéresse ici.

Voyons maintenant comment remplacer l'adjectif «rare» par l'adverbe «rarement». La

première phrase devient : «Il y a rarement des tremblements de terre en France», et ne pose aucune difficulté. La seconde devient : «Il y a rarement des pagodes en France», ce qui n'a guère de sens. L'adjectif «rare» s'applique indifféremment à l'espace ou au temps. L'adverbe «rarement» ne peut s'appliquer qu'au temps, pas à l'espace. Le couple fréquent/fréquemment présente la même incohérence. Comment expliquer ce phénomène langagier ?

Savoir ignorer ?

L'homme moderne évolue dans un monde technique. Soit. De ce constat, on déduit qu'il doit étudier les techniques. Sinon, dépendant d'objets dont il ne sait comment ils fonctionnent, il vivra dans l'aliénation. Conclusion discutable. Suis-je moins dupe des programmes de la télévision si je sais tout sur les tubes cathodiques ? Suis-je à l'abri des mensonges de la pub ou de la propagande si, moi-même publicitaire ou propagandiste, je connais bien les mécanismes psychologiques sur lesquels elles s'appuient ? Non.

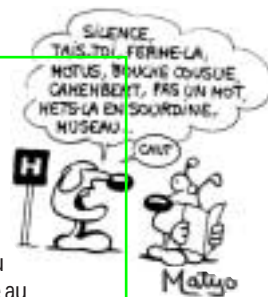
L'univers technique nous environne, comme la nature environnait l'homme primitif, et il n'est guère aliénant de se comporter avec lui comme avec elle. On n'a pas plus de maux d'estomac quand on ignore tout des sucs digestifs, pas plus d'insomnies quand on ne sait ce qu'est le sommeil paradoxal (au contraire, peut-être).

Bien entendu, il faut des spécialistes capables de réparer ou d'améliorer les objets. De même qu'il faut des médecins. Mais cela n'implique nullement que, pour ne pas être dominé par les objets, l'honnête homme doive connaître les techniques sous-jacentes.

Parlons-en

La parole fait parler. Le nombre de verbes désignant une façon de parler est impressionnant. Discuter, tchatcher, déclarer, déclamer, converser, s'entretenir, s'aboucher, prendre langue, lâusser, raconter, négocier, exposer, jaspiner, bavarder, blablater, affirmer, ronchonner, baratiner, grommeler... S'ajoutent les nuances, depuis le pianissimo (murmurer, chuchoter, susurrer) jusqu'au fortissimo (crier, gueuler, s'égosiller, s'époumoner). On peut aussi chanter, moduler, roucouler – et brailler. Cela ne suffisant pas, presque tous les cris d'animaux s'appliquent, péjorativement en général, aux hommes (rugir, hennir, coasser, jaser)... Phénomène certainement révélateur, il n'y a pas de terme spécifique unique pour

désigner le cri de l'animal le plus proche de l'homme : le singe. Enfin, quand on a le talent de San Antonio, on peut, le contexte aidant, utiliser n'importe quel verbe du lexique, et faire entendre au lecteur qu'il signifie «parler» – avec toutes les nuances imaginables.



Tant et tant de termes pour désigner les diverses façons de faire passer un peu d'air sonore par nos cordes vocales : quels intarissables moulins à paroles nous sommes !

Interdisciplinarité

L'usage trop fréquent, notamment par les ministères, du mot «interdisciplinarité» donnerait l'impression que l'interdisciplinarité est, sinon acquise, du moins en voie de l'être, et ce avec le concours et l'assentiment de tous. Comme si les divers spécialistes s'accordaient à penser qu'ils ont intérêt à mettre leurs efforts en commun et à travailler ensemble pour faire progresser les connaissances !

En réalité, l'interdisciplinarité ne règne pas plus sur l'ensemble des disciplines que la paix universelle ne règne sur les nations. Les disciplines ne se partagent pas les succès, mais se les disputent. Chacune rêve de montrer sa prééminence. Leurs projets sont distincts, voire opposés. Par exemple, les neurosciences sont réductionnistes, alors que la psychanalyse veut une approche globale de l'homme ; quand une de ces disciplines marque des points, l'autre en perd.

Au sein de chaque discipline se trouvent certes des colombes qui prônent la négociation avec l'adversaire, c'est-à-dire l'interdisciplinarité. Elles sont presque aussi rares que les pacifistes dans un pays en guerre.

Mythes féconds

Fondées sur de nombreux faits, la théorie de l'évolution affirme des vérités sur l'origine de l'homme, et celle du Big Bang sur l'origine de l'Univers. Ce faisant, elles s'aventurent dans un domaine propre au mythe : tout discours sur l'origine relève du mythe. En outre, elles sont trop vastes et complexes pour que l'individu moyen soit capable de les vérifier lui-même ; elles ressemblent à des mythes en ce qu'on doit croire sur parole les récits faits par ceux qui savent.

Est-ce faire injure à l'évolution ou au Big Bang que de les considérer comme des mythes ? Peut-être pas. C'est une façon de leur reconnaître autant de force poétique et fondatrice qu'aux autres récits racontés par l'humanité pour répondre au vertige devant le mystère de l'origine. Ainsi, plus la science sera puissante et pourra donc se prononcer sur cet inaccessible qu'est l'origine, plus les gens inclineront à prendre ses récits pour des mythes...



**À l'occasion de l'année mondiale
des mathématiques, revivez l'ambiance
d'une époque à travers la vie et les travaux
de ceux qui ont fait les mathématiques**

ABEL

Un mathématicien
romantique
Code 0621-140 F
368 pages



FOURIER

Créateur de la
physique
mathématique
Code 1213-240 F
768 pages



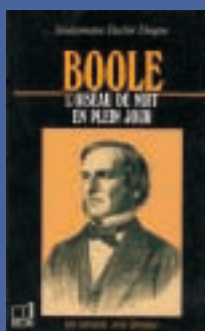
HARDY

L'apologie d'un
mathématicien
Code 0530-120 F
192 pages



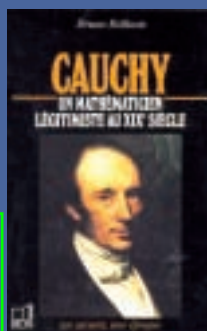
BOOLE

Le père du calcul
informatique
Code 1120-120 F
264 pages



CAUCHY

Un mathématicien
légitimiste
au XIX^e siècle
Code 0510-120 F
224 pages



KOVALEVSKAÏA

L'aventure d'une
mathématicienne
Code 1458-120 F
280 pages

BELIN

Voir bon de commande page 98

JEU-CONCOURS N° 69

PIERRE TOUGNE

Tournoi de bridge



L'organisateur d'un tournoi de bridge par
paire a 100 joueurs qui ne se connaissent
pas, et doit les répartir en 50 paires. Les seuls
renseignements dont il dispose sont :

a) tous les joueurs connaissent plu-
sieurs systèmes d'enchères,

b) n'importe quel groupe de trois joueurs
peut se comprendre, soit qu'ils aient un
système d'enchères commun, soit que l'un
d'entre eux peut servir d'interprète aux deux
autres.

Comment l'organisateur doit-il s'y
prendre pour répartir ces 100 joueurs en
50 paires de telle sorte que chaque paire
ait un système d'enchères commun?

Il n'est pas nécessaire de connaître le
bridge pour résoudre le problème et si le
mot vous fait peur, remplacez «système
d'enchères» par «langue».

**Envoyez vos réponses aux questions à
Pour la Science, 8, rue Férou, 75278 Paris
Cedex 06. Parmi les réponses exactes
reçues pendant le mois de mars 2000, dix
gagnants tirés au sort recevront un livre.**

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 67

D'une façon générale, si l'on a n gra-
duations, on peut mesurer au plus
 $2C_n^2 = n(n-1)$ angles si toutes les diffé-
rences (signées) sont différentes. Dans le
cas qui nous intéresse $n = 5$, cela fait
20 angles qui semblent suffisants pour
mesurer les 20 angles multiples de $2\pi/20$.
Cependant, pour l'angle π , les différences
entre les deux graduations nous fournira
que le seul angle π et donc au mieux 19
angles possibles, d'où la nécessité d'ajou-
ter une sixième graduation. Pour trouver
ces six graduations, il suffit de procéder
par essai-erreur. En voici deux (0 1 2 3
6 10), (0 1 3 4 8 10). Une étude systéma-
tique conduit à 19 solutions, aux symétries
près. Pour mesurer tous les angles en
degrés, un minimum de 20 graduations est
en principe nécessaire, mais la meilleure
solution connue est celle de J. Cotterau
en 24 graduations (voir *Pour la Science*,
décembre 1981) un record à battre ou à
confirmer!

TRIBUNE DES LECTEURS

Créationnisme

En lisant l'article «Le créationnisme» de Guillaume Lecointre (voir *Pour la Science*, novembre 1999), je n'ai pu me défaire de l'idée que son auteur tombe quelque peu dans le travers de ceux qu'il critique.

En effet, après avoir décrit le créationnisme pseudo-scientifique et ses défauts, il me donne l'impression de défendre l'évolution en tant que vérité scientifique avec une ardeur qui n'est pas sans rappeler celle de ses adversaires.

Or, il me semble bon de rappeler deux choses :

— Si les sciences expérimentales ne peuvent qu'élaborer des modèles interprétant imparfaitement la réalité, il en va *a fortiori* de même des sciences non expérimentales, comme celles qui étudient les origines des espèces. Une «vérité scientifique» est toujours beaucoup moins vraie ou beaucoup moins scientifique qu'on ne le prétend. C'est une notion dont on est de plus en plus conscient dans les sciences expérimentales. En revanche, dans les sciences non expérimentales, on semble l'ignorer. Je suis sidéré par les affirmations tranchées qui pullulent dans la plupart des articles de paléontologie. Ainsi, dans le même numéro, on apprend que le tyrannosaure courait à 47 kilomètres par heure!

— Les théories actuelles de l'évolution se heurtent à toute une série d'observations et d'objections qui sont bien connues. Dans son livre, Michael Denton montre de façon remarquable à quel point elles sont sérieuses. Je ne comprends pas la critique qu'en fait G. Lecointre. Contrairement à ce qu'on pourrait croire en lisant son article, ce livre ne développe à aucun moment les théories des créationnistes pseudo-scientifiques. Dire qu'il est rempli de bêtises me semble relever d'un énervement face à un ouvrage qui dérange justement parce qu'il montre de façon rigoureuse que les théories de l'évolution ne sont que... des théories, et que l'on ne sait pas comment l'évolution aurait eu lieu (par bonds ou progressive, par quel moteur, etc.), ni même si elle a eu lieu comme nous le concevons. Le problème est, comme le montre M. Denton, que nous n'avons pas d'autre théorie satisfaisante et que nous préférons nous attacher à une théorie probablement largement fautive et incomplète que de reconnaître notre ignorance.

Pour conclure, je pense que l'enseignement scolaire actuel, et la population française en général, est plus en danger de positivisme béat que de dérive créationniste pseudo-scientifique.

Dr Marc HAESEVOETS, Frontenex.

Réponse de G. Lecointre

Point n°1. Votre perception des affirmations scientifiques est très naïve. Ou alors volontairement blessante : prendrait-on les scientifiques pour des imbéciles? Les scientifiques utilisent le mode affirmatif pour s'exprimer, cela ne retire rien au statut hypothétique de ces affirmations et à la conscience qu'en ont les scientifiques, que la discipline soit «expérimentale» ou non. Utiliser le mode affirmatif revient à énoncer une hypothèse de travail. Ce n'est pas du «positivisme béat», mais une convention qui simplifie l'expression. Si l'on vous prenait au pied de la lettre, il faudrait écrire tous les articles au conditionnel, en précisant à la fin de chaque article que tout ce qui y est raconté pourrait demain être faux, pourquoi cela pourrait être faux et, pourquoi pas, associer une probabilité à chaque énoncé... Un peu comme, sur les contrats d'assurance, une page pleine de petits caractères.

Point n°2. Toutes les objections relatives à divers aspects de la théorie contemporaine de l'évolution sont intéressantes à discuter, pourvu que, d'une part, ces objections soient pertinentes, c'est-à-dire qu'elles reposent sur une bonne connaissance et sur une bonne compréhension du problème concerné. Et, d'autre part, que ces objections aboutissent à des tests ou appellent à effectuer de nouvelles observations, qu'elles soient, en un mot, aptes à faire progresser les connaissances objectives. Les objections de M. Denton ne satisfont aucun de ces deux critères. En un mot, elles sont idiotes. Derrière une érudition de façade, M. Denton ne comprend manifestement rien à ce sur quoi il écrit. Et c'est cela qui rend ce livre si dangereux : ce n'est pas un livre qui souffre d'une carence d'informations, mais un vrai livre de désinformation. Les lecteurs non informés sont impressionnés par la diversité des données qui sont brassées et gobent toutes les fausses objections. Je ne vais pas vous demander de me croire sur parole. Si vous voulez en savoir plus, et comprendre les critiques à l'égard de M. Denton, nous sommes plusieurs à avoir fait œuvre de salubrité publique en prenant le temps d'expliquer en quoi le livre de M. Denton est fallacieux. Ces textes sont publiés dans un ouvrage collectif, élaboré sous la direction du philosophe Patrick Tort, *Pour Darwin*, aux Presses Universitaires de France (1997). Mon énervement face à M. Denton est une indignation face à une véritable désinformation érudite. Je ne l'ai pas accusé de créationnisme. Toutefois, son livre sert aux créationnistes. J'accuse M. Denton de téléologie (voir son dernier livre, il ne s'en cache plus). Je suis en revanche prêt à discuter de toute objection faite en matière d'évolution biologique satisfaisant aux conditions énoncées ci-dessus.

Romain ou italique

J'ai beaucoup apprécié l'article de Jean-Paul Delahaye sur les raccourcis dans les démonstrations (voir *Pour la Science*, février 2000). Je voudrais porter l'attention sur l'utilisation des règles typographiques ; elles peuvent en effet lever des ambiguïtés dans la rédaction des textes scientifiques (et même non scientifiques). Dans son texte, Jean-Paul Delahaye cite un polynôme du type $a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5$.

L'utilisation raisonnée de la typographie permet de lever l'ambiguïté quant à la nature de e : simple constante ou base des logarithmes népériens? Les variables doivent être notées en italique, les constantes fondamentales et les opérateurs en romain ; tel qu'est écrit le polynôme, il s'agit donc d'une simple variable. Dans le cas contraire, on doit écrire $a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5$.

Il m'est arrivé de devoir composer un texte comportant des exponentielles et... la charge élémentaire, notée donc e (en romain). Dans ce cas, il suffit d'écrire $\exp(x)$ pour e^x , et le problème est réglé. Un autre exemple cité dans l'article est la confusion possible entre le produit dx des deux variables d et x et la différentielle de x .

La confusion peut-être évitée par une règle, certes pas absolue, mais d'usage fréquent dans les textes francophones, qui consiste à noter le d différentiel en romain (on le traite comme un opérateur, même si sa nature n'est pas évidente à définir...). Dans ce cas, on ne peut confondre dx et dx . Bien sûr, le contexte devrait rendre cette confusion impossible.

Ces remarques me permettent de faire un plaidoyer en faveur d'un enseignement, même minimal, des règles typographiques, tant pour l'écriture des textes scientifiques que des textes généraux. L'équipement informatique courant permettant à chacun d'éditer des textes, il me paraît important d'enseigner un minimum de règles typographiques.

Même les sujets de concours aux grandes écoles ne sont pas exempts d'ambiguïtés : j'ai déjà vu mN que l'on devrait lire «milli Newton» ; il s'agissait en fait de «mètres Newton»... Il aurait fallu écrire «m N», ou «m•N» ou, pourquoi pas, pour limiter les erreurs de lectures, «Nm».

Eddie SAUDRAIS, Les Fusées

Ecrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Eugénisme et diagnostic

ISRAËL NISAND

Quels sont les objectifs réels de l'échographie des femmes enceintes ?

La loi française admet aujourd'hui deux types d'avortement : l'interruption volontaire de grossesse, qui se pratique jusqu'à la douzième semaine de grossesse, sans justification de la femme, et l'avortement médical prescrit par les médecins à partir d'échographies ou d'analyses. Dans ce cas, un médecin est conduit à proposer un avortement si l'atteinte fœtale est très grave ou si la grossesse met la vie de la mère en danger. L'avortement médical est ainsi une forme d'euthanasie active.

Or les progrès récents ou prévus du dépistage prénatal et la prolongation du délai légal d'avortement nous mènent vers une situation où un eugénisme institutionnalisé serait possible : les femmes sauraient, avant la fin du délai légal d'interruption volontaire de grossesse, que leur enfant a une anomalie même légère – par exemple, une fente labiale ou un doigt en moins – et elles décideraient une interruption volontaire de grossesse sur la base des informations données par le médecin. Examinons pourquoi cette situation serait grave.

Jusqu'en 1998, les avortements thérapeutiques de grossesse étaient prescrits par les seuls échographistes, qui étaient alertés par des observations effectuées au cours de l'échographie de dépistage prénatal. Une remarque du médecin à sa patiente transformait parfois une grossesse désirée en un désir d'avortement, et les médecins étaient alors poussés par les femmes à des attitudes contre leur avis et contre leur conscience. La situation était aggravée par le risque de poursuites judiciaires par des parents, lorsque le pronostic de la maladie de l'enfant avait été sous-estimé par le médecin : il est arrivé que des médecins, craignant ces poursuites, accèdent à la demande d'interruption médicale de la grossesse alors que celle-ci pouvait être évitée.

La loi de 1994, suivie de décrets en 1998, impose aujourd'hui que les dossiers d'avortement médical ne se déci-

dent plus dans le cabinet de l'échographiste, entre le seul médecin et sa patiente. Quand un avortement médical est demandé, le dossier médical est soumis à un «centre pluridisciplinaire de diagnostic prénatal», où une commission pluridisciplinaire accepte ou refuse l'avortement. Ces centres sont composés d'échographistes, de généticiens, de médecins des diverses disciplines, de psychiatres... Les dossiers sont discutés publiquement et collectivement.

Ainsi, les échographistes échappent aux pressions des patients et sont protégés du risque médico-légal : les juges n'ont plus la possibilité de les condamner injustement pour des fautes qu'ils n'ont pas commises. Doit-on rappeler que la médecine a une obligation de moyens, et non de résultats ? Qu'elle doit soigner, mais ne peut pas toujours guérir ?

Ces centres doivent aujourd'hui prendre des décisions sur des bases claires, mais ce serait une erreur qu'ils en viennent à décider ce qui est normal et ce qui ne l'est pas. L'institutionnalisation d'une norme fait évidemment peur, car elle pourrait conduire à un eugénisme d'état. En outre, que cherche-t-on à voir lors de l'examen ? Le diagnostic prénatal n'a toujours pas d'objectifs bien définis. Je maintiens que dépister l'absence d'un doigt à une main n'apporte rien à la grossesse : l'enfant qui naîtra ne sera pas moins homme. La médecine n'a pas décidé ce qui est grave et ce qui ne l'est pas, et la technique médicale a progressé plus vite que la réflexion sur l'utilisation de cette technique.

Pis encore, les progrès de l'échographie relancent les risques de dérive. Aujourd'hui, les échographies vaginales en trois dimensions dépistent d'éventuelles anomalies avant le délai légal d'interruption volontaire de grossesse : les femmes risquent de décider de telles interruptions de grossesse sur la foi d'échographies, comme avant que ne soient créés les centres de diagnostic.

De surcroît, des discussions sont en cours pour repousser la date légale d'interruption volontaire de grossesse. Si l'on décidait finalement un allongement du délai, je proposerais de repousser aussi la date d'échographie de grossesse (aujourd'hui fixée à 13 semaines de grossesse).

Revenons à la question centrale : «À quoi sert le diagnostic prénatal ?». Selon moi, ce dépistage n'a de sens que s'il engendre une modification de la conduite obstétricale : il faut dépister les malformations létales ou très graves, afin de traiter *in utero* celles qui peuvent l'être, ou opérer à la naissance et sauver l'enfant. L'acte thérapeutique modifie la répartition des gènes dans la population, mais ce «dysgénisme actif» est vieux comme la médecine : la césarienne est un tel dysgénisme. Ce dysgénisme relève bien de la mission médicale : soigner. Au contraire, l'eugénisme national est dangereux : les médecins n'ont pas oublié que certains des leurs, tels Alexis Carrel ou Charles Richet, préconisaient de tuer les voleurs, les handicapés, d'organiser la société pour les gens sains et non, clamaient-ils, pour des individus malades.

La technique peut être perfectionnée, mais les médecins doivent se demander à quoi ils servent. L'éthique doit précéder la technique ; on doit réfléchir pour savoir comment on la met en œuvre et, même, si on la met en œuvre. Jamais je n'admettrai le point de vue des techniciens qui veulent faire de belles images sans réfléchir aux conséquences de leurs actes. Les échographistes doivent être des médecins, pas des manipulateurs : science sans conscience... Et le fœtus n'est pas un produit de transformation ; c'est un être humain. J'appelle au débat.

Israël NISAND est obstétricien au Centre hospitalo-universitaire de Strasbourg, qui abrite le Centre pluridisciplinaire de diagnostic prénatal d'Alsace.



À quelle distance sont les étoiles?

ULRICH BASTIAN

Pour déterminer l'éloignement des étoiles, les astronomes ont surtout utilisé la mesure de la parallaxe. Toutefois, la précision n'est devenue excellente qu'avec le satellite HIPPARCOS.

Contrairement aux autres naturalistes qui étudient en laboratoire l'objet de leur recherche, les astronomes sont condamnés à des observations à distance. Aussi doivent-ils extraire les informations de la lumière émise par les corps célestes ; s'ils mesurent assez facilement le diamètre ou la luminosité des astres, ils savent que ces valeurs ne sont qu'«apparentes», car ils ignorent l'éloignement de leur objet d'étude. Ainsi le Soleil et la Lune apparaissent-ils tous deux au firmament sous un angle d'environ un demi-degré, mais quelle est leur taille réelle, leur nature et leur luminosité absolue?

Nos ancêtres ont commencé à déterminer l'éloignement des corps célestes à l'aide de mesures géométriques, essentiellement la parallaxe : la position apparente d'un astre change avec celle d'un observateur sur la Terre, et la parallaxe est l'angle formé par deux droites menées de l'astre observé à deux points d'observation. Les mesures de parallaxe ont d'abord permis de préciser la position des planètes, puis des étoiles proches. Grâce au satellite HIPPARCOS, on a récemment évalué, avec une précision inégalée jusqu'alors, la distance de nombreuses étoiles lointaines.

Dès l'Antiquité, Aristarque de Samos (environ -310 à -230) et Hipparque de Nicée (environ -190 à -125) observent les phases de la Lune et des éclipses de Lune et de Soleil. Ces pionniers de l'astronomie en déduisent que l'astre du jour doit être plus gros que la Terre. Il faut cependant attendre le XVII^e siècle pour que Johannes Kepler (1571-1630) énonce les lois du mouvement des planètes et que l'on montre que les mouvements des cinq «astres errants», Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne, ressemblent à la Terre. On montra alors que Jupiter est 5,2 fois plus éloigné du Soleil que nous ne le sommes, mais, à l'époque de Kepler, la distance réelle restait inconnue.

La première mesure de parallaxe réussie date de 1672 : l'astronome français Jean Richer (1630-1696) se rend dans l'île de Cayenne, en Guyane française, pour y observer la planète Mars, en même temps que son collègue Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) qui, lui, est resté à Paris. D'après les lois de Kepler, les deux astronomes ont calculé que la planète rouge doit se trouver alors au plus

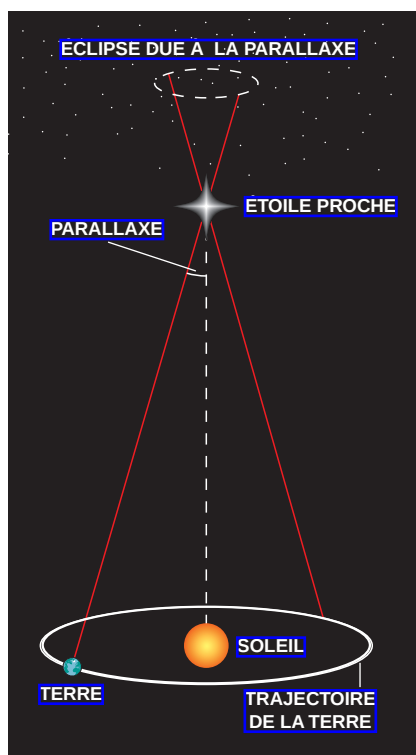
près de la Terre. Cassini et Richer mesurent aussi souvent que le temps le permet la position de Mars par rapport à d'autres étoiles. Ils comparent ensuite les positions relatives de la planète Mars observée de Cayenne et de Paris, et déterminent ainsi sa position apparente, c'est-à-dire sa parallaxe. Les deux astronomes évaluent la parallaxe de Mars à 15 secondes d'arc. Ils en déduisent que la distance entre la Terre et Mars est environ 15 000 fois supérieure à celle qui sépare leurs deux télescopes. Grâce à cette mesure et à la troisième loi de Kepler, on détermine alors la distance de toutes les autres planètes au Soleil.

La mesure de Cassini et Richer constitue un réel exploit, puisqu'il faudra attendre 1769, presque un siècle, pour qu'une nouvelle mesure de parallaxe soit couronnée de succès, à l'occasion d'un passage de Vénus devant le disque solaire ; cette mesure confirmera la distance de la Terre au Soleil calculée après l'expérience de Richer et Cassini.

PLUS PROCHE OU PLUS BRILLANTE?

À la fin du XVIII^e siècle, les télescopes sont devenus si puissants que les astronomes parviennent à observer, outre les étoiles et les planètes, de nombreux corps célestes moins brillants. Ces «nébuleuses» semblent souvent associées à des étoiles isolées ou à des groupes d'étoiles, mais d'autres sont présentes dans des régions du ciel dépourvues d'étoiles. Dès le début de l'étude de ces sources de lumière diffuse, on s'interroge : observe-t-on des nuages de gaz interstellaires ou d'immenses systèmes stellaires comparables à la Voie lactée?

Progressivement on s'intéresse surtout aux nébuleuses spirales, d'autant plus que nombre d'entre elles sont situées dans des zones de la voûte céleste



Une mesure géométrique est la seule détermination des distances cosmiques qui ne fasse pas intervenir d'hypothèse sur les propriétés des objets observés. La position d'une étoile proche change selon la position de la Terre autour du Soleil. L'étoile semble se mouvoir au fil des saisons par rapport à l'arrière-plan. C'est grâce à ce déplacement angulaire, la «parallaxe», et au rayon connu de l'orbite de la Terre autour du Soleil, que l'on calcule l'éloignement de l'étoile.

pauvres en étoiles. Pendant plus d'un siècle, les chercheurs discuteront âprement de leur éloignement réel et de leur nature sans parvenir à une conclusion satisfaisante. Au début du xx^e siècle, le débat atteint une telle intensité qu'en 1920, l'Académie des sciences américaine organise à Washington un grand débat entre Harlow Shapley (1885-1972), qui soutient que la Voie lactée constitue l'ensemble de l'Univers, et Heber Doust Curtis (1872-1942), qui défend la théorie du «monde insulaire», selon laquelle les nébuleuses spirales sont des systèmes stellaires indépendants dans un Univers infiniment plus vaste.

De part et d'autre, les arguments sont convaincants, aussi la question reste-t-elle ouverte. Quelques années plus tard, l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) apporte des éléments en faveur de la théorie du monde insulaire : grâce au nouveau télescope de 2,5 mètres du mont Wilson, il distingue des étoiles individualisées dans une nébuleuse proche, démontrant ainsi l'existence de galaxies hors de la Voie lactée.

Ce débat sur le statut des nébuleuses se réduisait à deux questions qui, en fait, sont liées : quel est l'éloignement de

ces étoiles lointaines ? Quelle est la taille de l'Univers ? Si l'on avait réussi alors à mesurer directement, par la parallaxe, l'éloignement de ces nuages d'étoiles, on aurait eu la réponse. Hélas, les étoiles sont trop éloignées pour que cette mesure soit possible. Aujourd'hui encore, la détermination de l'éloignement des corps célestes reste l'une des principales difficultés de l'astronomie.

Dès les années 1600, les astronomes émettent l'hypothèse que le Soleil est une étoile fixe : la différence de luminosité entre les étoiles et le Soleil tient uniquement, pensent-ils, à la différence de leur éloignement par rapport à la Terre. Toutefois, il faudra attendre que l'on puisse mesurer directement les distances interstellaires pour confirmer cette hypothèse. En l'absence de mesures directes, les astronomes s'efforcèrent de trouver des méthodes indirectes, la plus importante étant la détermination photométrique de la distance, fondée sur des mesures de brillance.

On estime aisément la distance d'un objet céleste à condition de faire une hypothèse sur sa brillance : l'intensité lumineuse apparente d'une étoile observée sur Terre diminue en fonction du carré de la distance à l'observateur. Cette

relation simple permet la détermination de nombreuses distances astronomiques, et les distances mesurées aujourd'hui reposent sur cette méthode.

LA MÉTHODE DE HUYGENS

Christiaan Huygens (1629-1695) est le premier à appliquer aux étoiles la méthode de détermination photométrique des distances. Le naturaliste hollandais raisonne de la façon suivante : si l'on savait déterminer les brillances relatives de Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, et celle du Soleil, le rapport de ces brillances apparentes permettrait d'en déduire les distances respectives des deux astres. Huygens fait l'hypothèse que les deux étoiles ont la même luminosité absolue et cherche à déterminer leurs brillances relatives. Il réussit à affaiblir la lumière émise par le Soleil de façon à n'obtenir qu'un point lumineux de la même brillance apparente que Sirius. Pour ce faire, dans son laboratoire de Paris, il perce un minuscule trou d'épingle dans un disque de laiton disposé dans une chambre noire, et y fait passer la lumière du Soleil. Comme l'affaiblissement n'est pas suffisant, il dispose derrière le trou une bille de verre qui absorbe la lumière.



Hipparque dans son observatoire d'Alexandrie : sur cette représentation, la lunette astronomique découverte à la fin du xvi^e siècle est anachronique ; en revanche, les Grecs utilisaient bien les sphères armillaires (à gauche). En l'an -260, Aristarque de Samos estima, par un raisonnement géométrique simple, que le Soleil devait être beaucoup

plus éloigné de la Terre que ne l'était la Lune, et qu'il devait être beaucoup plus gros. Il trouva que la distance de la Terre à la Lune est égale à 59 fois le rayon de la Terre. En réalité, la valeur de la distance entre la Terre et la Lune oscille entre 55,9 et 63,8 fois le rayon de la Terre, parce que la trajectoire du satellite de la Terre est elliptique.

Huygens détermine ainsi que la distance qui sépare Sirius de la Terre est plus de 28 000 fois supérieure à celle de la Terre au Soleil. Aujourd'hui, on sait que cette distance est proche de 600 000 fois la distance Terre-Soleil, car la brillance de Sirius est notablement supérieure à celle du Soleil.

La méthode de la parallaxe évite de telles erreurs. Cependant, la parallaxe est d'autant plus réduite que l'objet observé est éloigné (elle est inversement proportionnelle à l'éloignement). Huygens calcule que les étoiles sont au moins 10 000 fois plus éloignées de la Terre que les planètes du Système solaire, ce qui signifie que la précision des mesures doit être 10 000 fois meilleure que celle permise à la fin du XVII^e siècle, ce qui semble alors irréalisable.

L'ingénieur Tycho Brahe a l'idée, à la fin du XVI^e siècle, d'observer le même corps céleste, toujours du même endroit, mais à des saisons différentes. Il utilise alors comme longueur de référence, non plus le diamètre de la Terre, mais celui de son orbite autour du Soleil, 20 000 fois plus grande (cette longueur de référence passe de 13 000 kilomètres à 300 millions de kilomètres). Pourtant, malgré la précision (extrême pour l'époque) de ses mesures, Tycho Brahe

ne peut évaluer aucun déplacement de parallaxe des étoiles, ce qui le conduit à réfuter la représentation de Copernic de la Terre tournant autour du Soleil. Il aurait dû conclure de cet échec que les étoiles sont situées à des milliers de fois la distance Terre-Soleil, et que l'Univers est «immensément» grand.

Au XVII^e siècle et au XVIII^e, de nombreux astronomes tentent de mesurer la parallaxe d'étoiles fixes, parfois sans succès, bien que la précision des lunettes d'observation ne cesse d'être améliorée. Pour que les parallaxes soient importantes, ils choisissent les étoiles les plus brillantes ou celles dont la position par rapport aux autres étoiles avait changé en 100 ans : l'une et l'autre de ces propriétés indiquaient qu'il s'agissait d'étoiles proches. Au début du XIX^e siècle, plusieurs astronomes prétendent avoir réussi à mesurer des parallaxes, affirmations rapidement démenties.

En 1838, l'astronome et mathématicien allemand Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) soutient que la seule conclusion que l'on puisse tirer des tentatives de mesure de la parallaxe des étoiles fixes, c'est que ces valeurs sont infimes, inatteignables par les méthodes d'observation à disposition. En d'autres termes, toutes les étoiles observées

jusqu'alors avaient vraisemblablement des parallaxes bien inférieures à une seconde d'arc, et se trouvaient sans doute à une distance plus de 200 000 fois supérieure à celle de la Terre au Soleil. On en déduisit que la mesure de la parallaxe de Sirius faite par Huygens (sept secondes d'arc) était fausse.

LA PATIENCE DE BESSEL

Bessel semble près de renoncer, frustré par plus de 20 années d'efforts infructueux, quand, enfin, il rapporte la première mesure réussie de la parallaxe d'une étoile fixe. Pour ce faire, il avait choisi l'étoile double 61 de la constellation du Cygne, dont la position au firmament change de cinq secondes d'arc par an, ce qui semblait faire de cette étoile l'une des plus proches du Soleil.

Durant 98 nuits claires, en 1837 et 1838, Bessel détermine les différences angulaires entre l'étoile double 61 et deux étoiles proches peu brillantes (certainement beaucoup plus éloignées du Soleil), avec la précision inégalée jusqu'alors de 0,13 seconde d'arc. Si le professeur de Königsberg passa de nombreuses nuits inconfortables, l'œil rivé à son télescope, sa patience fut récompensée : au mouvement, déjà connu, de l'étoile dans le firmament se superposait une petite variation, exactement celle que l'on attendait d'un effet de parallaxe. Bessel en déduisit une parallaxe de 0,314 seconde d'arc, ce qui correspondait à une distance de 10,4 années-lumière. Toute la communauté des astronomes applaudit ce progrès considérable.

Au milieu du XIX^e siècle, la méthode laborieuse de mesure de la parallaxe est un peu améliorée avec la lunette astronomique, mais la précision reste médiocre. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que la photographie fait réellement progresser la méthode. Le repérage des petites étoiles sur une plaque photographique est notablement plus simple et plus rapide que l'observation à l'œil nu avec une lunette. En 1935, on disposait déjà de 4 000 mesures de parallaxe déterminées par des photographies. En 1991, la récolte était de 8 000, avec une précision toujours meilleure.

Pourtant, ce n'était pas encore satisfaisant, car la valeur de la plupart des mesures de parallaxe étaient à peine supérieures à l'erreur de mesure (environ un centième de seconde d'arc) : on ne peut déduire l'éloignement d'une étoile à partir de la parallaxe – à un facteur deux près – que lorsque l'erreur moyenne de la mesure est inférieure à 20 pour cent de la valeur absolue. En 1991, ce critère d'exactitude n'était satisfait que par 1 800 des 8 000 étoiles dont la parallaxe avait



Friedrich Wilhelm Bessel fut le premier, en 1838, à déterminer la parallaxe d'une étoile et, par conséquent, sa distance à la Terre ; il s'agissait de l'étoile double 61 de la constellation du Cygne. Sa distance a été déterminée à nouveau par le satellite HIPPARCOS : elle est égale à 11,4 années-lumière, et cette étoile double se déplace de 1,5 degré au firmament, en l'espace d'un millénaire (flèches sur la carte stellaire ci-dessus), valeur qui correspond à trois fois le diamètre de la Lune.

été évaluée, soit moins du quart. Et ces 1 800 étoiles sont «à notre porte cosmique», à moins de 12 années-lumière. Ainsi, l'arpentage de l'Univers lointain restait l'apanage des méthodes indirectes, même si les mesures directes de parallaxe étaient des jalons précieux.

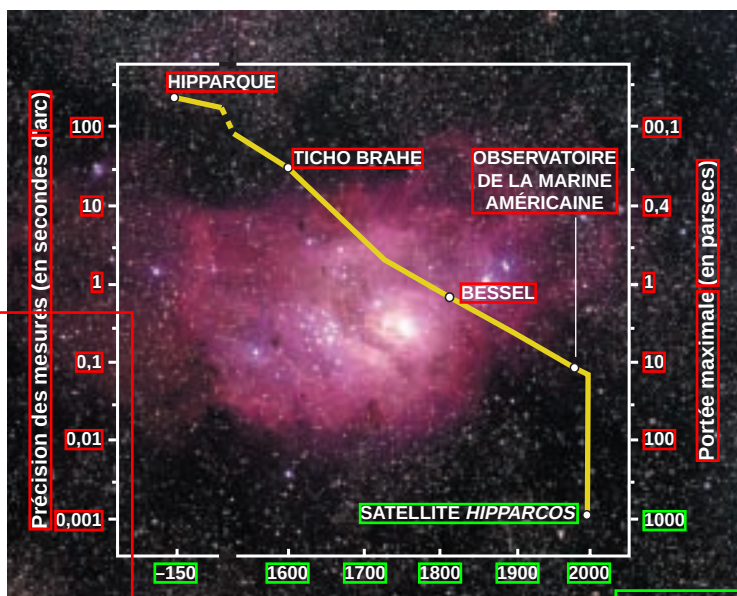
Les photographies sur plaques, enregistrées sous forme numérique, se sont révélées d'une importance primordiale pour les mesures de parallaxe, mais aussi pour les mesures d'éloignement fondées sur la photométrie. Pour la première fois, on pouvait mesurer précisément la luminosité des étoiles. Au moyen des mesures d'éloignement cosmique, les astronomes purent enfin sonder l'immensité de l'Univers sur des milliards d'années-lumière, tandis que les mesures de distance à l'aide du déplacement de parallaxe ne permettaient pas de dépasser 300 années-lumière. Pour déterminer des distances supérieures, les astronomes recoururent à des méthodes indirectes, fondées sur des critères de distance établis et calibrés avec des astres dont l'éloignement est connu.

Les étoiles les plus lointaines qui restent accessibles à une mesure de parallaxe sont environ 10 millions de fois plus éloignées de la Terre que ne l'est le Soleil, mais l'Univers observable grâce aux télescopes actuels est aujourd'hui 100 millions de fois plus étendu.

LE SATELLITE HIPPARCOS

Pour découvrir cette immensité, il fallait encore ajouter plusieurs échelons à notre échelle des distances cosmiques. Et pour chacun de ces échelons, il fallait faire des hypothèses sur les propriétés des corps célestes observés, avec le risque qu'une échelle de mesure des distances initialement correcte ne devienne de plus en plus imprécise à mesure que l'éloignement augmente. Ainsi, bien que la parallaxe de plusieurs étoiles proches du Soleil soit connue avec une grande précision, la taille de l'Univers lointain restait mal connue. Pour remédier à ces deux problèmes, il fallait mesurer des parallaxes plus nombreuses et plus précises.

La détermination d'un grand nombre de parallaxes permet aux astronomes de mieux comprendre la formation et la structure intérieure des étoiles, leur



La précision absolue (en jaune) des mesures de la position des étoiles a approximativement doublé tous les 60 ans au cours des 300 dernières années. Le satellite HIPPARCOS a fourni des mesures dont la précision est égale à celle que l'on aurait obtenue dans 300 ans au rythme des progrès passés.

histoire et leur évolution, ainsi que l'origine de leur énergie. La comparaison de nombreuses paires d'étoiles de même type, mais situées à des distances différentes, améliore la précision de l'échelle des distances.

Toutefois, dans le voisinage immédiat du Soleil, il n'y a pas de représentants de types intéressants d'étoiles : les objets très lumineux sont rares dans le cosmos. La parallaxe d'une étoile située à 30 années-lumière mesure environ 0,1 seconde d'arc, et celle d'une étoile distante de 300 années-lumière n'est plus que de 0,01 seconde d'arc. Si l'on veut déterminer ces deux distances avec une précision de l'ordre de 20 pour cent, il faut faire des mesures précises à 0,02 seconde d'arc dans le premier cas, et à 0,002 seconde d'arc dans le second. C'est donc la précision de l'instrument utilisé qui est le facteur limitant pour l'exploration de l'Univers.

Il est extrêmement difficile de mesurer des valeurs de parallaxe avec une précision de 0,002 seconde d'arc. De surcroît, les variations de température, la pesanteur, le vieillissement des matériaux, les modifications infimes des émulsions photographiques, sont autant de sources d'imprécision. À ces difficultés techniques s'ajoutent les perturbations dues à la réfraction variable de la lumière des étoiles par l'atmosphère terrestre, le scintillement des étoiles résultant de perturbations atmosphériques et les irrégularités de la rotation de la Terre.

La quasi-totalité des difficultés tient au fait que les instruments de mesure sont sur la Terre. En 1967, l'astronome français Pierre Lacroute a proposé la

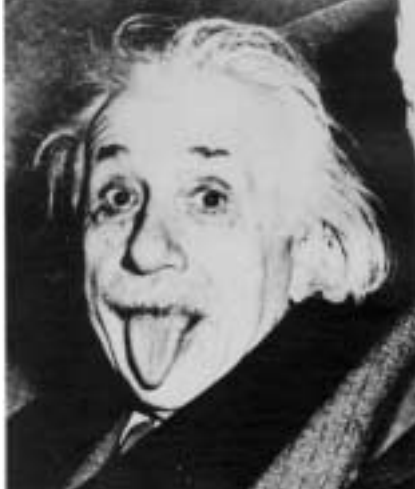
construction d'un instrument de mesure placé dans l'espace. Avec un tel instrument, il espérait déterminer la parallaxe de quelque 700 étoiles avec une précision de l'ordre de 0,01 seconde d'arc. Il fallut attendre 13 ans, pour que l'Agence spatiale européenne (ESA) décide la construction d'un tel satellite. Entretemps, les progrès techniques réalisés allaient permettre de déterminer la position, le mouvement annuel et la parallaxe de quelque 100 000 étoiles avec une précision de 0,002 seconde d'arc.

Ce projet, dénommé HIPPARCOS, en hommage à l'astronome Hipparque de la Grèce antique, était aussi l'acronyme dérivé

des premières lettres de *High Precision Parallax Collecting Satellite* (satellite de haute précision pour la mesure de la parallaxe). Le satellite fut achevé en 1987 et placé en orbite en 1989. Les mesures furent effectuées entre la fin de 1989 et le milieu de 1993. Grâce à HIPPARCOS, les astronomes ont déterminé la parallaxe de près de 120 000 étoiles avec une précision moyenne de 0,001 seconde d'arc, soit presque deux fois meilleure que celle escomptée (on put ainsi évaluer des distances doubles des distances prévues avec la même précision relative). Le volume de l'Univers exploré avec précision est ainsi huit fois plus vaste.

HIPPARCOS a amélioré d'un facteur 100 la précision des coordonnées célestes et a augmenté notablement le nombre de parallaxes fiables : on connaît aujourd'hui avec précision la distance de 50 000 étoiles. Depuis le milieu de l'année 1997, la communauté des astronomes analyse et exploite cette immense mine de données. Outre la précision obtenue sur les mesures de parallaxe, les positions et les mouvements des étoiles, ce satellite permit la découverte de plus de 3 000 nouvelles étoiles doubles et de 8 000 nouvelles étoiles variables, fit dix millions de mesures de brillance extrêmement précises et confirma la théorie générale de la relativité d'Einstein par l'observation de la courbure de la lumière sous l'influence de la pesanteur au voisinage du Soleil.

Ulrich BASTIAN est astronome à l'Institut de calcul astronomique d'Heidelberg.



La détection des saveurs

HERVÉ THIS

Découverte d'un récepteur des molécules du goût, celui de la cinquième saveur.

Un des Graals de la physiologie est enfin dans nos mains ! Depuis des décennies, les physiologistes cherchent comment les cellules des papilles gustatives détectent les molécules du goût. On supposait que ces cellules portent, à leur surface, des molécules nommées récepteurs, sur lesquels les molécules sapides se fixent, mais ces récepteurs étaient insaisissables : comme ils se lient faiblement aux molécules sapides, on ne parvenait pas à les extraire de solutions préparées à partir des cellules des papilles. Cette difficulté expérimentale résulte d'un avantage physiologique : si la liaison était forte, les récepteurs resteraient stimulés longtemps par une même molécule, et la résolution du système gustatif serait faible ; les gastronomes dégusteraient au ralenti !

En se fondant précisément sur cette capacité de liaison réduite, des physiologistes de l'Université de Miami ont identifié l'un des récepteurs cherchés : celui de la saveur nommée «umami». On a longtemps prétendu que la bouche ne détectait que quatre saveurs (salé, acide, amer, sucré), mais on avait bien hâtivement examiné la question. Dès 1908, Kikunae Ikeda, de l'Université impériale de Tokyo, avait identifié que le glutamate (la forme ionisée d'un acide aminé, l'acide glutamique) engendrait une sensation particulière, qui n'était ni salée, ni sucrée, ni acide, ni amère.

Après des décennies de lutte contre les idées reçues, la «cinquième saveur» s'est imposée, surtout quand s'est popularisée dans les pays occidentaux la cuisine asiatique, qui utilise beaucoup le monoglutamate de sodium. On a notamment montré que même les animaux détectent cette saveur. Pourquoi ? Peut-être parce que le glutamate est présent dans de nombreux aliments riches en protéines (qui sont des enchaînements d'acides aminés), tels que la viande, le lait et les produits de la mer. Et la détection des saveurs est importante pour l'organisme parce que c'est la clé de la satiété : on n'arrête pas de manger parce qu'on a le ventre plein, mais parce que

le cerveau, alerté par le système sensoriel, signale à l'organisme quand une quantité suffisante d'aliment a été consommée.

À la recherche de récepteurs du glutamate, Nirupa Chaudhari et ses collègues de l'Université de Miami se sont fondés sur des résultats obtenus il y a dix ans par Annick Faurion, du Laboratoire de neurobiologie sensorielle, à Massy : puisque le glutamate est un neuromédiateur, c'est-à-dire une molécule que les neurones du cerveau s'échangent, pourquoi ne pas chercher dans les cellules gustatives de la bouche des molécules analogues aux récepteurs neuronaux ?

Suivant cette idée, N. Chaudhari et ses collègues ont cherché des récepteurs couplés à des protéines G, c'est-à-dire à des protéines qui sont plongées dans la membrane des cellules gustatives et qui transmettent le message détecté par le récepteur (ce dernier dépasse à l'extérieur de la cellule). Les physiologistes ont ainsi découvert une étonnante protéine qui correspond à une forme tronquée d'un récepteur des neurones : le «récepteur métabotropique du glutamate», en abrégé mGluR4.

Dans le cerveau, ce récepteur (non tronqué) réagit à de très faibles concentrations en glutamate : sans modification, il aurait été complètement saturé par les quantités notables de glutamate que l'on a dans la bouche à la dégustation de certains plats. N. Chaudhari et ses collègues ont montré que la troncature de la protéine est probablement une adaptation à la fonction gustative : la forme du récepteur qui est synthétisée par des tissus gustatifs de rat a perdu ses 300 premiers acides aminés, et le récepteur tronqué se lie faiblement au glutamate. Mieux encore, les concentrations qui l'activent sont du même ordre de grandeur que les seuils de perception mesurés chez des rats (le seuil de perception est la plus faible concentration à laquelle les animaux sont sensibles).

Pourquoi la troncature de la protéine réduit-elle son affinité pour le glutamate ? Les physiologistes ont observé

que la molécule ressemble beaucoup à une protéine de bactéries et que l'on a bien étudiée par cristallographie : la protéine bactérienne a deux sites de liaison au glutamate. La troncature semble faire disparaître le plus sensible des deux.

La protéine trouvée est-elle bien un récepteur gustatif de la saveur umami ?

Les physiologistes se sont évidemment demandés si elle ne servait pas à la transmission de l'information nerveuse, en aval des cellules gustatives, mais les confirmations sont nombreuses. Tout d'abord, la protéine mGluR4 est activée par d'autres molécules sapides que des rats ne distinguent pas du glutamate. C'était prévisible, car A. Faurion avait observé que la langue et le cerveau réagissaient de façon analogue à ces molécules. De plus, la protéine mGluR4 tronquée n'est synthétisée que dans les papilles ; enfin ni la protéine mGluR4 complète ni la forme tronquée n'ont été dépistées dans la bouche à l'extérieur des papilles gustatives.

La découverte pose de nombreuses questions : le mGluR4 tronqué est-il le seul récepteur de la saveur umami ? Intervient-il dans la perception d'autres saveurs ? Les cellules réceptrices ne portent-elles chacune qu'un seul type de récepteurs ? Le résultat obtenu semble être le début d'une série, car les physiologistes ont trouvé d'autres molécules de la même classe, qui semblent également être des récepteurs gustatifs. Il aura aussi sans doute des applications : connaissant la structure de la protéine mGluR4, on pourra utiliser des systèmes de modélisation moléculaire pour chercher quelles molécules se lient à la protéine.

La conception informatique de molécules sapides inédites semble proche.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 mars 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Une tombe princière au Kazakhstan

Les archéologues ont retrouvé 2 corps et 12 chevaux harnachés, sauvagés de la décomposition par le gel.

Les cavaliers scythes étaient des nomades des steppes, qui vivaient au premier âge du fer, dans l'Est du Kazakhstan, au Sud de la Sibérie. L'essentiel de nos connaissances sur leur vie provient de la fouille de leurs sépultures, disséminées dans les montagnes de l'Altaï, entre la Russie, la Mongolie et la Chine. Certains objets étrangers et motifs empruntés à d'autres civilisations montrent que les Scythes participaient à des échanges entre la Perse et la Chine. Les archéologues s'interrogent sur ces relations internationales surprenantes pour des pasteurs nomades.

La fouille d'une tombe princière de la première moitié du IV^e siècle avant notre ère, près du village de Berel, au Kazakhstan oriental, apporte de nouveaux éléments sur cette civilisation. Henri-Paul Francfort, de la Mission archéologique française en Asie centrale (CNRS), Zainullah Samashev, de l'Institut d'archéologie du Kazakhstan et leurs collègues y ont retrouvé les corps de deux personnes, dans une chambre funéraire princière, et des chevaux harnachés, sacrifiés pour l'occasion. L'eau qui s'était infiltrée dans la tombe avait gelé, empêchant toute décomposition, comme dans d'autres sépultures de la région, où la température descend parfois jusqu'à 40 degrés au-dessous de zéro en hiver.



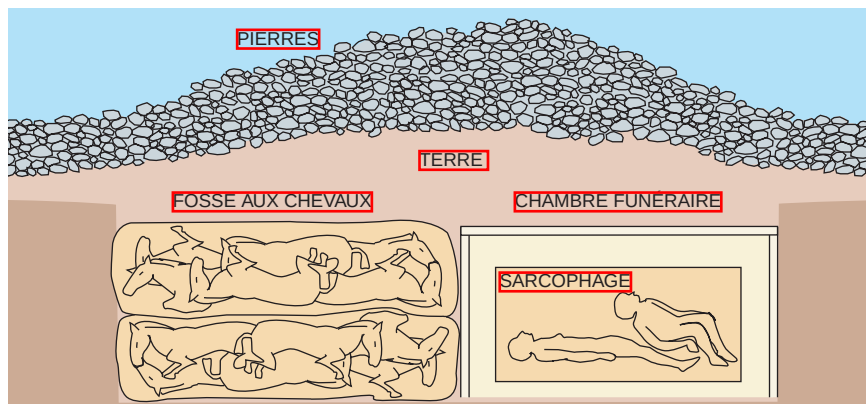
Dans le paysage de montagne de l'Altaï, on ne voit de la tombe que le tumulus de pierres.

Avant les fouilles, on ne voyait de la tombe que le tumulus de pierre de 23 mètres de diamètre qui la recouvrait, niché au creux d'une vallée, à 1 200 mètres d'altitude. Les archéologues ont découvert qu'au-dessous, les Scythes avaient creusé une vaste fosse rectangulaire, de six mètres de profondeur. La moitié de la fosse était occupée par la chambre funéraire dont les parois étaient en planches de bois : un signe de richesse par rapport aux constructions en rondins, plus courantes. Ces planches étaient recouvertes d'écorces et de feutre. Dans la chambre funéraire, un sarcophage en mélèze reposait sur de petites dalles de pierre. Il contenait le corps d'un jeune homme et celui d'une vieille femme. Dans l'autre moitié de la fosse, tapissée d'écorces, les Scythes avaient disposé 12 chevaux : six sur le fond et six par dessus. Leur peau et les poils ont été conservés par le gel. Leur harnachement comporte de nombreux ornements en étoffes polychromes et en bois sculpté doré, notamment des cornes de bouquetins postiches.

Des pillards avaient creusé un étroit tunnel vertical, du sommet du tumulus à la chambre funéraire, passant à travers

le corps d'un des chevaux gelés. Là, ils ont éventré l'un des côtés du sarcophage, car ils ne pouvaient pas ouvrir son couvercle, bloqué par le plafond bas (à 1,2 mètre du plancher). Puis ils ont dépouillé le corps du jeune homme de ses atours (dans d'autres tombes, les archéologues ont retrouvé le corps du défunt richement paré de bijoux et de boucles de ceinture en or). Ce faisant, ils ont provoqué le dégel d'une partie du contenu de la tombe. Des analyses de l'état de décomposition et de la recristallisation de la glace sur le passage des pillards, par microstratigraphie, indiquent que ce pillage a eu lieu quelques années seulement après l'inhumation. Moins de 20 ans plus tard, d'autres personnes (peut-être les Scythes qui avaient construit la tombe) ont utilisé le trou fait par les pillards pour repousser le corps du jeune homme vers le fond du sarcophage et y ajouter le corps de la femme âgée. C'est la première fois qu'une fouille révèle une telle pratique funéraire de double inhumation. L'analyse de la peau et des cheveux encore intacts révélera peut-être si ces deux personnes étaient apparentées.

Pour étudier la tombe, les archéologues ont employé une nouvelle méthode de « fouille en blocs gelés » : ils ont découpé les chevaux en blocs, les ont transportés, avec les corps et tout ce que contenait la tombe dans un camion frigorifique, jusqu'à la chambre froide du laboratoire d'Almaty, la capitale du Kazakhstan. Pendant la fouille elle-même, ils ont refroidi la tombe avec de la glace et l'ont protégée avec des couvertures de survie quand la température était supérieure à 0 °C. En maintenant ainsi la « chaîne du froid », tous les éléments de la tombe resteront dans l'état de conservation où ils ont été trouvés. Grâce au gel, les archéologues auront le temps de réaliser des analyses qui répondront, au moins en partie, aux questions encore soulevées par cette sépulture.



La fosse de cette tombe scythe contenait les corps de 12 chevaux, disposés sur deux niveaux, et une chambre funéraire en bois, avec les corps de deux personnes. L'ensemble était recouvert de terre et de pierres. La fosse est plus profonde que sur ce schéma.

Le renouveau du X

Grâce à deux nouveaux télescopes X spatiaux, les astronomes voient l'Univers d'une autre «couleur».

En juillet 1999, la navette spatiale *Columbia* met en orbite le télescope X américain *Chandra*. En décembre, le télescope européen *XMM-Newton* est envoyé par un lanceur *Ariane 5*. Avec ces deux observatoires spatiaux, d'une résolution spatiale et spectrale inégalées, les astronomes disposent d'une nouvelle fenêtre sur les événements de haute énergie siégeant dans l'Univers.

Le rayonnement X a le mauvais goût d'être absorbé par l'atmosphère terrestre, de sorte qu'il est impossible d'observer le moindre photon X du sol. Pour s'affranchir de cette limitation, les astronomes envoient le premier satellite X en 1970, *Uhuru*, qui laisse entrevoir la richesse du ciel X. Malgré sa faible résolution (inférieure à 30 minutes d'angle, soit la taille angulaire de la Lune), *Uhuru* fait des découvertes capitales, dont celle des binaires X, où une étoile ordinaire et une étoile à neutrons tournent l'une autour de l'autre. Divers satellites avec des détecteurs sensibles au rayonnement X sont envoyés ces dernières décennies, notamment le télescope français *Sigma*.

Avec ces deux nouveaux satellites X, l'astrophysique des hautes énergies franchit une nouvelle étape. Ces deux satellites sont-ils concurrents? Pas réellement, car leurs domaines de spécialité diffèrent.

Chandra n'a pas une sensibilité très bonne (sa surface efficace n'est que le cinquième de celle de *XMM*), mais obtient des images avec une résolution spatiale de 0,5 seconde d'angle, contre 5 secondes d'angle pour *XMM*; à l'inverse, *XMM* est particulièrement adapté pour la spectrographie de sources X étendues ou peu lumineuses.

À peine lancé *Chandra* a pris des images inédites du centre de notre Galaxie, révélant que l'objet *Sagittarius A** coïncide avec une source X. Le satellite allemand *ROSAT* avait déjà observé une source X au centre galactique, mais avec une résolution de cinq secondes d'angle. Avec une résolution dix fois meilleure, *Chandra* a distingué, dans cette source, d'autres sources plus petites et une émission diffuse. De fait, la source qui est exactement au centre et qui coïncide avec *Sagittarius A** est encore plus faible que prévu. Si *Sagittarius A** est un trou noir massif, comme l'imaginent les astronomes à partir d'autres observations, la quantité de rayonnement X émis devrait être 100 000 fois supérieure à ce qui est détecté. Nouvelle observation, nouveau mystère...

Autre succès, *Chandra* a résolu un champ d'étoiles jeunes dans la nébuleuse d'Orion. Là où l'on ne voyait auparavant que quelques sources X, sans savoir leur provenance, les observations ont révélé du rayonnement X émis par des milliers d'étoiles jeunes, certaines d'entre elles étant encore confinées dans le cocon de poussières de leur enfance.

En orbite depuis peu, le télescope européen *XMM* est encore en phase de test. Selon les responsables de l'Agence spatiale européenne (ESA), tous les détecteurs sont opérationnels. La caméra *EPIC*, à la construction de laquelle le CEA-Saclay a participé, a obtenu ses premières images fin janvier. Sur l'une d'elles – une région de formation d'étoiles dans le grand Nuage de Magellan (figure 2) – on note des régions diffuses chaudes dont on n'avait jusqu'à qu'une connaissance partielle. Grâce au satellite allemand *ROSAT*, les astronomes avaient déjà obtenu des clichés en X de cette région du ciel, mais avec moins de détails et surtout, ils n'avaient presque aucune information sur le spectre.

Le satellite X américano-japonais *ASCA* avait produit des spectres des sources les plus brillantes de cette région, mais avec une résolution spatiale médiocre. Sur une autre image d'un groupe de galaxies (figure 1), on discerne des galaxies en X qui n'avaient jamais été vues auparavant.

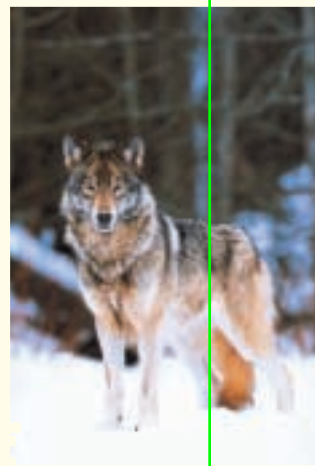
BRÈVES

Big Bang miniature

Les quarks et les gluons, les constituants ultimes de la matière, sont aujourd'hui confinés dans les neutrons et les protons et il est impossible de les en extraire. Toutefois, les physiciens pensent qu'aux premiers instants du Big Bang, lorsque la température était supérieure à 100 000 fois celle qui règne au centre du Soleil, soit $1,5 \times 10^{12}$ degrés, les quarks n'étaient pas confinés et formaient, avec les gluons, un état de la matière nommé «plasma quark-gluon». En heurtant des noyaux de plomb les uns contre les autres à haute énergie, les physiciens du CERN, semblent avoir recréé cet état de la matière pendant un instant très bref (10^{-25} seconde). La détection n'est pas encore avérée, mais le faisceau de preuve est convergent.

Entre chien et loup

D'après l'ADN d'un jeune animal, tué l'été dernier en Norvège, son père est un chien et sa mère une louve. Il aurait quatre frères et sœurs toujours en vie. Les loups, dont la population se limite à 50 ou 70 individus en Scandinavie, ont besoin de sang neuf pour éviter les effets néfastes de la reproduction entre animaux apparentés. Des gènes canins préviendraient-ils le dépérissement de cette population?



Biodiversité due à l'homme

Le naturaliste Philippe Bruneau de Miré a comparé la richesse en espèces d'insectes de plusieurs zones de la forêt de Fontainebleau. Son analyse a révélé que certains milieux très fréquentés par l'homme jouissent d'une faune plus riche que des milieux protégés dont l'homme est exclus. Ainsi, conclut-il, «en Europe occidentale, où les aires protégées n'occupent qu'une surface limitée, l'exclusion de toute fréquentation humaine pourrait avoir sur certains milieux l'effet inverse de celui escompté». L'homme n'est pas toujours un ennemi de la biodiversité.

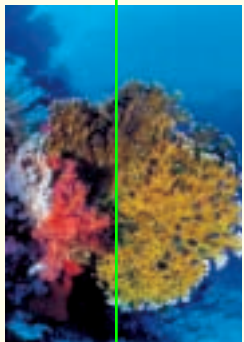
1. Groupe de galaxies Hickson 16, un groupe de galaxies un peu plus gros que notre «groupe local».

Une seconde vue pour les aveugles

Les chauves-souris et les dauphins utilisent l'écholocation pour repérer les obstacles, une méthode de détection sonore par impulsions génératrices d'échos. Pourquoi pas les aveugles ? Des scientifiques anglais de l'Université de Leeds ont pensé à un dispositif, intégré à un gant, qui émettrait des ultrasons et vibrerait sous la main en retour. L'emplacement de la vibration indiquerait l'emplacement de l'obstacle, fournissant ainsi une carte tactile de l'environnement. La commercialisation de ce dispositif est prévue dans deux ans. Les pompiers pourraient aussi s'en servir pour se repérer dans la fumée, ainsi que les plongeurs dans les eaux boueuses.

Herbicide corallien

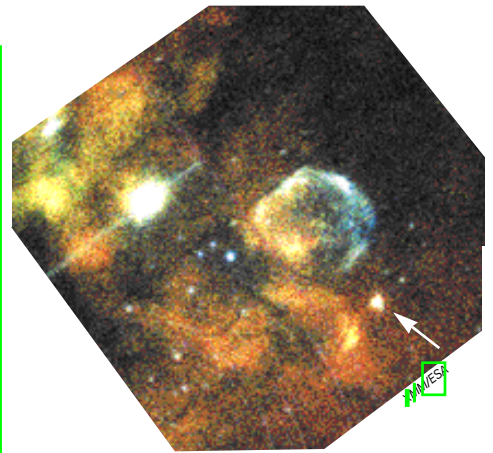
Les récifs coralliens sont dépourvus des plantes que l'on trouve à proximité, parce que les animaux de ces récifs sécrètent des substances qui empêchent ces plantes de croître. En analysant des échantillons d'organismes de ces récifs, J. Burnell, de l'Université James Cook a découvert des substances qui inhibent la photosynthèse des plantes C4, qui utilisent des intermédiaires à quatre atomes de carbone pour fabriquer leurs molécules énergétiques. Or, la plupart des mauvaises herbes sont des plantes C4, tandis que de nombreuses plantes cultivées sont des plantes C3. Ces substances nouvelles constituent des herbicides naturels prometteurs.



Les championnes du CO₂

Le remplacement des vieilles voitures par des neuves augmente les émissions de gaz à effets de serre. Pour les évaluer, des chercheurs hollandais ont tenu compte du cycle de vie complet des voitures. Les usines de fabrication émettent du dioxyde de carbone, comme les usines de recyclage. De plus, les voitures neuves sont plus lourdes et plus puissantes que les vieilles : elles consomment davantage. Ainsi en réduisant la durée de vie des voitures de trois ans, on augmenterait les émissions de dioxyde de carbone de quatre pour cent. Ce chiffre est optimiste, si l'on considère qu'on prend sa voiture plus souvent, quand elle est neuve et confortable.

Mais l'intérêt scientifique de *XMM* réside aussi dans son spectromètre, nommé *RGS*. Tout comme un prisme sépare la lumière visible en ses rayonnements constitutifs, le spectromètre de *XMM* sépare le rayonnement X en ses différentes composantes à l'aide de réseaux dispersifs. Selon Jean Ballet qui prépare le traitement des données *XMM* au CEA-Saclay, la qualité des premiers spectres est étonnante : on y voit deux ordres spectraux, tout comme on peut voir, lorsque les conditions atmosphériques sont propices, un second arc-en-ciel à côté du premier. Sur ces spectres, on distingue sans ambiguïté les raies des éléments qui émettent les rayons X analysés et les raies des différents ions de chaque élément. De la sorte, l'estimation de la composition chimique de la région observée est meilleure et la détermination des conditions physiques du gaz (température et densité) est plus précise. Place à la spectroscopie X des sources chaudes du ciel.



2. Une région du grand Nuage de Magellan vue en X. Le code des couleurs correspond à l'énergie moyenne des photons, ou de manière équivalente, à la température du milieu : le rouge représente des régions plus froides que le bleu. La source compacte (flèche) est le reste de l'explosion de la supernova de 1987. La tache blanche à gauche du centre et la structure diffuse circulaire bleutée (vers la droite) sont des restes d'explosion de supernovae plus anciennes.

Une oreille bionique

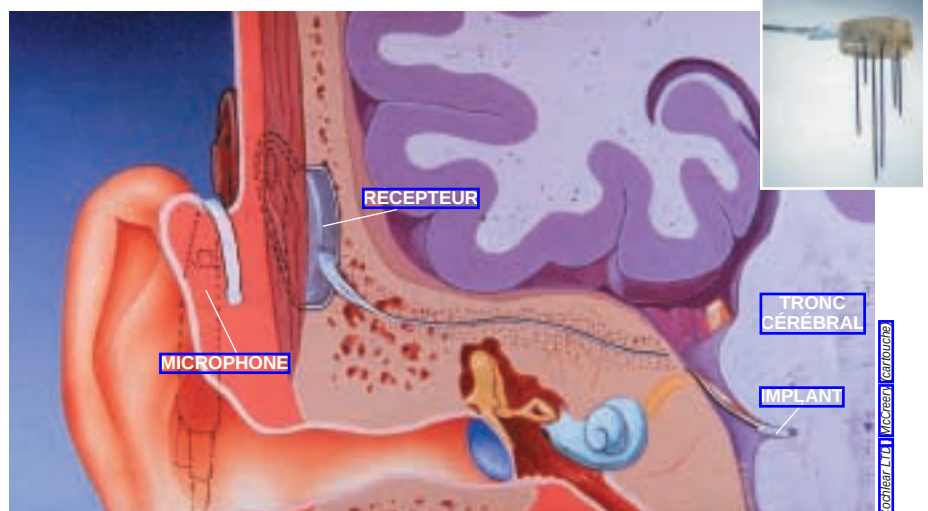
Une nouvelle prothèse auditive implantée dans le tronc cérébral restaure l'ouïe.

Dans le monde, des dizaines de milliers de sourds ont retrouvé l'ouïe avec un implant cochléaire. Cet appareil stimule le nerf cochléaire, qui transmet l'information auditive jusqu'au cerveau, à l'intérieur de la cochlée, l'organe en colimaçon, à l'intérieur de l'oreille interne, où les vibrations produites

par les ondes sonores sont converties en influx nerveux. Les utilisateurs de cet appareil peuvent alors suivre une conversation sans recourir à la lecture des mouvements des lèvres.

Cependant, pour les malades dont le nerf cochléaire est lésé, il faut cibler des relais plus éloignés dans le système de l'audition. Douglas McCreery, de l'Institut de recherche médicale Huntington, en Californie, a mis au point une nouvelle prothèse auditive reliée directement au tronc cérébral, la partie du système nerveux central qui relie la moelle épinière au cerveau.

Cet implant consiste en un microphone extérieur qui transmet les stimulus



Un microphone, placé sur l'oreille externe envoie les stimulus sonores à un récepteur qui les transforme en signaux électriques. Ces derniers sont transmis dans le tronc cérébral grâce à six micro-électrodes de longueur différente (en haut, à droite).

sonores à un récepteur greffé sous le cuir chevelu. Ce récepteur envoie ensuite des signaux électriques jusqu'à l'autre extrémité composée d'un groupe de six micro-électrodes en iridium qui pénètrent dans le tronc cérébral au niveau du noyau cochléaire ventral, l'un des principaux relais de l'information auditive normalement transmise par la cochlée. Cet implant véhicule des informations auditives – des fréquences sonores – appropriées à la compréhension du langage.

À la fin des années 1970, des neurophysiologistes avaient déjà mis au point un prototype d'implant auditif dans le tronc cérébral. Ils espéraient alors traiter des malades atteints d'une neurofibromatose de type 2, chez qui des tumeurs se développent sur les deux nerfs de la huitième paire de nerfs crâniens, qui contiennent notamment le nerf cochléaire. Le seul recours est l'ablation des tumeurs, mais l'opération détruit souvent le nerf, condamnant les personnes opérées à une surdité profonde et irréversible.

L'implant était alors composé de huit électrodes plates que l'on plaçait à la surface du tronc cérébral, à proximité du noyau cochléaire ventral. Les 150 bénéficiaires de cet implant ont retrouvé une audition suffisante pour améliorer leur lecture des mouvements de lèvres et pour percevoir leur environnement sonore. Toutefois, ils étaient encore incapables de comprendre une conversation sans support visuel.

L'efficacité limitée de ces implants résulte de l'architecture du noyau cochléaire ventral. Celui-ci est composé d'une superposition de couches de cellules nerveuses correspondant chacune à une fréquence donnée : plus la couche est profonde, plus la fréquence est élevée. Avec les anciennes prothèses, quel que soit le nombre d'électrodes en surface, une seule hauteur sonore était perçue.

Or, la compréhension d'un discours requiert au moins la distinction de quatre fréquences. Dans le nouvel implant, les six micro-électrodes pénètrent dans le tronc cérébral à des profondeurs différentes : elles stimulent donc des couches de cellules nerveuses sensibles à des fréquences distinctes. Les conversations téléphoniques deviennent possibles !

Les nouveaux implants seront d'abord utilisés conjointement avec les anciens dispositifs. Ainsi, les bénéficiaires disposeront d'un moyen de secours. De plus, pour minimiser les risques, ces nouveaux implants ne concerneront au départ que les malades qui subissent une opération chirurgicale, tels ceux atteints d'une neurofibromatose de type 2, car la mise en place de cet implant est difficile et invasive.

L'érosion des plages...

...est due à un déficit naturel en sédiments.

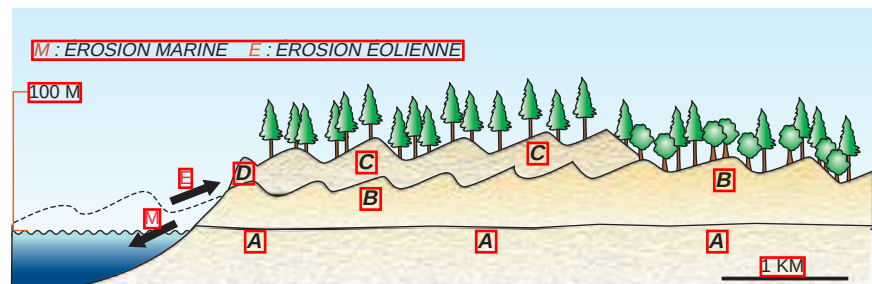
L'érosion et le recul des plages s'observent partout dans le monde. La légère élévation contemporaine du niveau de la mer, estimée à 1,5 millimètre par an depuis une centaine d'années, n'explique pas cette régression, pas plus que la recrudescence de la force et de la fréquence des tempêtes, constatée au cours des dernières décennies. La cause du phénomène est ailleurs : les sédiments arrivent aujourd'hui en quantité insuffisante pour compenser l'érosion. Ce déficit résulte d'une cause naturelle, même si des actions humaines, telles les extractions de sable et de graviers sur les côtes ou les retenues des charges alluviales solides en arrière des barrages construits sur les fleuves, l'ont encore aggravé.

Les matériaux des plages sont, pour une large part, hérités d'une période d'abondance, aujourd'hui révolue. Pendant la dernière glaciation, alors que le niveau de la mer avait baissé d'une centaine de mètres, la plate-forme conti-

nentale était fortement émergée ; elle recueillait des sédiments apportés par les glaciers, par les cours d'eau et par les vents. Lors de la fonte des grands glaciers, la mer, dont le niveau remontait, repoussa devant elle une grande partie des sables et des galets qu'elle rencontrait. Quand son niveau s'est stabilisé, il y a environ 6 000 ans, ces matériaux se sont déposés sur certains littoraux, formant d'amples plages, souvent associées à de vastes champs de dunes. La réserve en sédiments de l'avant-côte une fois épuisée, la pénurie s'installa ; elle se poursuit aujourd'hui. C'est elle qui explique la prédominance de l'érosion sur les plages depuis quelque deux millénaires.

En France, cette hypothèse est confirmée par des études récentes sur l'évolution du littoral d'Aquitaine, par le BRGM et l'IFREMER, d'une part, par le Département de géologie et d'océanographie de l'Université de Bordeaux, d'autre part. Ce long secteur de côte sans falaises commence à l'estuaire de la Gironde, duquel ne sortent qu'occasionnellement des particules en suspension, bien incapables de nourrir des plages ; il s'étend jusqu'à l'embouchure de l'Adour sans recevoir aucun apport fluvial notable.

Pourtant, il y eut une époque pendant laquelle, à partir d'une plage bien alimentée en sable, située à l'Ouest de



1. Coupe Ouest-Est de la côte du littoral aquitain. Le sable des Landes (A) a été déposé par le vent pendant la dernière époque glaciaire. Les dunes paraboliques (B) se sont formées il y a 5 000 à 2 000 ans, à une époque où le sable était abondant. Les dunes modernes (C) sont apparues à l'époque gallo-romaine, et ont été fixées par une forêt de pins au XIX^e siècle. Ainsi la côte est modelée par l'érosion marine (M) et par l'érosion éolienne (E), qui attaquent le bourrelet dunaire (D).



2. Près de Capbreton, dans les Landes, un blockhaus du Mur de l'Atlantique a basculé sur la plage à cause de l'érosion marine qui en a sapé les bases.

Mémoire qui flanche

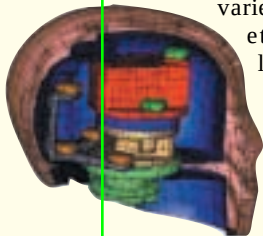
Notre mémoire ne tourne pas rond. Nous nous souvenons facilement de la direction d'un objet quand celui-ci vient vers nous ou s'éloigne. Nous nous souvenons également bien de l'orientation d'un mouvement quand l'objet passe devant nous de droite à gauche ou inversement. Cependant, D. Gilden et C. Price, de l'Université du Texas ont montré que lorsqu'un objet tourne, dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens contraire, nos souvenirs sont imprécis et vagues. Selon les auteurs de cette étude, la perception et le souvenir d'une rotation n'a aucun avantage évolutif tandis qu'apprécier l'approche, l'éloignement et la direction d'un mouvement est crucial pour la survie d'un prédateur ou d'une proie.

Piègeage magnétique de neutrons

Comment mesurer la durée de vie du neutron, l'un des constituant du noyau, qui serait utile à la compréhension de l'interaction nucléaire faible et à la nucléosynthèse dans le Big Bang? En le confinant dans un piège. Une équipe de physiciens américains a réussi à placer un ensemble de neutrons dans un piège magnétique en orientant leur spin (leur moment magnétique) et en les faisant passer préalablement dans une région remplie d'hélium superfluide pour les refroidir. Les neutrons sont restés plusieurs minutes dans le piège avant de se désintégrer. À terme, cette méthode permettra de mesurer la durée de vie du neutron avec une précision accrue.

Une bonne tête

Les simulations d'accidents utilisent aujourd'hui des têtes de mannequin composées d'une matière homogène et indéformable. Or, la tête humaine est plus complexe : elle est composée de plusieurs structures dont la plasticité varie. Après avoir numérisé et modélisé une tête, l'équipe de R. Willinger, de l'Institut de mécanique des fluides, à Strasbourg, a mis au point un prototype de crâne constitué d'éléments qui représentent six des principales structures cérébrales, tels le cervelet et les deux hémisphères, et même le liquide céphalo-rachidien. Plus proche de la réalité, ce modèle tient également compte des mouvements de ces structures les unes par rapport aux autres.



l'actuelle, des dunes de forme parabolique hautes de plusieurs dizaines de mètres s'avancèrent parfois à plus de dix kilomètres à l'intérieur des terres. Des datations de matière organique prélevée dans les dunes par dosage des isotopes du carbone permettent de dater cette époque entre 5 000 et 2 000 ans avant aujourd'hui. Une étude des minéraux rares a montré que le sable de ces dunes ne provient pas des sables dit des Landes, d'origine continentale, sur lesquels elles se sont avancées, mais bien du tri, par les vagues, de sédiments venus de l'avant-côte. Ces dunes anciennes ont été fixées par une forêt mixte de pins maritimes et de chênes.

Il y a environ 2 000 ans, la houle et le vent ont commencé à attaquer cette première génération de dunes. Depuis, l'érosion due aux vagues alimente en sable un puissant courant côtier qui porte vers le Sud, charriant quelque 500 000 mètres cubes de charge solide par an à la hauteur du bassin d'Arcachon, avant qu'une partie de cette charge n'aille sans doute se perdre dans le « Gouf de Capbreton », canyon sous-marin dont la tête s'avance très près du rivage. Quant au vent, il remanie aussi le sable des dunes anciennes, engendrant de hautes dunes, dites modernes, en forme de croissant, qui chevauchent les premières. Apparues à partir de l'époque gallo-romaine, elles seraient encore vives et mobiles si elles n'avaient été fixées au cours du XIX^e siècle par un boisement systématique en pins maritimes.

L'érosion actuelle de la côte est matérialisée par les fortifications du Mur de l'Atlantique, construites pendant la Seconde Guerre mondiale sur le bourrelet dunaire de première ligne et aujourd'hui basculées sur les plages, voire immergées.

Le recul du littoral aquitain est rapide : par endroits, sa vitesse moyenne annuelle est supérieure à un mètre. Ce recul pose de graves problèmes à des aménagements imprudemment implantés en bordure de mer. La longueur de la plage (plus de 200 kilomètres) empêche une défense par une alimentation artificielle en sable, et des ouvrages lourds en enrochement aggraveraient encore localement l'érosion. Le public comme les décideurs devront s'habituer à l'idée qu'il faudra tôt ou tard abandonner des positions trop avancées. Seul un recul dans le respect de l'évolution naturelle permettra, au moindre coût, de conserver pendant encore des siècles la nature sableuse qui fait l'attrait de la côte aquitaine.

Roland PASKOFF
Université Lumière, Lyon

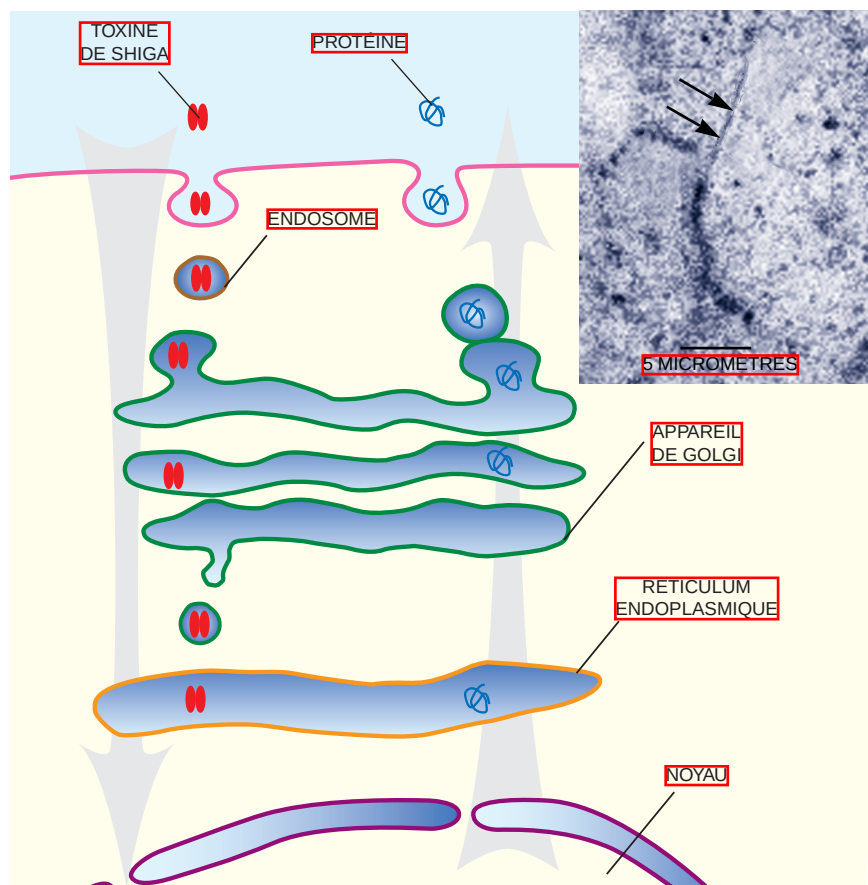
Quand la toxine rétrograde

Grâce à l'étude du cheminement d'une toxine à l'intérieur d'une cellule, on fabriquera peut-être des vaccins contre le cancer.

Une toxine peut devenir un agent thérapeutique précieux. L'équipe de Bruno Goud et Ludger Johannes, de l'Institut Curie, avec l'équipe d'Éric Tartour, de l'Hôpital Curie, a étudié comment la toxine de Shiga, une toxine produite par la bactérie *Shigella dysenteriae*, et les toxines apparentées (vérotoxines) de certaines bactéries *Escherichia Coli* responsables d'hémorragies intestinales, s'introduisent et se meuvent dans les cellules pour y accomplir leurs méfaits : elles bloquent la synthèse des protéines, notamment dans les cellules de la paroi intestinale qui ne fonctionnent plus, et entraînent une dysenterie. En inactivant sa fonction nuisible, on pourrait s'en servir comme transporteur de molécules thérapeutiques : ces dernières seraient ainsi délivrées au cœur des cellules. Cette découverte offre des perspectives pour des vaccins antitumoraux.

Un gène du noyau est copié en un brin d'ARN qui sort du noyau. Cet ARN est alors traduit en une protéine qui pénètre dans les sacs aplatis du réticulum endoplasmique avant de rejoindre ceux de l'appareil de Golgi (voir la figure). Là, elle est enrichie en molécules de sucres qui sont souvent importantes pour son activité. Certaines de ces protéines, celles qui contiennent une chaîne caractéristique de quatre acides aminés agissant à la façon d'un code postal, sont alors réexpédiées vers le réticulum endoplasmique dans de petites vésicules composées de lipides et enveloppées de protéines dites de manteau.

Forts de ces acquis, les biologistes de l'Institut Curie ont cherché à comprendre le cheminement de la toxine de Shiga dans une cellule. Cette toxine est composée de deux parties. Tandis que la première est directement responsable de la toxicité, la seconde permet le transport de l'ensemble de la molécule. La toxine se fixe sur un récepteur de surface porté par certaines cellules, notamment des globules blancs, nommées cellules présentatrices d'antigènes du système immunitaire, par l'intermédiaire de cette seconde partie. Cette fixation entraîne le repliement de la membrane cellulaire et la formation d'une vésicule à l'intérieur de la cellule. En passant par un compartiment



LA TOXINE DE SHIGA (en rouge) suit une voie inverse de celle de la plupart des protéines (en bleu). Elle se fixe à la membrane de la cellule (en rose) qui se plie et forme ainsi une vésicule à l'intérieur de la cellule. Après être passée par un compartiment cellulaire nommé endosome (en marron), la toxine atteint l'appareil de Golgi (en vert foncé) qu'elle quitte grâce à de petits tubules (indiqués par des flèches, sur la microphotographie, en haut à droite) pour rejoindre le réticulum endoplasmique (en orange). Enfin, elle parvient au noyau (en violet) par un mécanisme encore inconnu. Les protéines synthétisées dans la cellule parcourent le chemin inverse pour être libérées à l'extérieur de la cellule.

cellulaire nommé endosome, cette vésicule, qui contient la toxine, migre jusqu'à l'appareil de Golgi avec qui elle fusionne. Dans l'appareil de Golgi, la toxine s'introduit dans des tubules et des vésicules qui la transportent vers le réticulum endoplasmique. Enfin, la toxine rejoint le cytoplasme et parfois le noyau.

Ainsi, de l'appareil de Golgi au réticulum endoplasmique, certaines protéines cellulaires et la toxine de Shiga suivent deux voies rétrogrades différentes : la toxine ne requiert ni le code postal de quatre acides aminés, ni de protéines de manteau sur les vésicules.

Peut-on tirer profit de ces spécificités à des fins thérapeutiques ? Oui : des expériences ont montré que l'on peut utiliser la partie de la toxine nécessaire à son transport pour véhiculer certaines molécules. De plus, on sait que la surface des cellules cancéreuses diffère de celle des cellules normales par la présence d'antigènes capables de déclencher une réaction immunitaire. Ces antigènes sont présentés au système immunitaire par les cellules présentatrices

d'antigène qui ont notamment, à leur surface, le récepteur de la toxine de Shiga. Ces antigènes activent les défenses immunitaires qui devraient détruire les cellules cancéreuses. Cependant, la réaction immunitaire est souvent trop faible pour éliminer la tumeur.

L'équipe de Curie a construit des molécules hybrides composées de la partie «transporteur» de la toxine et d'un antigène typique des cellules cancéreuses. Mises en présence de ces molécules hybrides, des cellules présentatrices d'antigènes (en culture ou chez des souris) ont exposé à leur surface de nombreux antigènes des cellules tumorales. Si l'on injectait à des êtres humains de telles molécules hybrides, le système immunitaire serait exposé à bien plus d'antigènes tumoraux qu'il ne l'est en présence d'une tumeur. Il «apprendrait» à reconnaître ces antigènes et à réagir plus rapidement et donc plus efficacement contre une tumeur. Ces résultats constituent ainsi les premières étapes de la mise au point d'un vaccin contre le cancer.

Une puce de biodétection

Pour déceler une attaque bactériobiologique en quelques secondes.

Pour parer à une attaque bactériologique, il faut faire vite. Arrêter un début d'épidémie et minimiser ses effets néfastes imposent l'identification de l'agent pathogène et la détermination du traitement approprié. Un dispositif qui tient dans la main, contenant un «laboratoire sur puce», sera peut-être capable de cet exploit. Cet instrument utilise des découvertes récentes en biologie, en chimie et des savoir-faire en miniaturisation. Il est conçu pour donner l'alerte à la moindre présence dans l'air d'agents pathogènes, tel celui de la variole.

Bien que les systèmes de biodétection soient nombreux, il n'en existait pas qui soit capable d'identifier un agent biologique particulier en moins de deux minutes, à partir d'un échantillon de quelques cellules seulement. Pourtant, d'après Mark Hollis, de l'Institut de technologie du Massachusetts, quelques particules d'agent pathogène (voire une seule), par exemple de la grippe, suffisent souvent à infecter une personne. Avec la collaboration de son collègue biologiste Jianzhu Chen, il espère réaliser un prototype de biodétecteur sensible et rapide d'ici 18 mois.

Le dispositif utilise des globules blancs de souris, nommés lymphocytes *B*, qui participent aux défenses immunitaires, et

produisent des anticorps dirigés contre les agents pathogènes. Les lymphocytes *B* déclenchent ainsi une cascade de réactions chimiques qui, dans l'organisme, visent à éliminer les agents pathogènes. Le nouveau biodétecteur tire parti de ces mécanismes, qui résultent de 600 à 800 millions d'années d'ingénierie génétique due à l'évolution.

Les lymphocytes *B* du biodétecteur sont génétiquement modifiés pour réagir à des agents pathogènes qui pourraient être utilisés lors d'une attaque bactériologique. Pour savoir si les lymphocytes *B* sont effectivement activés, les biologistes y ont également introduit un gène de méduse, qui code une protéine lumineuse ; cette dernière émet de la lumière dès qu'elle est activée par les ions calcium, produits lors de la cascade de réactions chimiques déclenchée par un agent pathogène dans les lymphocytes *B*. L'ensemble de ce processus prend moins d'une seconde, un temps record par rapport aux autres systèmes de biodétection.

D'autres méthodes de biodétection sont soit aussi rapides, soit aussi sensibles que les lymphocytes *B*, mais pas les deux à la fois. On peut utiliser la méthode d'amplification des gènes (PCR), mais il faut 12 minutes et une vingtaine de micro-organismes. Les techniques fondées sur la fixation d'anticorps sont rapides, mais peu sensibles : l'identification d'un agent pathogène nécessite plusieurs milliers de particules infectieuses. En revanche, avec les lymphocytes *B*, une seule particule infectieuse suffit, puisqu'elle active un lymphocyte.

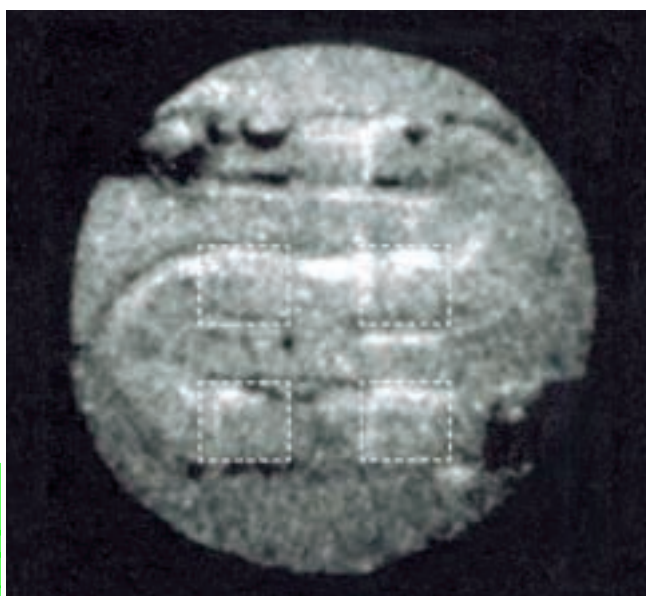
Aujourd'hui, le biodétecteur est une puce de plastique de 25 millimètres carrés, traversée par un sillon sinueux.

Des pastilles de un à deux millimètres carrés, qui contiennent chacune 10 000 lymphocytes *B* spécifiques d'un agent pathogène particulier, bordent le sillon. Un régime strict et une température de l'ordre de 20 °C empêchent les lymphocytes de se multiplier : même s'ils ont faim et froid, ils continuent leur surveillance.

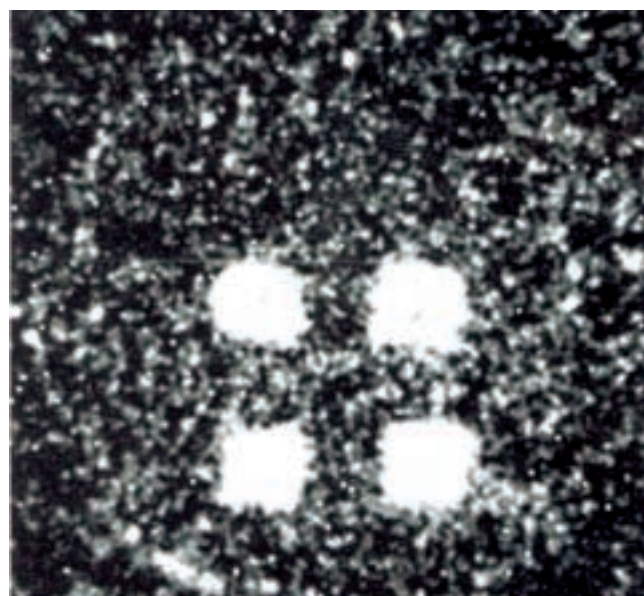
L'échantillon à analyser et les éléments nutritifs destinés aux cellules circulent dans le sillon, où un capteur de lumière extrêmement sensible détecte la moindre émission lumineuse venant d'un lymphocyte *B*. Les essais ont montré que cinq à dix particules suffisent à l'identification d'un agent pathogène. La détection d'agents biologiques mortels, même en très petit nombre, semble résolue.

Le biodétecteur est robuste : les gaz d'échappement, la poussière et les autres contaminants de son environnement, beaucoup moins hospitalier que l'intérieur des organismes auxquels les lymphocytes *B* sont habitués, ne déclenchent pas d'activation ni, par conséquent, d'émission de lumière intempestive. Le sang contient des particules nombreuses et variées : les lymphocytes ne réagissent qu'au virus qu'ils ont appris à reconnaître. Selon M. Hollis, les techniques de biodétection fondées sur les lymphocytes *B*, destinées à des usages militaires, pourraient aussi servir aux médecins, pour détecter et identifier instantanément les virus.

Les lymphocytes se «rechargeront»-t-ils, après avoir émis de la lumière ? L'équipe américaine étudie la question et, au cas où la réponse serait négative, est en train de mettre au point un boîtier opto-électronique qui détecterait les photons émis par une puce à usage unique très bon marché.



Un prototype de puce contre les attaques bactériologiques (à gauche) détecte rapidement les bactéries mortelles. L'air qui porte les micro-organismes pathogènes s'engouffre dans les méandres du sillon



central, où il rencontre les lymphocytes *B* (dans les carrés en pointillés). Les lymphocytes *B* génétiquement modifiés émettent de la lumière quand ils détectent un agent infectieux (à droite).

Des ballons dans l'espace

STEVE SMITH • JAMES CUTTS

À l'aide de ballons, météorologistes et planétologues étudient les couches supérieures de l'atmosphère, sur la Terre et sur d'autres planètes.

C'est dans les vieux pots qu'on fait les meilleures soupes : les scientifiques et les ingénieurs de plusieurs agences spatiales perfectionnent le premier des véhicules volants : le ballon. Ils en modifient la taille, la forme et les capacités de vol, afin d'obtenir des performances bien supérieures à celles des modèles même récents. Bien que les ballons volent depuis plus de 200 ans et que les scientifiques les utilisent depuis longtemps pour des missions de recherche variées, la durée limitée pendant laquelle un ballon reste en l'air a toujours été handicapante. Grâce aux techniques informatiques, aux nouveaux matériaux et à des méthodes modernes de fabrication, les ballons exploreront bientôt la haute atmosphère et contribueront à l'exploration d'autres planètes.

Les spécialistes des ballons cherchent aujourd'hui à construire des ballons qui demeureront dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre pendant 100 jours. En décembre 2001, un énorme ballon en forme de potiron, mis au point au Centre spatial Goddard, à Maryland, décollera d'Australie ou de Nouvelle-Zélande ; on espère qu'il gagnera les limites externes de l'atmosphère terrestre, soit quatre fois plus haut que l'altitude de croisière des avions à réaction, où il restera pendant plusieurs mois. Grâce à une liaison par satellite, il transmettra les données provenant de ses instruments aux scientifiques restés à terre ; notamment l'enregistreur TIGER (*Trans-Iron Galactic Element Recorder*, soit « enregistreur d'éléments galactiques plus lourds que le fer ») déterminera les quantités des divers

éléments chimiques présents dans les rayons cosmiques.

Ce ballon nommé ULDB (*Ultra Long Duration Balloon*, soit « ballon de très longue durée ») intéresse de nombreux scientifiques, qui voient dans les ballons un moyen économique d'étudier l'atmosphère supérieure et l'espace extra-atmosphérique : un vol de ballon ne coûte qu'une petite fraction du prix des fusées, et les instruments scientifiques peuvent être récupérés, révisés et réutilisés. Les ballons scientifiques ont atteint des altitudes de 52 kilomètres et emporté des charges pesant jusqu'à 3 600 kilogrammes. Capable d'atteindre les limites de la stratosphère, où les turbulences atmosphériques sont très faibles, l'ULDB pourra un jour emporter un télescope, qui sera alors aussi bien placé que le Télescope spatial *Hubble*, mais beaucoup plus volumineux.

Transportés par des fusées, des ballons pourraient également explorer l'atmosphère d'autres planètes ou de leurs satellites : les planétologues qui espèrent utiliser des ballons pour leurs recherches s'intéressent à des domaines comme la chimie et la dynamique atmosphériques, la cartographie paléomagnétique, la reconnaissance géologique et l'imagerie à ultra-haute résolution.

Flotter au-dessus de la Terre

Archimède découvrit en 240 avant notre ère le principe physique qui permet aux ballons de voler, mais 2 000 ans s'écoulèrent avant que ce principe ne soit mis en œuvre pour gagner les airs, vers la fin des années 1700. Les ballons

scientifiques se multiplièrent à la fin des années 1800, lorsque la nouvelle technique fut utilisée pour des mesures de la température et de l'humidité, lors des premières études de l'atmosphère. Des ballons furent également utilisés à des fins militaires : ils permettaient une surveillance des mouvements de troupes. À la fin des années 1940 et au début des années 1950, l'utilisation de polyéthylène permit à des ballons modernes d'atteindre la stratosphère, à des altitudes de 15 à 50 kilomètres, de transporter des charges supérieures et de rester plus longtemps en l'air. Notamment les combinaisons spatiales furent testées au cours de missions en ballon ; la NASA étudia également ainsi les réactions de l'organisme humain dans un environnement quasi spatial. En 1960, une fusée de la NASA lança le premier ballon expérimental de télécommunications, *Echo I*. Puis, 25 ans après, une équipe qui rassemblait des Russes, des Français du Centre national d'études spatiales (CNES) et des Américains construisit deux ballons qui volèrent dans les nuages de Vénus, à 54 kilomètres au-dessus de sa surface.

Les vaisseaux spatiaux ont plusieurs inconvénients : ils n'embarquent qu'une charge limitée (seule la Navette spatiale peut transporter une charge équivalente à celle des grands ballons), et l'on doit longuement préparer leurs capteurs, avant des vols qui durent des années. Les ballons, eux, donnent l'occasion de réagir rapidement aux événements : ainsi, en 1987, des capteurs embarqués à bord de ballons ont observé la supernova 1987A (une explosion d'étoile comme il ne s'en produit que tous les 400 ans environ) dans les

trois mois qui suivirent sa découverte. De nombreux instruments embarqués à bord de vaisseaux spatiaux modernes sont testés lors de missions en ballon.

Les ballons scientifiques actuels appartiennent en général à l'une des deux catégories suivantes : les ballons ouverts et les ballons pressurisés. La plupart des ballons de la NASA sont du premier type. Un ballon ouvert quitte le sol lorsqu'il est rempli d'une quantité d'hélium suffisante pour compenser son poids total, charge utile com-

prise. Pour qu'un ballon s'élève dans les airs, l'hélium doit créer une «force ascensionnelle libre», c'est-à-dire une force ascensionnelle supérieure au poids du ballon et de sa charge utile (cette force est déterminée par le principe d'Archimède : un objet immergé dans un fluide est soumis à une force égale au poids du volume de fluide déplacé). À mesure que le ballon s'élève, la densité atmosphérique diminue, et le volume de gaz à l'intérieur du ballon se dilate jusqu'à remplir entière-

ment son enveloppe. La pression est alors égale à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe du ballon, mais le ballon flotte parce que son poids est inférieur à celui du volume d'air déplacé. Lorsque l'altitude désirée de 36 à 40 kilomètres est atteinte, en général en deux ou trois heures, l'excédent de gaz s'échappe par des manches d'évacuation, à la base du ballon, pour le stabiliser et éviter la rupture de la mince enveloppe en polyéthylène. Le ballon évacuant une certaine quantité de son



1. UN BALLON stationnant pendant une centaine de jours dans les couches supérieures de la stratosphère permettra d'observer l'Univers à moindres frais.

REUTERS / NASA / JPL / SPACE / JPL / NASA

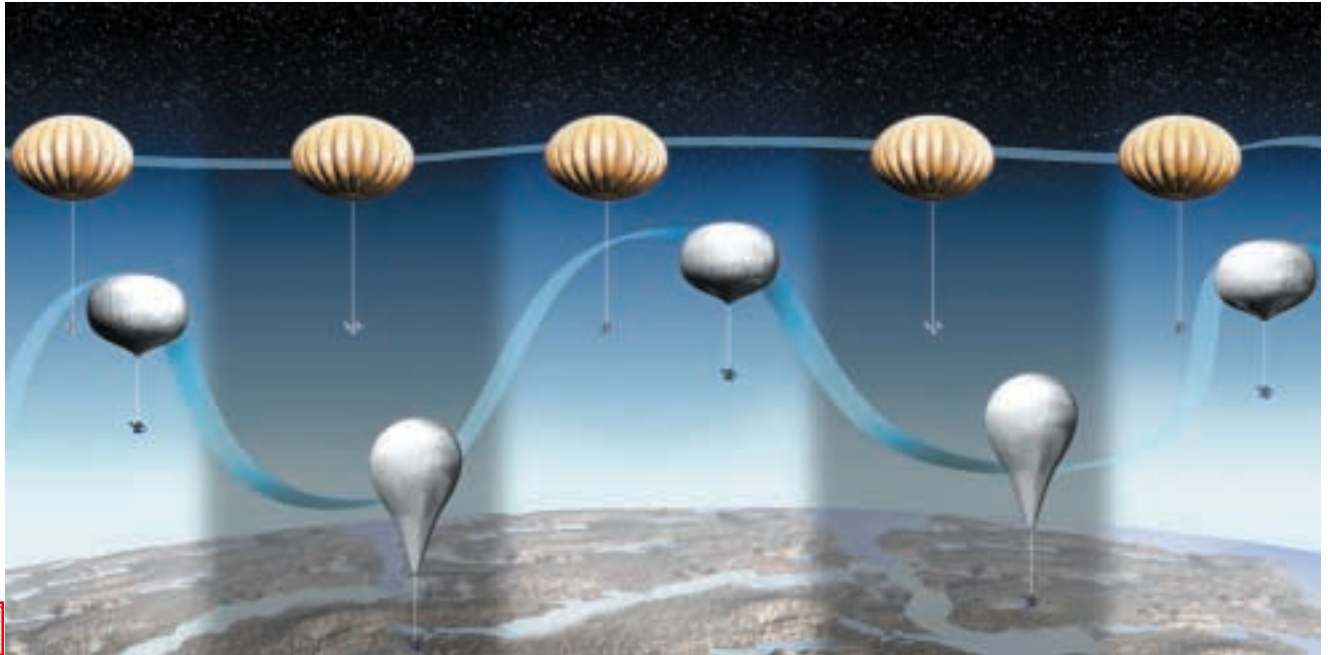
gaz dans l'atmosphère, il est dit «ouvert» sur l'atmosphère.

Pendant la journée, une partie du gaz chauffé par le Soleil est évacuée ; mais, lorsque vient la nuit, le gaz se refroidit, se contracte, et le ballon commence à descendre. Pour le maintenir

en altitude, on jette du lest (dont la quantité totale est comprise entre sept et dix pour cent de la masse totale du système). Le jour suivant, le même processus de réchauffement et de refroidissement se répète, de sorte que le nombre de jours qu'un ballon ouvert

peut tenir en l'air est limité par la quantité de lest qu'il emporte.

Les vols de ballons scientifiques ne durent en principe qu'un ou deux jours, il faut souvent de nombreux vols pour réaliser des expériences. Aussi préfère-t-on faire voler les ballons dans les



2. LES BALLONS PRESSURISÉS (en orange) ont une enveloppe résistante, qui conserve son volume malgré la dilatation des gaz, quand ceux-ci sont chauffés. Le ballon se maintient ainsi à la même altitude. Les ballons classiques, «ouverts», se dilatent durant le jour, quand ils

sont chauffés par le réchauffement solaire, et se contractent la nuit, de sorte qu'ils changent constamment d'altitude. Comme on compense ces variations en délestant les ballons ouverts, leur durée de vie est limitée par la quantité de lest qu'ils peuvent emporter.



3. LE DÉPLOIEMENT d'un ballon sur une planète éloignée nécessite sa libération à partir d'un véhicule spatial. Le ballon doit être empaqueté dans une capsule qui résiste à l'entrée dans l'atmosphère. Il s'ouvre et se gonfle durant la descente en parachute vers la surface

de la planète, puis remonte à son altitude de croisière. Les ballons du futur libéreront des sondes qui prélèveront des échantillons à la surface des planètes. Puis ces sondes seront remontées, et les échantillons seront renvoyés sur la Terre.

régions polaires, dans un jour ou une nuit très longs : en pratique, les ballons restent alors en l'air pendant deux à trois semaines.

Lorsqu'une expérience embarquée à bord d'un ballon est achevée, une commande transmise par radio sépare le ballon de sa charge utile, qui redescend en parachute pour être récupérée et, souvent, réutilisée. Le ballon est jeté quand il retombe ensuite.

Une durée de vol prolongée

Pour les vols de longue durée dans l'atmosphère terrestre, et pour les ballons interplanétaires, les chercheurs ont besoin de performances bien supérieures. Avec son projet ULDB, lancé en 1997, le Bureau des sciences spatiales de la NASA a voulu créer un ballon qui volera jusqu'à 100 jours au-dessus de 99 pour cent de l'atmosphère de la Terre. L'ULDB est un ballon pressurisé, ou ballon «fermé», qui n'évacue pas de gaz dans l'atmosphère comme les ballons classiques. Habituellement fabriqués en matériaux résistants, tel le polyester, les ballons pressurisés sont gonflés comme les ballons ouverts, puis ils sont scellés. Une fois qu'un ballon a atteint l'altitude désirée, la chaleur du Soleil fait augmenter la pression interne ; puis, la nuit, le gaz se refroidit et, de cette façon, le ballon reste plein et se maintient à une altitude constante, sans que l'on ait à le délester. Le ballon reste en l'air tant qu'il est imperméable aux molécules d'hélium ou d'hydrogène. On peut donc utiliser les ballons pressurisés pour des vols plus longs qu'avec les systèmes ouverts.

Au cours des vols de longue durée, les ballons volent dans des conditions variées : au-dessus des océans, des déserts ou des calottes polaires... Les matériaux dont ils sont constitués doivent être à la fois résistants et adaptables. Par exemple, ils doivent résister aux ruptures, aux déchirures et aux perforations, à la dégradation par les rayons ultraviolets. De petits ballons sphériques pressurisés dont l'enveloppe était un film de polyester ont volé jusqu'à plusieurs centaines de jours à basse altitude. Dans les années 1970, des ingénieurs ont cherché à construire des ballons plus gros, afin d'embarquer des charges utiles à très haute altitude, mais la faible résistance aux déchirures des films de polyester a limité les performances des ballons pressurisés.

Les responsables du projet ULDB ont calculé qu'un matériau composite réunissant les propriétés de plusieurs matériaux permettrait des vols de quelques mois. De nombreux matériaux ont été testés : des films, des tissus et des non-tissés (comme dans le papier, des fibres sont réunies par élimination d'un solvant), des tissus multicouches. Les matériaux étudiés étaient le polyester, le polyéthylène, le nylon, le polypropylène, le polyuréthane et des composites de ces divers matériaux. Le composite finalement retenu comprend trois couches : un tissu de polyester de haute ténacité fabriqué au Japon, un film de polyester et un film de polyéthylène. Le film de polyester bloque l'hélium ; le tissu en polyester confère au composite sa résistance ; le polyéthylène est imperméable au gaz, résiste aux perforations et accroît la soli-

dité de l'ensemble. Le tissu et le film en polyester résistent assez bien aux rayonnements ultraviolets. Les trois constituants sont assemblés par un liant léger qui compense les défauts de tissage et les défauts des trois couches. Le résultat final est un matériau d'une densité de 55 grammes par mètre carré, qui présente une résistance à la rupture de 2 600 newtons par mètre.

Toutefois les ingénieurs ont décidé qu'un nouveau matériau ne suffirait pas à allonger beaucoup les vols, dans des conditions difficiles et changeantes. Une nouvelle conception s'imposait. Se fondant sur des études effectuées au CNES, aux États-Unis et au Japon, les ingénieurs du projet ULDB ont préféré une forme de potiron à la classique forme sphérique de la plupart des ballons pressurisés. Les ballons sphériques sont soumis à des contraintes le long des



Jana Bratt



Avec l'amabilité du consortium de Raven Industries Inc.

4. L'ENVELOPPE DU BALLON ULDB, dont le lancement est prévu en décembre 2001, est composée de trois couches (en haut). Le tissu en polyester confère la résistance ; le film de polyester empêche les fuites d'hélium ; enfin le film de polyéthylène accroît encore l'imperméabilité au gaz et la solidité. La photographie inférieure montre l'assemblage final d'un petit prototype qui sera construit comme le ballon ULDB et qui volera cette année.

méridiens et de la circonférence ; c'est l'enveloppe qui supporte la charge. Un ballon en forme de potiron doit plutôt sa résistance aux nervures (alors renforcées) qui relient les différents «fuseaux» du ballon. Avec la forme de potiron, l'enveloppe peut être moins résistante : une résistance à la rupture de seulement 600 newtons par mètre suffit (c'est bien inférieur à la limite d'élasticité du composite). Ce gain est important, car la contrainte qui s'exerce le long de la circonférence est le produit de la pression par le rayon local des fuseaux du potiron ; la taille totale du ballon n'intervient pas dans la détermination de la contrainte qui s'exerce sur l'enveloppe.

Lorsque le ballon s'élèvera, l'enregistreur d'éléments lourds TIGER mesurera, dans les rayons cosmiques, l'abondance des éléments chimiques de numéro atomique compris entre 26 (pour le fer) et 40 (pour le zirconium), à des énergies supérieures à 300 millions d'électronvolts par nucléon (les nucléons sont les particules constitutives des noyaux d'atome : protons et neutrons). Ce ne sera pas la première fois que les ballons contribueront à l'étude des rayons cosmiques : les rayons cosmiques et le rayonnement gamma cosmique, ainsi que la stratosphère elle-même, ont été découverts par des instruments embarqués à bord de bal-

lons. Tous ces rayonnements intéressent beaucoup les physiciens et les astronomes, car ils révèlent la nature de la matière libérée par les supernovae ou apparue dans le milieu interstellaire.

La mission TIGER devrait ensuite se poursuivre à l'aide de télescopes optiques et infrarouges, qui rechercheront des planètes extrasolaires ou fourniront des images du Soleil ou d'autres étoiles ; à l'aide de télescopes détectant les rayons X durs, on explorera les rayonnements gamma, le rayonnement cosmique et le rayonnement électromagnétique. Enfin, on envisage même des expériences de chimie dans la stratosphère.

Le ballon pressurisé lobé et la montgolfière infrarouge

À la fin des années 1970, le Centre national d'études spatiales (CNES) a mis au point, dans le cadre du Projet Ballons Pressurisés Stratosphériques (BPS), un nouveau concept de ballon dit «lobé» ou encore «potiron», par référence à sa forme. Le projet BPS, mis en œuvre à la demande



des spécialistes de la stratosphère, avait pour objectif la réalisation de vols stratosphériques de longue durée (trois mois) avec des charges de 50 à 100 kilogrammes. Le concept de ballon «potiron» a été validé dans le cadre d'une campagne qui s'est déroulée à partir de Prétoria (Afrique du Sud) en 1978 : les cinq ballons, d'un diamètre moyen de huit mètres, ont volé pendant plus de 100 jours autour de la Terre à une altitude de 16 kilomètres, conformément aux objectifs. À l'occasion de cette campagne, une première mondiale a été réalisée avec des vols de ballons effectuant pour la première fois plusieurs tours du monde!

Inventé par nos collègues Michel Rougeron et Jacques Simon, le concept de ballon lobé a été breveté en France, en Europe et aux États-Unis.

Cependant, dès 1977, des scientifiques du CNES ont proposé d'utiliser un principe techniquement plus simple, celui des montgolfières, pour réaliser des missions de longue durée dans la stratosphère : la portance est alors assurée par de l'air chaud et non plus par un gaz léger. Le concept de la Montgolfière Infra Rouge (MIR) utilise ainsi l'énergie du rayonnement solaire, le jour, et le rayonnement infrarouge émis par la Terre, la nuit, pour réchauffer l'air qui se trouve à l'intérieur du ballon. Pour optimiser l'énergie captée par le ballon et, donc, sa portance, la partie supérieure de l'enveloppe du ballon est en matériau aluminisé ; la partie inférieure du ballon, transparente, absorbe le maximum de rayonnement infrarouge la nuit. Du fait de la différence de températures entre le jour et la nuit, la MIR vole à 28 kilomètres d'altitude le jour et à 18 kilomètres la nuit. Elle emporte des charges de 50 à 100 kilogrammes. La durée de vol record réalisée par une MIR est de 69 jours et plus de deux tours du monde. Aujourd'hui, ce type de ballon est régulièrement utilisé par les scientifiques français et européens.

Jacques SIMON, Direction des Programmes et des Affaires Industrielles du CNES
Itziar SADOURNY, Coordination des Programmes Ballons au CNES

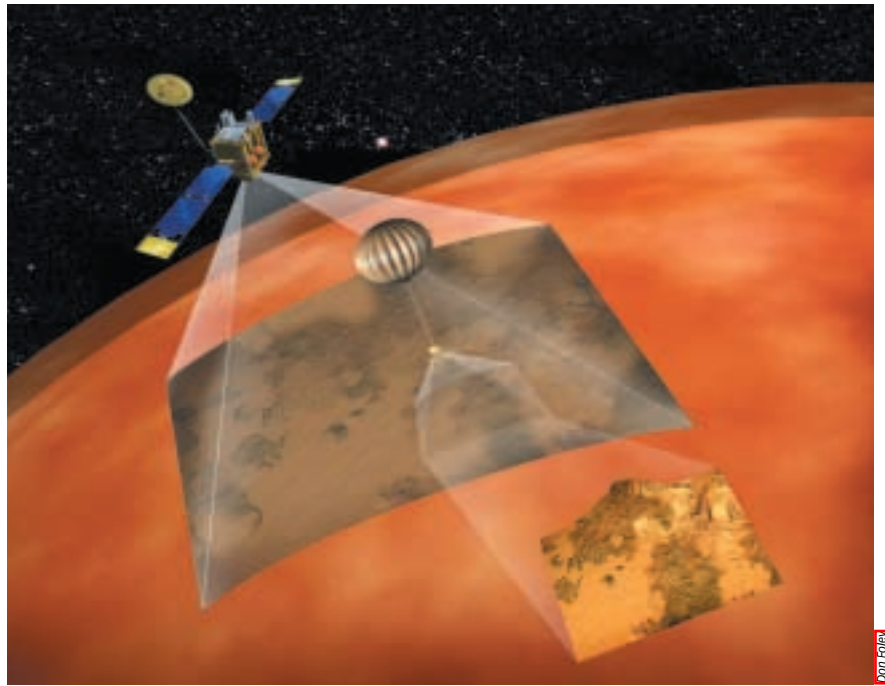
L'exploration en ballon d'autres planètes

Les équipes du projet ULDB prévoient de réutiliser le savoir-faire obtenu pour l'exploration ultérieure d'autres planètes. Six planètes ont une atmosphère qui supporterait des ballons : Mars, Vénus, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ; Titan, l'une des neuf lunes de Saturne, pourrait également être exploré par ce moyen. Toutefois les difficultés sont particulières dans chaque cas. Les planétologues espèrent que des ballons pourront servir de plateformes peu coûteuses pour étudier la composition et la circulation de ces atmosphères, ainsi que pour observer la surface des planètes. Ils peuvent également servir de plateformes de lancement de drones d'exploration : certains prélèveraient des échantillons qui seraient ensuite rapportés sur la Terre, où ils seraient analysés.

L'atmosphère de Mars sera sans doute la première que l'on explorera ainsi. La densité atmosphérique au sol est voisine de celle de la stratosphère terrestre. Aussi, un ballon évoluant à quelques kilomètres seulement au-dessus de la surface de Mars doit être pressurisé.

Quel est l'intérêt d'un ballon par rapport aux autres moyens d'exploration : satellites en orbite, capsules d'atterrissage ou robots de type *Pathfinder*? Un robot au sol n'explore qu'une petite partie de la surface de la planète, alors qu'un ballon peut aller bien plus loin et faire des observations beaucoup plus étendues. Bien que les ballons ne puissent pas emporter des instruments d'une portée globale équivalente à celle des capteurs des satellites, ils peuvent fournir des images bien plus précises de la surface de la planète et détecter des propriétés importantes de surface, telles l'intensité du champ magnétique ou la présence d'eau superficielle.

À la fin des années 1980, la France et la Russie ont collaboré pour envoyer un ballon vers Mars : ce dernier aurait emporté un système d'acquisition d'images et il aurait récupéré des échantillons et effectué des mesures au sol à l'aide d'instruments descendus au bout d'un câble. Les difficultés financières de la Russie firent annuler le projet en 1995, mais, deux ans plus tard, la NASA entreprit des recherches sur des techniques nécessaires pour envoyer vers Mars un ballon



5. UNE CAMERA embarquée dans un ballon observerait la surface d'une planète (ici, celle de Mars) de 10 000 fois plus près qu'une caméra embarquée sur un vaisseau spatial. Bien plus de détails seraient alors visibles.

beaucoup plus petit, ou aérobot (un aérostat robotique), en reprenant les résultats du Centre national d'études spatiales (CNES). De ce projet est né un système aérien léger, qui est entré en phase d'essais stratosphériques au printemps dernier.

Vénus, dont l'atmosphère est plus chaude et plus épaisse que celle de la Terre, a déjà été explorée par ballon. En 1985, l'Union soviétique, la France et les États-Unis ont déployé deux ballons à 54 kilomètres au-dessus de la surface de la planète. En 48 heures de vol, ces ballons ont parcouru chacun la moitié de la circonférence de la planète. Les instruments embarqués ont révélé l'existence de vents violents à haute altitude dans l'atmosphère, et mesuré la température et la pression atmosphériques.

Les ballons s'imposent pour l'étude de Vénus, car son atmosphère épaisse ne laisse passer que les ondes radio ou infrarouges ; de surcroît, les températures de la surface et les densités atmosphériques sont excessives pour que des robots et des capsules d'atterrissage fonctionnent plus de quelques heures. On envisage ainsi d'envoyer un «aérobot multisonde» qui évoluerait dans les couches supérieures de l'atmosphère vénusienne et qui enverrait plusieurs petites sondes sur la surface ; celles-ci prendraient des images à haute résolution et

recueilleraient des données spectroscopiques. Ce système est réalisable même avec les techniques actuelles, mais les planétologues préféreraient une mission plus ambitieuse, où un aérobot «à fluide réversible» ferait des descentes courtes et répétées de l'atmosphère supérieure froide jusqu'à la surface de Vénus, où la température atteint 460 degrés. Après avoir prélevé des échantillons, l'aérobot retournerait dans l'atmosphère supérieure, afin de refroidir ses instruments et ses équipements électroniques. La NASA a déjà mis au point certaines parties d'un tel système, telle une nacelle miniature qui résisterait aux températures élevées de la surface de Vénus et aux nuages d'acide sulfurique.

Deux équipes, l'une à la NASA et une autre à l'Agence spatiale européenne, cherchent à organiser une mission qui rapporterait un échantillon de sol vénusien sur la Terre. Toutes deux ont conclu que des ballons résistant aux hautes températures sont la clé de la réussite d'un tel projet. Les ballons descendraient un grappin qui remonterait ensuite des échantillons de roches et de sol, puis ils gagneraient une altitude d'environ 60 kilomètres, où l'atmosphère de la planète est suffisamment mince pour qu'on lance des fusées vers d'autres véhicules spatiaux qui récupérerait les échantillons et les rapporteraient sur la Terre.

Les ballons planétaires

Les ballons ont été inventés et lancés en France en 1783 : aussi bien les ballons à air chaud, dus aux frères Montgolfier, que les ballons à gaz dus à Jacques Charles. Toute la physique des ballons était ainsi inventée dès le XVIII^e siècle. Toute la physique... sauf les matériaux plastiques, introduits par Jacques Piccard à l'Université de Minnesota dans les années 1950 et qui ont donné une nouvelle vie au «plus léger que l'air».

Dès sa création en 1962, le Centre national d'études spatiales, en France, a compris l'importance des ballons pour la recherche scientifique, aussi bien pour étudier l'atmosphère terrestre que pour porter des expériences au-dessus de cette atmosphère, et il s'est établi comme le spécialiste unique de leur emploi en Europe.

En 1967, nous avons proposé à l'Académie des sciences d'URSS de les utiliser dans le programme d'exploration planétaire, en commençant par Vénus. Après de nombreuses péripéties, l'idée s'est incarnée en 1985 par le vol réussi de deux ballons dans l'atmosphère de Vénus. Ces petits aérostats de 3,5 mètres de diamètre, fabriqués en URSS, ont été les premiers véhicules mobiles sur une planète autre que la Terre : en 46 heures, ils ont parcouru chacun 13 000 kilomètres dans les nuages d'acide sulfurique à 54 kilomètres d'altitude. La nacelle de sept kilogrammes qu'ils portaient, également de fabrication soviétique, contenait des instruments qui ont mesuré les principaux paramètres de l'atmosphère et d'en envoyer la valeur jusqu'à un réseau international de 20 stations réparties sur la surface de la Terre. Cet exploit extraordinaire n'a pas reçu l'applaudissement qu'il méritait : est-ce parce que la NASA n'y était pour rien ? Puis l'URSS s'est détournée de Vénus pour consacrer son programme

planétaire à Mars. Nous avons alors proposé d'inclure des vols de ballons dans le programme martien franco-soviétique, et cette proposition a été acceptée.

Mars n'est cependant pas une planète où il soit facile de faire voler un ballon, parce que l'atmosphère est très peu dense, et aussi parce que sa température varie notablement, entre le jour et la nuit. Le jour elle est chaude, la pression dans le ballon est élevée et risque de le faire exploser. La nuit elle est froide, le ballon perd sa force ascensionnelle et tombe. D'où la solution élégante qui avait été proposée d'utiliser une *guide-rope*, c'est-à-dire l'équivalent d'une corde pendant sous la nacelle et qui, au cours de la nuit, repose en partie sur le sol, soulageant ainsi le ballon : c'est la solution classique pour stabiliser un ballon à basse altitude, inventée peu après... 1783.

Sur Mars nous espérons porter une charge utile de 28 kilogrammes sur une distance de 3 000 à 4 000 kilomètres pendant dix jours, obtenir ainsi de nombreuses images à très haute résolution, mesurer le champ magnétique, détecter la présence de glace souterraine et déterminer la constitution minéralogique du sol...

Dès 1993 il a paru nécessaire de s'éloigner du programme russe en perdition et d'essayer de convaincre la NASA que les ballons devraient tenir une grande place dans l'exploration martienne. Cette double démarche s'est révélée habile, puisque la Russie a effectivement abandonné son programme martien et que la NASA envisage aujourd'hui d'utiliser des ballons martiens, peut-être dès 2003. Moins ambitieux que les nôtres ils auraient peut-être une durée de vie plus courte et ne comporteraient pas de *guide-rope*. Ils n'en feront pas moins un bon travail.

Jacques BLAMONT, CNES Paris

Les planétologues voudraient également explorer Titan, le plus gros des satellites de Saturne, car il est le seul corps du Système solaire qui conserve peut-être des composés chimiques organiques prébiotiques. Des réactions photochimiques, dans son atmosphère, créent une brume orange de matières organiques qui a caché sa surface lorsque la sonde *Voyager* l'a survolé, dans les années 1980. On pense que Titan possède de vastes océans d'hydrocarbures, ainsi que des surfaces solides. Son atmosphère, principalement constituée d'azote, est quatre fois plus dense que celle de la Terre, mais beaucoup plus froide (elle est juste assez chaude pour rester gazeuse). Là encore, des ballons seraient des plateformes d'exploration idéales. Des aérostats envoyés sur Titan pourraient effectuer de nombreuses descentes vers la surface pour prendre des images de près, pour faire *in situ* des mesures, des composés prébiotiques qui ren-

seigneraient sur l'origine de la vie. Un jour, même, une mission en ballon pourrait contribuer à rapporter vers la Terre des échantillons prélevés à la surface de Titan.

Avant d'effectuer toutes les explorations spatiales envisagées, les ingénieurs spatiaux devront surmonter des difficultés variées. La recherche de nouveaux matériaux pour les ballons, essentielle dans la mise au point de l'ULDB, sera encore plus importante pour les missions de recherche planétaire. Réalisé dans un tissu plus résistant, un ballon allégé emporterait des charges utiles supérieures. Les enveloppes devront également résister à des environnements extrêmes, telle l'atmosphère de Vénus, chaude et chargée d'acide sulfurique. Les instruments scientifiques emportés par les ballons devront être encore miniaturisés. Enfin, on devra apprendre à commander les ballons en consommant moins d'énergie.

On devra également perfectionner le largage de ballons sur les planètes éloignées. Sur la Terre, les ballons s'élèvent à partir du sol, mais, dans l'espace, le processus est inversé. Les véhicules spatiaux libèrent des ballons emballés dans des capsules qui supportent l'entrée dans l'atmosphère. Les ballons s'ouvrent et se gonflent ensuite, pendant la descente vers la surface de la planète.

Quel que soit l'environnement où ils évoluent, les ballons sont des engins utiles et peu coûteux.

Steve Smith et James Cutts étudient les ballons au Centre spatial Goddard de la NASA.

Observatories Balloon, in *The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia*, pp. 494-503, Éditions Van Nostrand, 1992.

Jacques BLAMONT, *Vénus dévoilée*, Éditions Odile Jacob, 1987.

Les zeppelins du XXI^e siècle

KLAUS HAGENLOCHER

Les nouveaux zeppelins ne pourront s'enflammer, comme l'ont fait les anciens appareils. Leur structure est perfectionnée, et leur manœuvrabilité est supérieure.



Le 5 août 1908, la ville allemande d'Echterdingen célèbre la mise en service d'un zeppelin. L'élégant dirigeable semble incarner les promesses d'un nouvel âge, mais la catastrophe est quasi immédiate : le soir du voyage inaugural, une rafale de vent arrache le vaisseau de son hangar ; l'hydrogène qui emplit l'enveloppe du zeppelin est la proie des flammes. Le dirigeable est entièrement détruit.

Inébranlable, le comte Ferdinand von Zeppelin continue à construire ses appareils jusqu'à ce que plus d'une centaine d'entre eux aient démontré leur

aptitude au vol. Toutefois, l'explosion catastrophique du *Hindenburg*, en 1937, dans le New Jersey, la survenue de la Seconde Guerre mondiale et l'avènement des avions à réaction font abandonner les zeppelins. Le public peut encore apercevoir des dirigeables, constitués d'un fuselage simple gonflé, lors d'événements sportifs, mais les zeppelins plus complexes, à structures internes rigides soutenant l'enveloppe emplie de gaz, disparaissent... jusqu'au 8 août 1998.

Ce jour là, 90 ans après l'accident d'Echterdingen, presque jour pour jour,

la ville accueille à nouveau un zeppelin dans son ciel. Bien que semblable à ses ancêtres disparus, le nouvel engin est d'une conception nouvelle. Nommé *LZ N07*, il allie la grâce des anciens dirigeables à la modernité des avions les plus récents.

Retour à la planche à dessin

La renaissance des zeppelins est due à deux directeurs de la société fondée par Ferdinand von Zeppelin, la *Luftschiffbau Zeppelin* : à la fin des



années 1980, la société était spécialisée dans la fabrication d'antennes de radar et dans la construction d'équipements électroniques variés. Toutefois ses directeurs, Max Mugler et Heinz Kollmann, pensent alors que des aérostats modernes pourraient être utilisés par la publicité, le tourisme ou la protection de l'environnement. Des ingénieurs et des chercheurs de plusieurs divisions sont regroupés en une petite équipe, soustraite aux influences extérieures, unie dans la poursuite d'un seul et même but : l'étude de zeppelins modernes

et l'évaluation de leur intérêt commercial.

Un examen des volumineuses archives de la Société *Luftschiffbau Zeppelin* guide les décisions en matière de conception. Inflammable, l'hydrogène est clairement à proscrire ; il sera remplacé par l'hélium, gaz ininflammable. De plus, nous pensons immédiatement que le dirigeable doit conserver une aptitude au vol même en cas de chute de pression dans l'enveloppe, et qu'aucun lest ne doit être jeté par dessus bord : un dirigeable délesté est plus léger, de sorte qu'il est sensible aux turbulences.

L'aérostat doit donc avoir une masse constante et stable.

Nous imposons également que le personnel nécessaire à la navigation soit plus réduit que celui des zeppelins de jadis : il fallait plus de 15 personnes pour attraper l'objet volant et le tirer vers le sol, lors de l'atterrissage. L'opération est pénible, parfois dangereuse, et les frais de personnel grèvent lourdement l'exploitation de l'engin. Nous voulons que le nouveau zeppelin vole avec un équipage de trois ou quatre personnes seulement. Enfin, pour intéresser

des clients, le nouveau zeppelin doit avoir des performances bien supérieures à celles des anciens dirigeables : il doit être plus rapide, capable de voler dans des conditions météorologiques plus difficiles, moins bruyant, et plus facile à piloter.

En 1990, le groupe d'étude achève la conception des nouveaux modèles. Avec l'accord de la direction, nous entreprenons alors la construction d'un petit prototype. Lorsque ce zeppelin de dix mètres de long passe les phases de qualification au vol, au printemps 1991, de nouveaux problèmes se posent, qui nécessitent d'autres recherches et la mise au point de nouvelles techniques aéronautiques.

Notamment nous devons apprendre à effectuer des calculs aujourd'hui classiques pour les avions : l'évaluation des forces aérodynamiques, la détermination des contraintes et la prévision de l'électronique embarquée, pour plusieurs types de modèles. Nous savons que l'informatique nous aidera à perfectionner considérablement la conception des zeppelins, mais nous manquons d'informations théoriques : depuis la fin des recherches sur les dirigeables, en 1940, aucun progrès scientifique ou technique n'est inter-

venu. Nous cherchons alors des programmes informatiques capables de calculer les contraintes qui s'exercent au cours des diverses manœuvres... En vain : nous devons créer nos propres théories de la conception de zeppelins.

Deux mathématiciens de notre groupe récupèrent d'abord tout ce qui peut être utile, dans les publications. En collaboration avec des membres de l'Institut d'aérodynamique et de dynamique des gaz de l'Université de Stuttgart, ils construisent des programmes pour prévoir le comportement de l'engin. La tâche est compliquée, parce que la forme de cigare du zeppelin grandeur nature n'est pas la même que celle des prototypes plus petits, utilisés pour des essais préliminaires en soufflerie ; en outre, les comportements des petits prototypes et ceux de l'engin final diffèrent. Par exemple, l'écoulement de l'air sur le vaisseau lors des virages est difficile à calculer, même après des essais en soufflerie (les avions sont plus faciles à modéliser, car les versions réduites, pour les études de soufflerie, sont une approximation raisonnable des modèles plus grands). Notre zeppelin grandeur nature, le modèle LZ N07, est construit sur la base de nos calculs initiaux, mais

chaque nouvelle heure de vol (il en a aujourd'hui 400) est l'occasion d'enregistrer des données pour améliorer les programmes et les futurs modèles.

Depuis septembre 1993, la Société Zeppelin Luftschifftechnik construit des zeppelins de notre conception et dépose des brevets pour protéger les nombreuses inventions qui permettront à des dirigeables modernes de prendre leur envol. Tous les zeppelins des futures flottes seront nommés «zeppelins NT» (NT est le sigle de «nouvelle technique») ; chacun sera identifié par un numéro, qui indiquera le volume de gaz emprisonné dans l'enveloppe ; par exemple, le LZ N07 contenait initialement 7 000 mètres cubes de gaz (mais nous avons ensuite porté sa capacité à 8 200 mètres cubes).

Le corps d'une nouvelle machine

L'armature interne qui distingue un zeppelin d'un simple ballon donne des possibilités de vol supérieures. Par exemple, on peut fixer des moteurs en des endroits plus propices que sur la seule nacelle : la manœuvrabilité s'en trouve augmentée, et le bruit réduit. Les moteurs des nouveaux zeppelins paraissent être attachés à l'extérieur de l'enveloppe, mais ils sont en réalité fixés à la charpente interne, dans l'enveloppe.

Les dirigeables de l'ancienne génération, tels le *Hindenburg* et le *Graf Zeppelin*, avaient des structures internes complexes,

1. L'ARMATURE RIGIDE du nouveau zeppelin comprend une série de poutrelles triangulaires en composite à fibres de carbone, fixées sur trois longerons en alliage d'aluminium, qui traversent toute la longueur du vaisseau.



2. LE COCKPIT des nouveaux zeppelins (à gauche) comporte des instruments de navigation modernes, ainsi que des systèmes électroniques de commande des systèmes de vol. La queue (à droite)



est munie d'une hélice arrière qui pivote vers le bas de 90 degrés et fait monter le vaisseau, ainsi qu'une hélice latérale pour faire décrire au zeppelin un cercle dont le centre est le nez de l'appareil.

qui supportaient leur masse considérable : avec 245 mètres de long et 41 mètres de diamètre, chacun avait un volume de 200 000 mètres cubes. Trente-six poutres allongées, ou longerons, traversaient l'appareil du nez à la queue, et des pièces annulaires, toutes les cinq mètres, servaient de renforts. Nous avons voulu une forme beaucoup plus aérodynamique, avec une structure interne plus légère et moins coûteuse, pour rigidifier des engins de 75 mètres de long. L'allégement de la structure interne avait un autre avantage : les risques de casse sont réduits, en cas d'atterrissage mouvementé.

Dans le LZ N07, le squelette complexe des anciens zeppelins

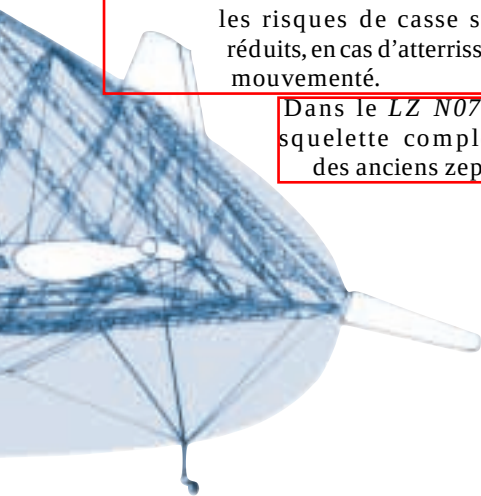
est donc remplacé par une simple structure triangulaire, constituée de trois longerons en alliage d'aluminium et de 12 ensembles de poutrelles légères et résistantes, en composites à fibres de carbone. Cette structure ne rigidifie l'engin que selon sa longueur. La rigidité radiale est assurée par la pression du gaz. Tous les composants externes, tels les moteurs, la nacelle, les surfaces de commande, comme les ailerons et les gouvernes de direction, sont fixés sur la charpente.

L'enveloppe est un tissu multicouche qui est fixé aux trois longerons et entoure à la fois l'hélium et des ballonnets, des compartiments que l'on remplit d'air à volonté. Ces ballonnets peuvent capter de l'air extérieur ou en relâcher, pour maintenir une pression constante à l'intérieur de l'enveloppe durant l'ascension ou la descente. Leur positionnement à l'avant et à l'arrière permet également une régulation de l'assiette, par pompage d'air du ballonnet arrière vers le ballonnet avant, par exemple, ce qui abaisse le nez de l'appareil par rapport à la queue.

Les nouveaux zeppelins sont légèrement pressurisés : la pression de l'hélium et de l'air des ballonnets est

supérieure d'environ quatre pour cent à la pression atmosphérique. Ce maintien d'une faible surpression est un facteur de sécurité. Si la pression à l'intérieur de l'enveloppe était trop élevée, la moindre perforation conduirait à la catastrophe, comme lorsqu'une aiguille fait exploser un ballon. Avec une surpression faible, la même perforation ne provoque qu'une petite fuite du gaz interne, de sorte que le pilote a largement le temps de faire atterrir l'appareil. Dans le LZ N07, la charpente et l'enveloppe s'épaulent mutuellement : l'enveloppe subsisterait même si la charpente se rompait, et cette dernière assurerait une certaine aptitude au vol en cas de chute de pression à l'intérieur de l'enveloppe.

Afin d'augmenter la manœuvrabilité, nous avons équipé les dirigeables de trois moteurs. Deux sont installés respectivement à gauche et à droite du fuselage, juste devant le centre de portance. Ces deux moteurs entraînent des hélices basculantes (l'angle maximal de basculement atteint 120 degrés). Le troisième moteur entraîne une hélice de queue, qui bascule également, mais seulement de 90 degrés ; il entraîne également une petite hélice latérale qui



Les Dornier

peut pousser l'arrière du vaisseau sur les côtés. Ainsi le zeppelin pivote autour de son nez. Enfin des systèmes hydrauliques font pivoter les pales des quatre hélices, de sorte que chacune assure aussi bien une marche avant qu'une marche arrière.

Les capots de tous les moteurs, en fibres de carbone, réduisent le bruit, tout comme les systèmes de transmission, qui transforment les 2 750 tours par minute des moteurs en une rotation des hélices de 1 250 tours par minute : les moteurs ont un meilleur rendement à vitesse élevée, mais les longues pales des hélices produisent une poussée suffisante à la vitesse inférieure.

L'excellente manœuvrabilité du nouveau zeppelin, qui décolle et atterrit presque verticalement, limite le personnel au sol, comme nous l'avions souhaité. Un camion équipé d'un mât télescopique qui s'élève jusqu'à 12 mètres de haut amarre le dirigeable. Le chef de l'équipe au sol saisit un câble

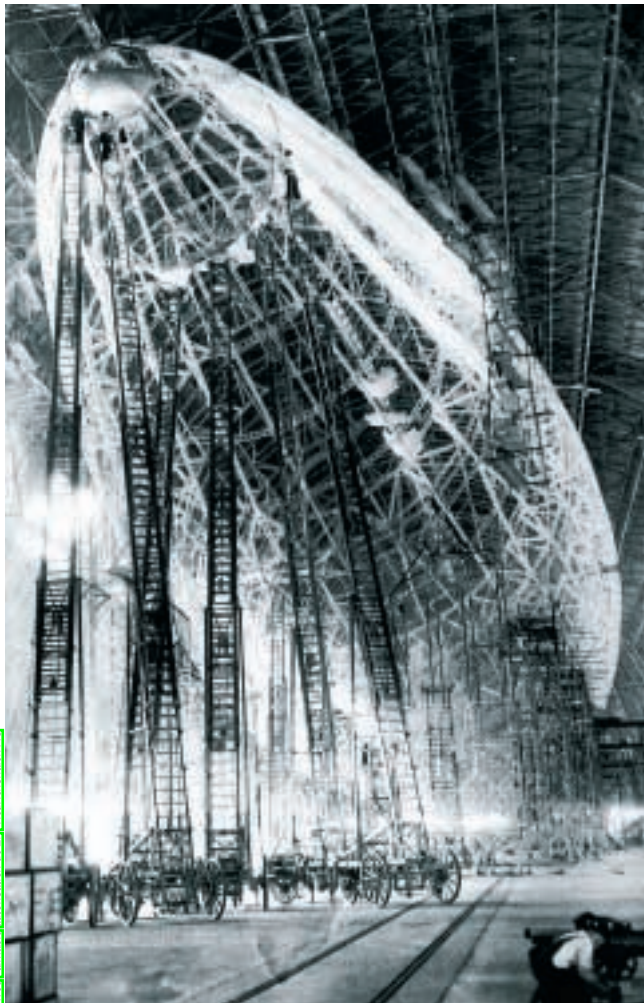
attaché au nez du vaisseau et l'accroche à un treuil fixé sur le mât. Aucun autre contact physique par câble n'est nécessaire. Le treuil tire le vaisseau vers le mât, qui redescend ensuite au niveau du sol. Le chef d'équipe, le conducteur du camion et l'opérateur du treuil composent l'ensemble de l'équipe d'assistance au sol.

Lancement d'un dirigeable

Le cockpit du nouveau zeppelin n'a rien à envier aux avions les plus modernes. Pourtant un pilote de dirigeable des années 1930 serait probablement à l'aise dans le nouvel appareil. Naguère le pilote actionnait des manches ou des manettes, qui tiraient ou poussaient des câbles fixés directement aux gouvernes de direction ou de profondeur, ou qui augmentaient ou réduisaient la puissance des moteurs. Le système moderne de commandes de vol a la même appa-

rence, mais il fonctionne différemment. Bien que le manche du nouveau vaisseau ait le même type de fonctions, l'ancien pilote serait surpris par le déplacement souple du manche. La facilité de fonctionnement s'explique par les nouveaux organes internes du système de commande : les câbles ont été remplacés par des systèmes électroniques. Le mouvement du manche produit des signaux numériques qui commandent au gouvernail de pivoter, par exemple. Plutôt que d'actionner en force des câbles, les actions du pilote sur le manche ressemblent à celles du jeu vidéo *Zeppelin Aviator 1.0*.

Des affichages à cristaux liquides indiquent l'état de toutes les fonctions du dirigeable : la position de chaque gouverne de direction et de profondeur, le pas des pales pour chaque hélice... Le cockpit comprend également un écran radar météorologique, un système GPS de positionnement par



Avec l'amélioration de la transmission de la Zeppelin



3. LA STRUCTURE DES NOUVEAUX ZEPPELINS (à droite) n'a plus rien à voir avec celle des anciens modèles. À gauche, on voit le Macon, un engin de la marine américaine d'avant la Seconde Guerre

mondiale. Le squelette simple du LZ N07 joue le même rôle que l'ancienne structure interne du Macon qui mesurait 240 mètres de long.

satellite et un système électronique d'informations de vol. Ce dernier intègre un petit tableau qui donne les principales informations nécessaires à la navigation : cap, vitesse, vitesse verticale, altitude, inclinaison longitudinale, inclinaison latérale. Les pilotes sont assis à l'avant de la nacelle, qui accueille jusqu'à 12 passagers pour des croisières à des vitesses atteignant 130 kilomètres par heure.

Le premier vol du nouveau zeppelin a eu lieu le 18 septembre 1997, 69 ans exactement après celui du *Graf Zeppelin*. Le voyage inaugural de 47 minutes du *LZ N07* débuta sur un parc de stationnement proche de son hangar de construction, un hall d'exposition de la ville de Friedrichshafen. Tous les habitants de la ville semblaient s'être rassemblés pour assister à cet événement historique, augmentant la nervosité de l'équipe qui avait consacré huit ans d'ingéniosité et d'efforts au projet du nouvel engin. Celui-ci s'est élevé avec bien moins de bruit et de fumée qu'une fusée *Saturne V*, mais nos réactions étaient tout aussi enthousiastes que celles des équipes qui ont en charge la mise en orbite de satellites, après un lancement réussi.

Le vaisseau *LZ N07* aura bientôt un frère jumeau. Aujourd'hui, des clients ont commandé cinq zeppelins : quatre pour de la publicité et du tourisme, et un pour des études scientifiques. Grâce à ce succès, nous envisageons aujourd'hui de construire des dirigeables plus grands, selon les mêmes techniques. Bien que des vaisseaux de taille intermédiaire soient d'abord au programme, le *LZ N20*, avec 50 places pour des passagers, est également envisagé. Dans un avenir proche, des milliers de personnes pourront goûter aux joies de l'expérience touristique la plus «flottante» de leur vie, en glissant sereinement au-dessus de splendides paysages, dans la cabine d'un zeppelin du XIX^e siècle.

Klaus HAGENLOCHER dirige la Société *Zeppelin Luftschifftechnik*.

Harold G. DICK et Douglas H. ROBINSON, *Golden Age of the Great Passenger Airships; Graf Zeppelin and Hindenburg*, Smithsonian Institution Press, 1992.

William GARVEY, *Company Town*, in *Air & Space Smithsonian*, vol. 11, n° 6, pp. 60-67, février-mars 1997.

Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.

LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 98

Que faire de mieux qu'aller sur la Lune? Le XX^e siècle s'achevait, mais personne n'avait effectué le tour du Globe en ballon, sans escale. En 1978, les astronautes avaient réussi à traverser l'océan Atlantique en ballon ; puis, en 1981, ils avaient vaincu le Pacifique. Contrairement à la course à la Lune, le tour du monde en ballon ne pouvait être une lutte entre superpuissances : imagine-t-on Bill Clinton ou Léonid Brejnev mobilisant les énergies de leur pays pour ce but? Aussi, depuis deux décennies, ce sont des aventuriers et des milliardaires qui ont travaillé pour préparer la plus

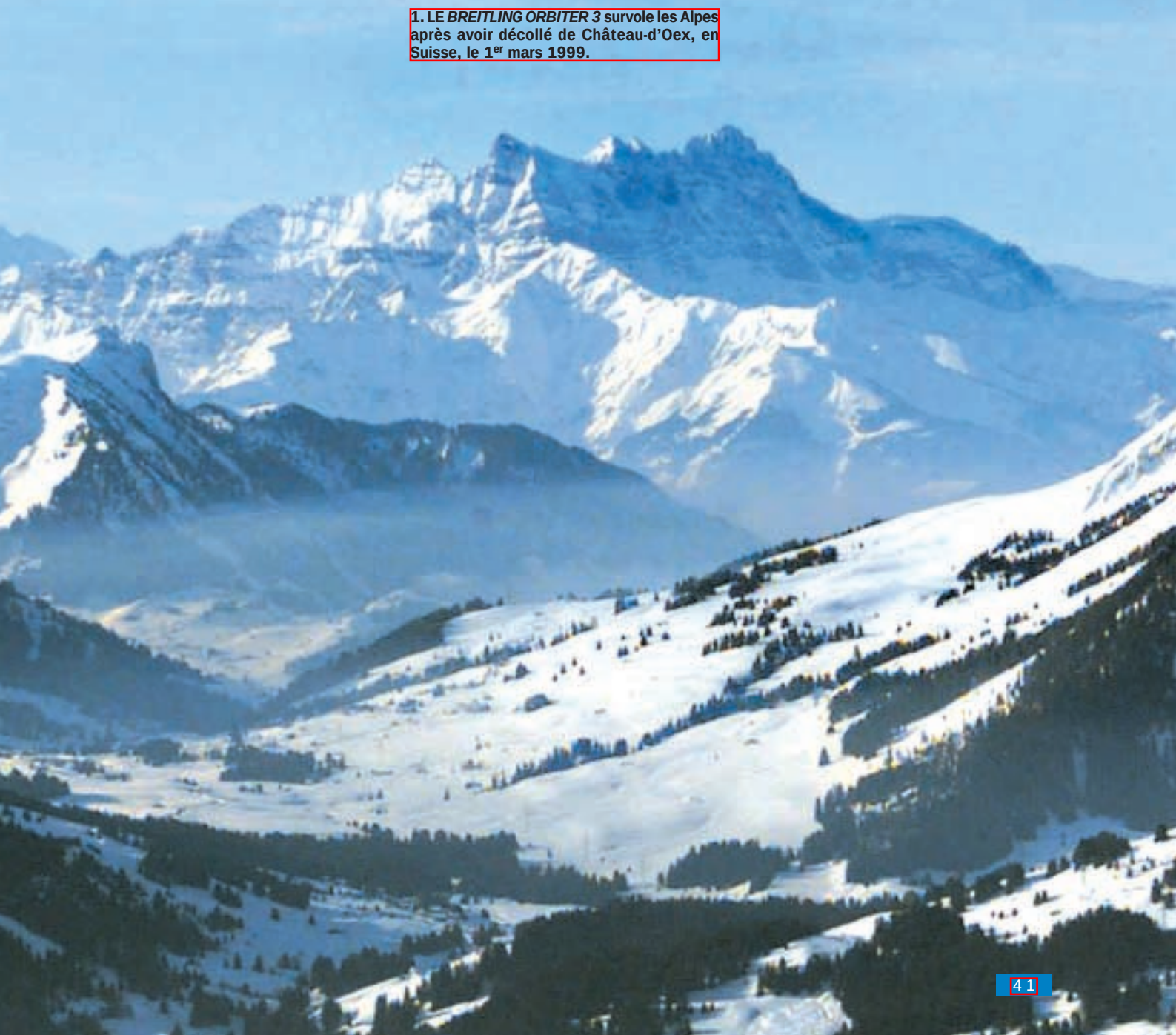
longue traversée en ballon jamais effectuée. Finalement, au mois de mars 1999, les deux astronautes Bertrand Piccard et Brian Jones ont fait le tour du monde à bord du *Breitling Orbiter 3*.

Cet engin est bien moins complexe que le module lunaire ou, même, qu'un avion à réaction classique, mais il est bien plus élaboré que les poires en nylon multicolore qui sont attachées à des paniers d'osier, dans les fêtes régionales. Il est également bien plus perfectionné que les ballons de compétition, qui ont une hauteur qui atteint 18 mètres, et qui contiennent 2 550 mètres cubes de gaz chauffé par

un brûleur à propane. Ces derniers embarquent assez de carburant pour assurer un vol paisible pendant deux heures, portés par le vent. Des ballons plus gros tiennent en l'air plus longtemps, mais, chaque nuit, l'enveloppe se refroidit et se contracte, de sorte que les astronautes doivent jeter, sous forme de lest, 10 à 20 pour cent de la masse brute du ballon et du carburant. La durée de vol est alors limitée à huit jours, ce qui est bien insuffisant pour faire un tour du monde (soit au minimum 38 600 kilomètres).

Pour mettre au point un ballon qui subsiste dans les airs pendant environ

1. LE BREITLING ORBITER 3 survole les Alpes après avoir décollé de Château-d'Oex, en Suisse, le 1^{er} mars 1999.



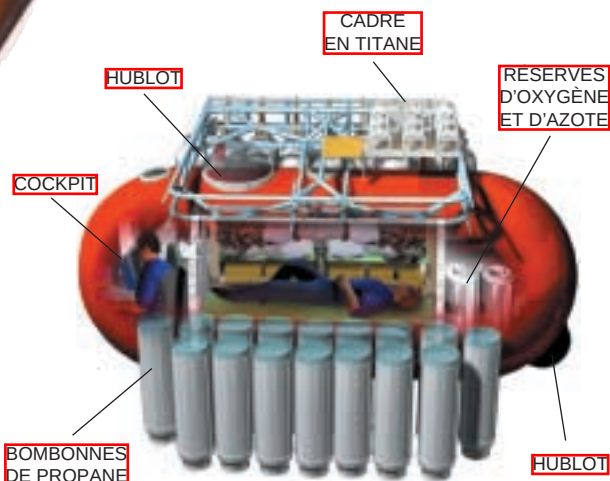
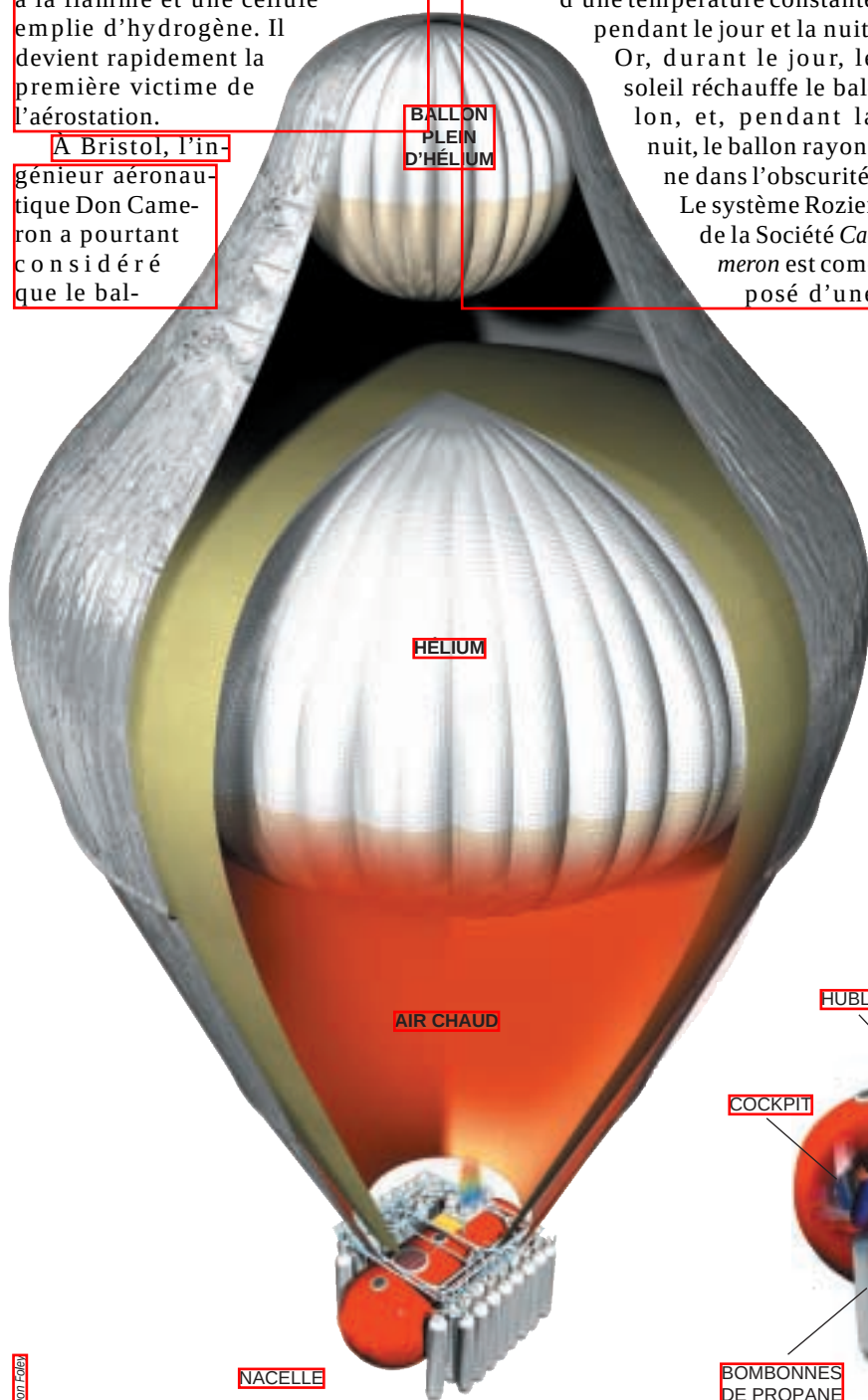
trois semaines, les ingénieurs ont repris une idée des pionniers de l'aérostation. Vers la fin de 1783, quelques jours seulement après le premier vol de François Pilâtre de Rozier et du marquis d'Arlandes à bord d'un ballon à air chaud, Jacques Charles a volé avec un ballon empli d'hydrogène. Un an et demi après, Pilâtre de Rozier veut traverser la Manche dans un ballon hybride, avec une poche d'air chauffé à la flamme et une cellule emplie d'hydrogène. Il devient rapidement la première victime de l'aérostation.

À Bristol, l'ingénieur aéronautique Don Cameron a pourtant considéré que le bal-

lon hybride était prometteur. Avec son équipe, spécialisée dans la fabrication de ballons de compétition, il a compris que, contrairement à l'air, un gaz léger comme l'hydrogène ou l'hélium reste léger sans consommation de carburant, bien qu'il se dilate quand on le chauffe, et se contracte quand il refroidit. Comment utiliser au mieux de tels gaz ? Le secret d'un vol prolongé est le maintien d'une température constante pendant le jour et la nuit. Or, durant le jour, le soleil réchauffe le ballon, et, pendant la nuit, le ballon rayonne dans l'obscurité. Le système Rozier de la Société Cameron est composé d'une

cellule d'hélium au-dessus d'un cône renversé d'air chauffé au propane. Pour monter, les aéronautes chauffent le cône d'air, qui transmet la chaleur à l'hélium et le dilate. L'enveloppe externe du ballon est constituée de deux couches, et l'espace mort entre les deux réduit de 50 pour cent la perte de chaleur pendant la nuit. Durant le jour, le Soleil prend le relais pour chauffer l'hélium, mais, quand le ballon risque de monter à une altitude excessive, des ventilateurs fonctionnant à l'énergie solaire font entrer de l'air frais, de sorte que la température à l'intérieur reste stable. Ce système à «air conditionné et double vitrage» est celui qui a permis la majorité des vols de longue distance et de durée prolongée ; le *Breitling Orbiter 3*, notamment, utilise ce système Rozier de la Société Cameron.

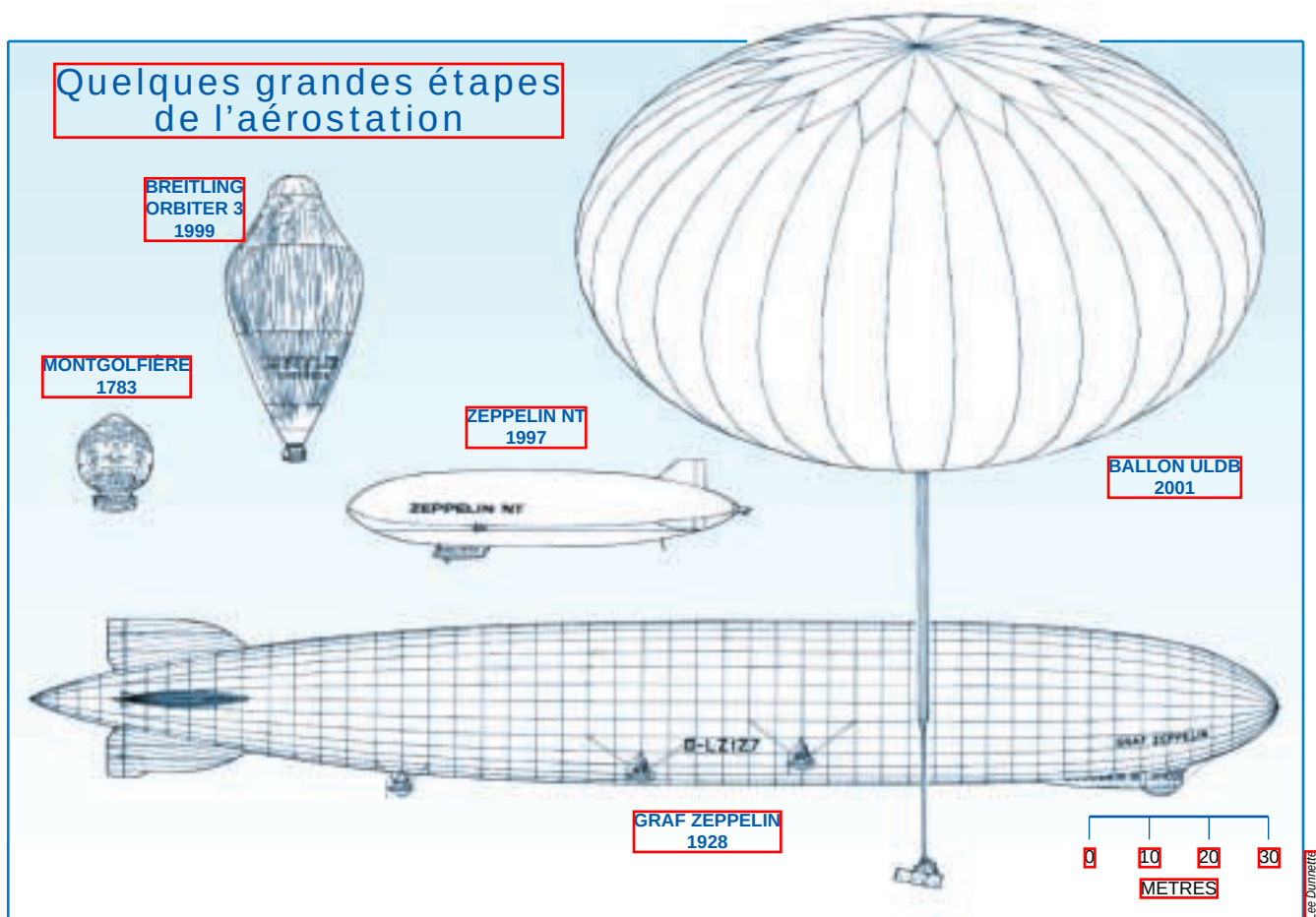
Le ballon soutient une nacelle, qui offre tout le confort d'une capsule spatiale : quartiers de nuit, stockage de nourriture, toilettes et équipement de secours. Dans le jet stream, qui souffle à une vitesse supérieure à 115 kilomètres par heure et à une altitude comprise entre 6 000 et 15 000 mètres, la température descend à -56 degrés. Sans protection, un homme ne survit que quelques minutes. La nacelle du *Breitling Orbiter 3*, un cylindre étanche en kevlar et en fibres de carbone, de 5,5 mètres de long et de 2,75 mètres de diamètre, a été pressurisée à 2 500 mètres (comme dans la cabine d'un avion de ligne). Des réservoirs d'oxygène fournissaient à l'équipage de quoi respirer, et des filtres au lithium absorbaient le gaz



2. L'INTÉRIEUR du Breitling Orbiter 3. Le ballon a une configuration hybride de type Rozier (à gauche) : le petit ballon gonflé à l'hélium, au sommet, soutient la «tente» qui isole la grosse cellule gonflée à l'hélium. Dans la nacelle étanche, l'équipage vivait à l'étroit : Bertrand Pic-

card et Brian Jones dormaient à tour de rôle sur l'unique couchette. Les réservoirs d'oxygène et d'azote étaient logés à l'arrière, tandis que le cockpit abritait les quelques instruments indispensables et les radios. Les aéronautes ne voyaient l'extérieur que par les hublots.

Quelques grandes étapes de l'aérostation



carbonique expiré. En cas de perte de pression dans la cabine, l'équipage pouvait la repressuriser grâce à une réserve d'azote embarquée.

L'instrumentation était minimale : deux radios VHF dans la bande aéronautique et deux radios HF ondes courtes permettaient des communications avec les tours de contrôle de la circulation aérienne ; le système *Inmarsat C* transmettait des messages tapés au centre de contrôle de la mission ; le système *Inmarsat M* transmettait des messages oraux ; des récepteurs GPS couplés à *Inmarsat C* indiquaient la position de l'engin, tandis que des altimètres indiquaient l'altitude ; enfin l'équipage disposait d'indicateurs de vitesse verticale et des commandes du brûleur.

Un engin qui est livré aux vents n'effectue une circumnavigation comme celle qui a été réalisée que si l'équipage a beaucoup de chance. Aux cours des dernières années, chaque hiver (toutes les circumnavigations en ballon commencent en hiver, lorsque le jet stream est à son maximum), plusieurs équipes se sont préparées au lancement, mais la palme de la persévérance est revenue à

l'Américain Steve Fossett. Sa carrière d'aéronaute du tour du monde a commencé en janvier 1995, lorsqu'il pilota un ballon de type Rozier de Séoul à la Saskatchewan, portant le record du monde de distance à 9 878 kilomètres. Début 1996, il décolla du Dakota du Sud, mais se posa peu après, car l'enveloppe externe de son ballon commençait à se déchirer. En 1997, son *Solo Spirit* le mena de Saint-Louis jusqu'en Inde (16 674 kilomètres), où il atterrit faute de carburant. Puis, en 1998, il vola du Missouri jusqu'à Krasnodar, en Russie (11 748 kilomètres). Au mois d'août de la même année, il refit une tentative, en partant de l'hémisphère Sud, mais, cette fois, son ballon se brisa au cours d'un orage, et il finit sa course dans l'océan. En 1998, Richard Branson, le milliardaire qui possède la Société *Virgin*, offrit à S. Fossett une place dans son *ICO Global Balloon*, mais cette tentative se termina également par manque de carburant, après 21 450 kilomètres.

D'autre part, l'équipage du *Breitling Orbiter*, commandé par B. Piccard, abandonna sa tentative de circumnavigation après six heures de vol, en

1997 : un petit collier de serrage céda et provoqua l'inondation de la nacelle par le carburant. En janvier 1998, B. Piccard commandait le *Breitling Orbiter 2*, qui quitta la Suisse et atteignit le Myanmar (Birmanie), mais les Chinois refusèrent au ballon l'autorisation d'entrer dans leur espace aérien. Au mois de mars 1999, le *Breitling Orbiter 3*, piloté par B. Piccard et son copilote B. Jones, réalisa l'exploit attendu : le vol, de 42 714 kilomètres, a duré 19 jours 1 heure et 49 minutes.

Quel record battre, maintenant ? Un équipage féminin envisage de refaire le tour du monde, en 2001, et la Fédération aéronautique internationale prépare une course autour du monde en ballon. Il reste également à battre le record d'altitude, établi en 1961 par Malcolm Ross et Victor Prather : ces derniers avaient atteint 34 668 mètres !

Phil SCOTT est spécialiste d'aéronautique.

Phil SCOTT, *The Pioneers of Flight : A Documentary History*, Princeton University Press, 1999.

Six milliards d'hommes sur Terre

MALCOLM POTTS

Dans beaucoup de pays, la population accède trop difficilement à la contraception. Si l'on ne prévient pas la crise démographique, de graves problèmes d'environnement et de santé publique surgiront au XXI^e siècle.

En novembre 1999, six milliards d'individus vivaient sur la Terre. Le dernier milliard s'est ajouté aux cinq autres en seulement 12 ans. Le passage du nouveau cap est l'occasion de faire le point sur les tendances démographiques actuelles. Dans l'ensemble du monde, le

nombre moyen d'enfants par femme n'a cessé de diminuer depuis 30 ans : de presque 6, il est passé à 2,9. Toutefois, ceux qui pensent que la surpopulation ne menace plus notre planète se trompent : la population mondiale croît au rythme de 78 millions d'individus supplémentaires

1. CE BATEAU transporte des contraceptifs envoyés par une organisation internationale. Ils seront vendus à faible prix sur les marchés du Bangladesh.

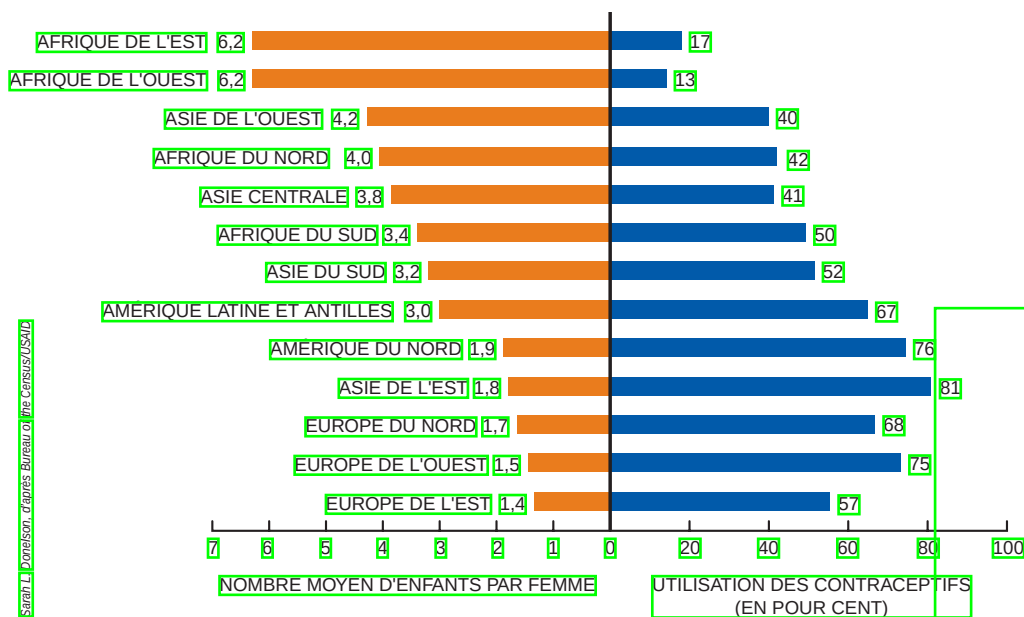


par an, ce qui correspond au nombre d'habitants de l'Allemagne. De surcroît, comme les familles nombreuses étaient courantes jusqu'à une époque récente, de nombreux pays ont une population jeune, qui augmentera beaucoup. En raison de cette pyramide des âges, la croissance restera rapide au cours des prochaines décennies.

Les pays en développement, où les contraceptifs ne sont pas ou sont très peu distribués, seront les plus touchés. Avec leurs insuffisantes infrastructures médicales, financières et scolaires, manquant d'eau et de nourriture, les populations de ces pays seront dans la misère. La qualité de vie et la taille de la popu-

lation mondiale dépendront donc de la rapidité avec laquelle l'humanité jugulera la croissance démographique.

Chaque jour, plus de 400 000 enfants sont conçus de par le monde, mais dans plus de la moitié des cas, les grossesses sont involontaires. Dans 50 pays à bas revenus, des enquêtes ont montré que le nombre d'enfants souhaités par chaque femme était inférieur au nombre d'enfants qu'elles mettaient effectivement au monde. Quand j'étais obstétricien, à Londres, dans les années 1960, je demandais aux mères qui venaient d'accoucher : «Quand pensez-vous avoir un autre bébé?» Beaucoup répondaient : «Docteur,



possibilité de se protéger contre des grossesses non voulues : d'après une étude de 1998, dans l'État indien d'Uttar Pradesh, 43 pour cent des femmes seraient battues par leur mari. Si on veut les aider, il faut que les contraceptifs soient très faciles à obtenir.

Les lois gênent souvent le contrôle des naissances. Jusqu'en 1999, les Japonaises n'avaient pas le droit de se procurer de pilules contraceptives et elles ne limitaient le nombre de leurs enfants que par l'avortement. Jusqu'au début des années 1990, en Irlande, la vente de préservatifs était restreinte à certains distributeurs et, même aujourd'hui, les gens refusent parfois d'en acheter. Le gouvernement indien n'a autorisé l'usage de contraceptifs que récemment, d'abord par des piqûres, bien que le condom soit couramment employé. En Inde, l'État voisin du Bangladesh, on trouve toujours le moyen de surmonter les obstacles, mais pas les lois.

Dans certains pays, les contraceptifs sont délivrés sur ordonnance médicale seulement. Les nombreux villages d'Asie et d'Afrique où il n'y a pas de médecin en sont ainsi privés. En Thaïlande, beaucoup de femmes ont commencé à utiliser la pilule contraceptive quand le gouvernement a autorisé les infirmières et les sages-femmes à en distribuer. Interdire certains actes médicaux revient à limiter les moyens de contrôle des naissances et à augmenter le prix des contraceptifs, mais n'améliore pas les conditions de vie sanitaires. La pilule est moins susceptible de nuire à la santé que l'aspirine. On améliorerait notablement la santé publique si l'on vendait librement les contraceptifs et si on limitait la vente du tabac.

En Corée du Sud et aux Philippines, l'ISF a diminué grâce à la distribution de toute une gamme de contraceptifs à des prix raisonnables et dans des endroits adaptés. En 1960, les familles des deux pays avaient six enfants en moyenne. En 1998, elles n'en avaient plus que 1,7 en Corée du Sud, mais encore 3,7 aux Philippines, où les contraceptifs sont plus difficiles à obte-

2. L'USAGE DE CONTRACEPTIFS détermine directement le nombre moyen d'enfants par femme, bien inférieur dans les régions où le planning familial est actif.

j'allais justement vous en parler.» Elles étaient contentes que j'aborde le sujet embarrassant de la contraception. Cependant, dans cet hôpital, mes supérieures me reprochaient d'évoquer les moyens de contrôle des naissances.

Depuis 30 ans, l'accès à la contraception s'est amélioré. En 1970, dans les pays en développement, un couple sur dix utilisait des contraceptifs. Aujourd'hui, cette proportion dépasse 50 pour cent (un gain de 15 pour cent correspond, en moyenne, à un enfant de moins par femme). En Éthiopie, 4 pour cent des femmes utilisent des contraceptifs, contre 53 pour cent en Afrique du Sud : cet écart se répercute sur le nombre d'enfants par femme, ou indice synthétique de fécondité (ISF), respectivement égal à 7 et 3,3. Les couples veulent de moins en moins d'enfants. En 1998, au Laos, l'un des pays les plus pauvres du monde, des chercheurs ont fait une enquête consistant à demander aux habitants de quoi ils avaient le plus besoin. Les hommes voulaient un emploi, mais, pour les femmes, la priorité était l'accès à la contraception. Évidemment, la contraception manque davantage en Éthiopie et en Afrique de l'Ouest, où les femmes ont couramment six enfants, qu'en Italie, où le nombre moyen d'enfants par femme est de 2,1 : l'un des plus bas du monde. Cependant, partout où les couples voulaient moins d'enfants et où l'on a amélioré les moyens de contrôle des naissances, la fécondité a diminué. Pour qu'elle

baisse, un accès à plusieurs moyens de contraception est nécessaire, complété par la possibilité d'avorter dans de bonnes conditions.

Les obstacles au progrès

Dans de nombreux pays en développement, soit les contraceptifs sont trop chers, soit ceux qui en ont le plus besoin n'en trouvent pas. Le préservatif féminin, récemment mis au point, risque d'être trop cher dans les régions les plus pauvres du monde. Au Sri Lanka, j'ai vu des femmes si démunies qu'elles devaient acheter des pilules contraceptives par cinq, au lieu de la plaquette mensuelle, qui en contient 21. On estime à 120 millions le nombre de couples des pays en développement qui ne veulent pas d'autre enfant dans un futur proche, mais n'ont pas accès à la contraception ou ne sont pas assez bien informés sur le sujet. En conséquence, les grossesses plongent souvent les familles dans le désespoir au lieu d'apporter la joie.

Limiter le nombre d'enfants est parfois difficile. Les femmes en bonne santé sont fécondes entre 12 et 50 ans, en moyenne, tandis que les hommes produisent du sperme viable de la puberté jusqu'à la mort. De nombreux couples ont des rapports sexuels sans contraception parce qu'ils ne trouvent pas de contraceptifs ou parce qu'ils n'ont pas les moyens d'en acheter. Parfois aussi, la violence des rapports sexuels ne laisse pas aux femmes la

nir. D'après des études économiques, la réduction du nombre d'enfants par famille est une condition nécessaire à l'augmentation des revenus par individu. L'écart de fécondité entre la Corée du Sud et les Philippines expliquerait, au moins en partie, pourquoi, le revenu annuel moyen y était respectivement de 64 000 et 7 200 francs par an en 1998.

En Colombie, après 1968, l'ISF est passé de 6 à 3,5 enfants en 15 ans, quand l'accès à la contraception s'est élargi. En Thaïlande, le même recul de l'ISF a pris 8 ans. En revanche, aux États-Unis, il a pris presque 60 ans (de 1842 à 1900), notamment à cause du militant puritain Anthony Comstock, qui, en 1873, persuada le Congrès de restreindre la vente des contraceptifs. La Cour suprême a aboli la dernière loi bannissant la contraception en 1965. Personne n'a étudié le nombre d'enfants que les couples américains voulaient avoir, au cours du XIX^e siècle, mais je soupçonne que beaucoup en ont eu plus qu'il ne le souhaitaient.

Le cas du Bangladesh et du Pakistan illustre particulièrement bien comment le contrôle des naissances aide les femmes à échapper à des siècles d'asservissement à leur mari ou d'obéissance à leur belle-mère. Jusqu'à la guerre civile de 1971, ces deux pays ne formaient qu'une seule entité politique, et les femmes avaient sept enfants en moyenne. Après la séparation, le Bangladesh a fait un effort systématique pour fournir différents moyens contraceptifs, notamment la pilule et les produits injectables. Aujourd'hui, les femmes décident d'avoir des enfants ou de ne pas en avoir. Elles n'auraient pas eu le choix si elles avaient compté sur leur mari pour mettre des préservatifs. Ainsi, malgré la pauvreté extrême, l'ISF est tombé à 3,3 enfants, parce que les femmes qui utilisent des contraceptifs sont plus nombreuses : de 5 pour cent dans les années 1970, elles sont passées à 42 pour cent. En revan-

che, au Pakistan, où l'accès aux moyens de contraception est difficile, les femmes ont encore 5,3 enfants, en moyenne. Les conséquences de cet écart se prolongeront pendant une bonne partie du XXI^e siècle : en 2050, la population du Bangladesh aura augmenté de 65 pour cent, tandis que celle du Pakistan se sera multipliée par 2,2.

Laisser le choix

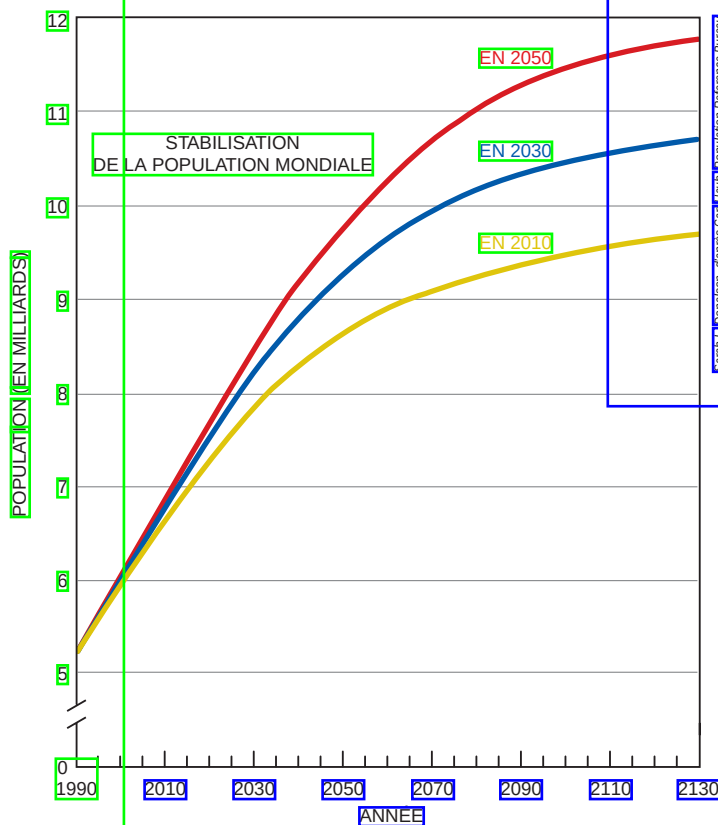
Pendant ma vie, j'ai été témoin des changements démographiques les plus importants de l'histoire. La population mondiale a presque triplé depuis ma naissance, en 1935. Pendant le XX^e siècle, elle a quadruplé, parce que la mortalité infantile a diminué, grâce aux mesures de santé publique de plus en plus répandues, telle la vaccination. Malheureusement, ce progrès ne s'est pas accompagné d'une large diffusion de la contraception.

Avant le XIX^e siècle, les enfants qui survivaient jusqu'à la génération suivante étaient rarement plus de deux par couple. Sinon, une explosion démographique aurait déjà eu lieu depuis des siècles. Les familles nombreuses sont une anomalie récente et

temporaire. Les familles peu nombreuses réduisent les dégradations de l'environnement, profitent à l'économie et s'enrichissent. Des recherches en Thaïlande ont montré que les enfants uniques ou ceux dont les parents n'ont qu'un autre enfant ont plus de chances d'entrer et de rester à l'école que ceux qui ont quatre frères et sœurs ou plus. Quand les grossesses sont espacées de plus de deux ans, la mère et l'enfant ont plus de chances de survie. À l'échelle mondiale, une femme meurt, chaque minute, des complications d'une grossesse, d'un accouchement ou d'un avortement. Ces décès se produisent à 99 pour cent dans des pays en développement. Un meilleur accès à la contraception réduirait cette mortalité, en sauvant quelque 100 000 femmes par an.

Lorsque Paul Ehrlich publia son livre *The Population Bomb* («La bombe démographique») en 1968, les gouvernements des pays occidentaux commençaient à soutenir le contrôle des naissances dans des pays tels que la Corée du Sud. À l'époque, les démographes et les politiciens parlaient de «contrôle de la population», ce qui donnait l'impression que les pays riches disaient aux autres comment leurs citoyens devraient vivre. Aujourd'hui, nous savons que, pour réduire le nombre d'enfants par femme, on doit écouter ce que demande la population et lui laisser le choix entre plusieurs moyens de contraception : les adultes sont capables de décider eux-mêmes ce qu'ils veulent.

Dans les pays en développement, la population peut souvent dépenser un peu d'argent pour acheter des contraceptifs modernes, mais l'État n'a pas les moyens d'en financer la fabrication, la distribution et la promotion. Quelques gouvernements, tels ceux de l'Inde et de l'Indonésie, ont instauré la gratuité des contraceptifs ; d'autres les subventionnent. Cependant, à cause de la pauvreté (ceux qui vivent avec cinq francs



3. LE NOMBRE D'INDIVIDUS que comptera la planète aux XXI^e et XXII^e siècles dépend de la vitesse à laquelle le nombre moyen d'enfants par femme diminuera pour atteindre 2,1, une valeur qui correspond au remplacement des générations.

Entre apocalypse et indifférence

Dans les années 1950, la croissance de la population mondiale s'est accélérée au point que, vers la fin des années 1960, les pays industrialisés ont compris qu'ils devaient aider les pays en développement à limiter les naissances. À l'époque, la fécondité était la première cause de croissance démographique, devant la mortalité et la forte proportion de jeunes dans la population. Plus des deux tiers des habitants de la planète vivaient dans des pays où le nombre moyen d'enfants par femme (c'est-à-dire l'indice synthétique de fécondité ou ISF) était supérieur à six enfants et où seulement dix pour cent des couples utilisaient la contraception. Aucun pays au monde n'avait un ISF inférieur à 2,1 enfants (niveau de fécondité correspondant au remplacement des générations). Cependant, dans les pays en développement, la mortalité infantile atteignait 115 pour 1 000 naissances. La population mondiale était alors à l'apogée de sa croissance avec une augmentation de 2,10 pour cent par an.

Aujourd'hui, la population n'augmente plus que de 1,46 pour cent par an. Seuls quatre pour cent des habitants de la planète vivent encore dans des pays où l'ISF est supérieur à six enfants, et plus de 60 pour cent des couples utilisent la contraception. Enfin, dans les pays en développement, la mortalité infantile est tombée à 60 pour 1 000 naissances.

Ces progrès se sont accompagnés d'une croissance démographique sans précédent (la population mondiale est passée de 3,7 milliards en 1970 à 6 milliards aujourd'hui). Même si on a révisé plusieurs fois les estimations de la future population mondiale à la baisse, la stabilisation n'interviendra pas avant 2150. Environ dix milliards d'individus occuperont la planète. Le problème principal de la première moitié du XXI^e siècle sera d'accueillir les milliards d'individus supplémentaires. Même si l'ISF était aujourd'hui de 2,1 enfants, la population mondiale atteindrait quand même environ 7,3 milliards en 2025 et 7,9 en 2050, à cause de la jeunesse de la population des pays en développement. En effet, la fécondité n'est plus le facteur principal de croissance démographique à l'échelle mondiale, mais le reste cependant dans quelques régions, comme l'Afrique et l'Asie du Sud-Ouest.

L'accès aux moyens de contraception contribue à la diminution de l'ISF, mais n'est pas une condition suffisante. Par exemple, en Corée et aux Philippines, l'ISF est passé respectivement de près de 6 enfants en 1960 à 1,7 et 3,7 enfants en 1998. Le revenu par habitant, identique dans les deux pays en 1960, est aujourd'hui bien supérieur en Corée. Cet enrichissement s'est accompagné d'une modernisation de la société et de l'adoption de normes sociales en faveur des familles de deux enfants, comme dans les pays industrialisés. Une demande importante de contraception est alors apparue. Les conditions d'apparition d'une telle demande varient selon les pays. Quand elles ne sont pas réunies, l'utilisation de la contraception ne se généralise pas, même quand les populations y ont accès. Si l'ISF dépendait du seul accès à la contraception, comment expliquerait-on qu'à la fin du XVIII^e siècle, les

populations rurales du Sud-Ouest de la France ont réduit leur fécondité? On connaît la réponse : les conditions économiques et sociales avantageaient les petites familles.

Inversement, un ISF élevé ne suffit pas à expliquer les difficultés économiques des pays en développement. Notamment, sa baisse n'est pas une condition préalable à l'augmentation du revenu par habitant. D'après un calcul de la Banque mondiale, entre 1980 et 1992, la croissance du revenu par habitant était de 3,9 pour cent dans les pays à faible revenu et de 2,4 pour cent dans les pays à haut revenu. Or les pays à faible revenu ont les taux de croissance démographique les plus élevés. L'exemple de l'Argentine et de la Corée montre aussi l'absence de relation directe entre la baisse de la fécondité et le développement économique : dans ces pays, en 1960, l'ISF était respectivement de 3 et 5,5 enfants, et le revenu par habitant de 9 300 et 7 800 francs environ (en francs de 1990). Aujourd'hui, la situation s'est inversée : malgré son ISF initialement supérieur, la Corée jouit d'un revenu par habitant bien supérieur à celui de l'Argentine (52 000 francs contre 39 000 francs de 1990 environ).

La croissance démographique pose des problèmes politiques et sociaux. La limitation des naissances aussi : la baisse de la fécondité entraîne le vieillissement des populations. Par exemple, en Italie, si l'ISF se maintient à sa valeur actuelle (1,2), la population passera de 57 millions à 37 millions en 2050. La proportion des personnes de plus de 60 ans passera de 22 à 48 pour cent. Qui paiera les retraites de la moitié de la population? Dans les pays en développement, où la baisse de la fécondité a été très rapide, ce vieillissement sera aussi plus rapide que dans les pays industrialisés. En Europe, la proportion des personnes de plus de 60 ans est passée de quelques pour cent à 20 pour cent en 150 ans (en moyenne). En revanche, une telle évolution prendra à peine 50 ans en Chine.

À mon avis, une population mondiale de 8,9 milliards en 2050 n'est pas une sous-estimation. Depuis 1990, la croissance démographique annuelle observée correspond aux plus basses estimations de l'ONU. Cette tendance se maintiendra-t-elle? C'est difficile à prévoir, notamment à cause des incertitudes sur l'évolution de la situation en Afrique, sur la baisse démographique récente au Pakistan et sur le rythme de diminution de la fécondité des pays où elle a déjà commencé de baisser.

Les problèmes démographiques suscitent souvent des prises de position passionnées, sans recul par rapport à la situation dans sa globalité. Les pays industrialisés ne croient plus aux catastrophes démographiques qui leur sont régulièrement annoncées et qui se confirment rarement. D'autant plus que leur aide ne semble pas changer la situation des pays en développement. Comme A. Sen (prix Nobel d'économie) l'a remarqué, entre pessimisme apocalyptique et indifférence, on risque de perdre de vue les véritables conséquences des tendances démographiques et de compromettre les chances d'y apporter les bonnes réponses.

Jean-Claude CHASTELAND,
Institut national d'études démographiques

par jour ou moins sont légion) ou de la corruption, le contrôle des naissances est rarement considéré comme une priorité. Le financement des politiques de contrôle des naissances par les pays riches est donc essentiel. D'ailleurs, les pays en développement le réclament.

Ce consensus est apparu en 1994, lors de la Conférence internationale sur la population et le développement, organisée par l'Organisation des Nations unies (ONU), au Caire. Les États-Unis ont décidé de réduire les naissances, mais aussi la mortalité maternelle, de lutter contre les maladies sexuellement transmissibles et, notamment, le SIDA. Le budget voté était de 100 milliards de francs, de 1994 à l'an 2000, et les pays industrialisés s'étaient engagés à débloquent 35 milliards de francs, mais vont-ils tenir leurs promesses? En 1998, ils ont donné moins d'argent que jamais (le minimum sur 30 ans), dont seuls trois pour cent ont été alloués au contrôle des naissances et aux domaines de la santé en rapport avec la reproduction. En 1999, ils n'ont donné qu'un tiers de l'argent promis au Caire. Ce manque de fonds provoque une augmentation du prix des contraceptifs et compromet le traitement des maladies sexuellement transmissibles.

Compter ceux qui ne sont pas nés

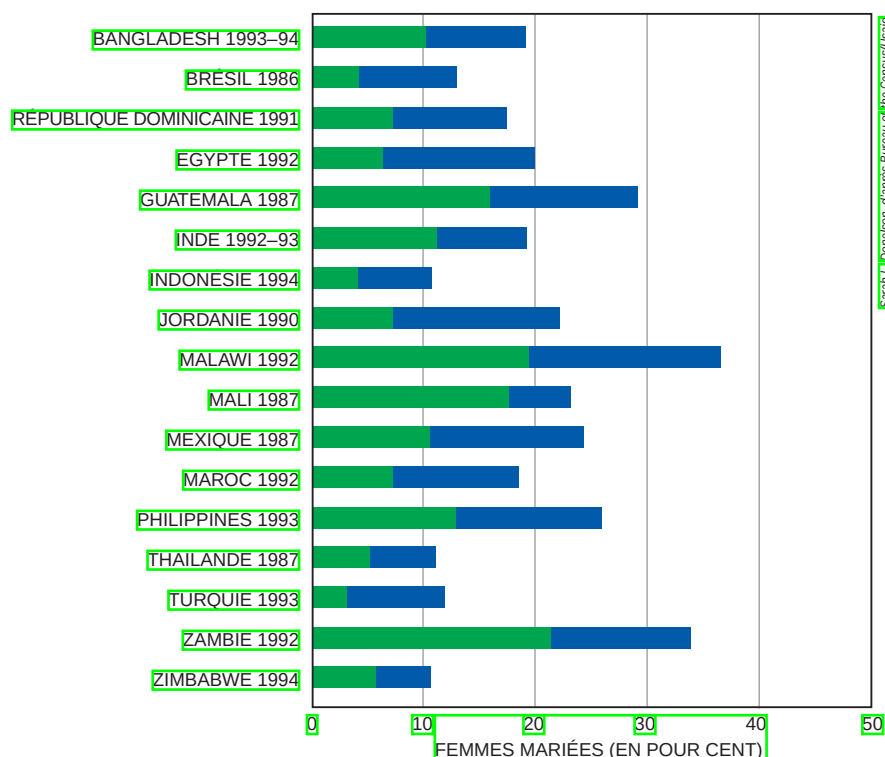
Beaucoup de parents des enfants du XXI^e siècle sont déjà nés, de sorte que l'on connaît la population mondiale jusqu'à 2050. En 1998, l'ONU envisageait un total de 7,3 à 10,7 milliards d'individus en 2050, le chiffre le plus probable étant 8,9 milliards. Il résulte d'un calcul qui suppose une augmentation constante de l'usage de contraceptifs et, de ce fait, un déclin du nombre de naissances. Plus précisément, on admet un ISF stabilisé à 2,1 dès 2050 dans les pays en développement. Vu les tendances actuelles, je pense que le chiffre «le plus probable» de 8,9 milliards est une sous-estimation : de vastes régions d'Afrique et d'Asie méridionale ont des ISF bien supérieurs à 2,1. Si l'on ne consacre pas plus d'argent au contrôle des naissances, je pense que la fécondité ne diminuera pas autant que l'ONU l'a supposé.

Ces estimations tiennent compte de la progression du virus du SIDA dans de nombreux pays. Plus de 50 millions de personnes l'auront probablement

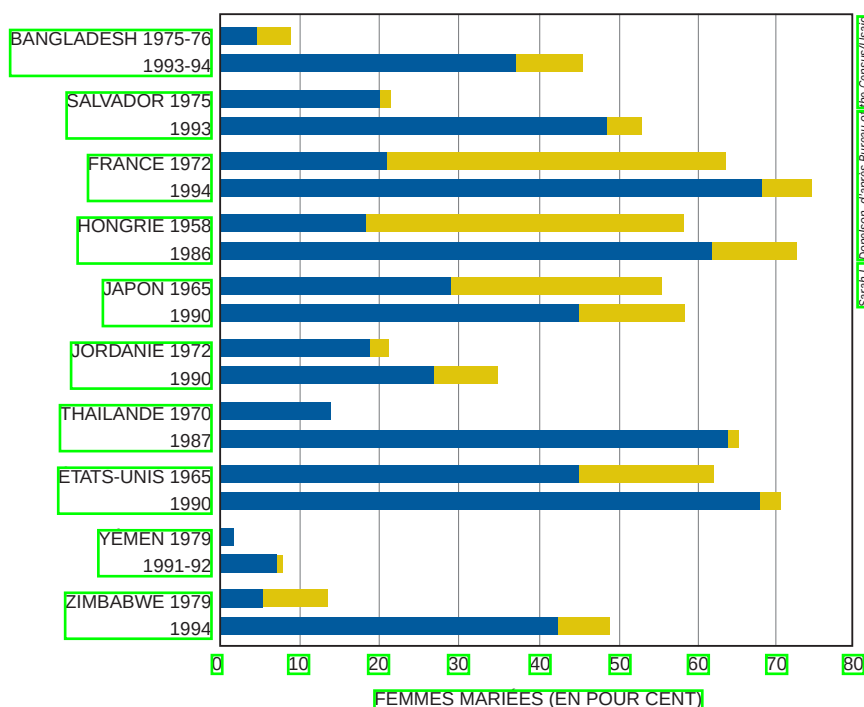
contracté en 2010, ce qui équivaut au nombre de morts de la Seconde Guerre mondiale. Le SIDA a abaissé l'espérance de vie de sept ans dans les 29 pays africains les plus touchés. Cependant, malgré ce fléau, la population africaine

(750 millions d'habitants) augmentera jusqu'à 1,7 milliard en 2050, du fait de sa jeunesse actuelle.

Les estimations de populations dépendent évidemment des hypothèses retenues. Notamment, l'insuffisance



4. DANS LES PAYS A BAS REVENUS, de nombreuses femmes utiliseraient des moyens de contrôle des naissances si ceux-ci étaient facilement accessibles : certaines auraient moins d'enfants (en bleu) ; d'autres espaceraient leurs grossesses (en vert).



5. L'UTILISATION DE LA CONTRACEPTION varie considérablement selon les pays. Au total, l'utilisation des méthodes modernes (en bleu) augmente par rapport à l'emploi des méthodes traditionnelles (en beige), telles l'interruption du coït et l'abstinence.

RETROUVEZ

POURLA

SCIENCE

**AU 20^e SALON DU LIVRE
DU 17 AU 22 MARS 2000**

sur notre stand (E 120)
et sur celui des
Éditions Belin (F88)
dans le Hall 1
à la Porte de Versailles

**CONFÉRENCES
AU BAR DES SCIENCES**

« Science et gastronomie »

avec Hervé This, rédacteur
en chef de *Pour la Science*
Vendredi 17 mars à 15 h 30

« Comment faire aimer les mathématiques ? »

avec Jean Brette du Palais
de la Découverte, Jean-Paul
Delahaye, professeur
à l'Université de Lille,
Maurice Mashaal, journaliste
scientifique, Didier Nordon,
maître de conférences
à l'Université de Bordeaux.
Débat animé par Loïc Mangin,
journaliste à *Pour la Science*
Dimanche 19 mars à 15 h 30

« Sur la piste des scientifiques »

Jeu-concours conçu par
Armelle Ehrlich. Découvrez,
à partir d'énigmes, la vie
de scientifiques célèbres.
Et gagnez de nombreux
cadeaux.

Mercredi 22 mars à 17 h

➔ **Entrée gratuite** pour les
conférences sur demande
par télécopie
(01 55 42 84 54),

➔ **e-mail** (communication@
pouurlascience.fr)

➔ **Courrier** (Communication -
8, rue Férou 75 278 Paris
cedex 06).

➔ **Pour plus d'information,**
consultez notre site :
www.pouurlascience.com

des fonds donnés par les pays riches
aux pays pauvres pour le contrôle des
naissances risque d'avoir trois consé-
quences non exclusives.

Premièrement, l'ISF pourrait res-
ter supérieur aux estimations de l'ONU :
de ce fait, la population augmenterait
jusqu'au XXII^e siècle. Par exemple, au
Nigeria (108 millions d'habitants), un
ISF de 2,1 enfants atteint en 2010, 2030
ou 2050 correspondrait respectivement
à une stabilisation de la population
en 2100 à 290, 450 ou 700 millions d'ha-
bitants. Dans le deuxième cas, la den-
sité de population serait supérieure de
40 pour cent à la densité actuelle aux
Pays-Bas. En pratique, le troisième cas
est impossible, car les maladies et les
famines limiteraient la population.

Deuxièmement, l'insuffisance des
politiques de planning familial pour-
rait pousser les gouvernements à
recourir à des mesures autoritaires de
contrôle des naissances, telles celles
qui sont appliquées en Chine. Dans
les années 1950 et 1960, Mao Tse-toung
était partisan des familles nom-
breuses, pour des raisons idéolo-
giques. Quand les Chinois ont com-
pris qu'ils devaient ralentir leur crois-
sance démographique, en 1979, la
population augmentait si rapidement
que le gouvernement a dû interdire
aux couples d'avoir plus d'un enfant.
Même avec une telle politique, le
nombre de Chinois est passé de 989
millions à 1,25 milliard aujourd'hui :
cette augmentation correspond à un
peu moins que la population totale
des États-Unis, dans un pays qui a
environ la même superficie.

Troisièmement, le nombre d'avor-
tements pourrait augmenter. Ajour-
d'hui, chaque femme avorte en
moyenne une fois. D'après un calcul
récent fondé sur des données afri-
caines, sans distribution de contra-
ceptifs les femmes devraient avorter
six fois plus pour que l'ISF reste
conforme aux estimations de l'ONU.
Cette augmentation du nombre d'avor-
tements tuerait des milliers de femmes,
parce qu'ils auraient lieu dans de mau-
vaises conditions sanitaires.

Dans les prochaines années, le suc-
cès ou l'échec des politiques de contrôle
des naissances divisera le monde en
deux. Les pays récemment industria-
lisés d'Asie et d'Amérique latine qui
stabiliseront leur ISF à 2 enfants ou
moins, d'ici 2010, rejoindront le club
des pays riches. Leur population
vieillira lentement : le nombre de leurs

citoyens de 60 ans et plus doublera d'ici
2050. Les autres pays, notamment en
Afrique et dans le sous-continent
indien, seront dépassés par l'accrois-
sement fulgurant de leur population.
Un nombre considérable de jeunes gens
ne recevront aucune éducation et seront
privés d'emploi. Certains formeront
peut-être des gangs dans des bidon-
villes politiquement instables. D'autres
essaieront de subsister en coupant les
dernières forêts.

La conférence du Caire a reconnu
que le développement durable du Globe
imposait une stabilisation rapide de la
population mondiale. Ce développe-
ment durable est peut-être le plus grand
problème jamais rencontré par l'hu-
manité : comment construire un monde
où l'on ne consommera pas plus de res-
sources que ce que l'environnement n'en
produit et où l'on ne polluera pas plus
que la biosphère ne peut absorber ?

Pour assurer le succès d'une telle
transformation, les sociétés humaines
devront réduire leur consommation et
leur population. Même aujourd'hui,
les ressources de la Terre ne suffiraient
pas à assurer un train de vie à l'occi-
dentale pour tout le monde. Beaucoup
d'experts prédisent que dès 2025, un
milliard de personnes manqueront
d'eau.

Heureusement, on sait aujourd'hui
comment donner aux populations la
possibilité de contrôler les naissances.
Il en coûterait aux pays industrialisés
moins de 25 francs par personne et par
an, ce qui est négligeable par rapport
au coût financier, environnemental et
humain de l'inaction.

Malcolm POTTS est professeur en santé
publique à l'Université de Berkeley.

Steven SINDING, John ROSS et Allan
ROSENFELD, *Seeking Common Ground :
Demographic Goals and Individual Choice*,
Population Reference Bureau,
Washington, D.C., mai 1994.

*Hopes and Realities : Closing the Gap
between Women's Aspirations and Their
Reproductive Experiences*, Alan Gut-
tmacher Institute, New York, 1995.

Malcolm POTTS, *Sex and the Birth Rate :
Human Biology, Demographic Change and
Access to Fertility-Regulation Methods*,
in *Population and Development Review*,
vol. 23, n° 1, pp. 1-39, mars 1997.

*6 Billion : A Time for Choices. The State
of World Population 1999*, UNFPA, Uni-
ted Nations Population Fund, New
York, 1999.

La physique des avalanches

M. NAAIM • F. BOUVET-NAAIM • L. VIDAL

Une meilleure compréhension de la physique des avalanches et la modélisation de leurs mécanismes améliorent la prévention des risques.

Au XVIII^e siècle, la neige était vitale pour les montagnards. Chaque hiver, ils l'attendaient pour transporter sur des traîneaux le bois et le fourrage stockés en altitude pendant l'été. Elle protégeait également du gel les terres ensemencées et fournissait de l'eau, au printemps, au moment de la fonte. Aujourd'hui, grâce aux véhicules mécaniques, l'homme dépend moins des conditions climatiques. Pourtant, l'or blanc est devenu le cœur de l'économie de la plupart des régions montagneuses qui accueillent tous les ans les adeptes des sports de glisse. Hélas, trop de neige nuit et, chaque saison, les dégâts et surtout les victimes des avalanches nous rappellent les dangers de la montagne. Par exemple, le 23 janvier 1998, l'avalanche des Orres a fait 11 victimes, ou, plus récemment, le 29 janvier 2000, l'avalanche de Thones, près d'Annecy, quatre victimes. Peut-on comprendre ce qui semble être un caprice de la nature pour en éviter les conséquences dramatiques ?

Si toutes les avalanches sont des écoulements rapides d'une masse de neige le long d'une pente sous l'effet de la gravité, elles diffèrent par leur ampleur et par divers paramètres physiques, notamment la compacité du manteau neigeux (la superposition de couches de neige différentes) et des écoulements, ainsi que par l'adhérence des couches de neige entre elles. Jusqu'à aujourd'hui, dans les modélisations des écoulements de neige, ces caractéristiques et les contingences naturelles n'avaient pas été suffisamment prises en compte. Les modèles étaient loin de la réalité.

En étudiant les phénomènes de transport de la neige par le vent, nous avons détaillé la dynamique des avalanches, de leur déclenchement à leur arrêt. Ainsi, à partir de l'analyse des différentes étapes, c'est-à-dire la formation du manteau, sa rupture et l'écoulement lui-même, nous pouvons désormais simuler la plupart des avalanches majeures. Ces reconstitutions aident les collectivités à améliorer leurs plans d'occupation des sols et d'aménagement du territoire.

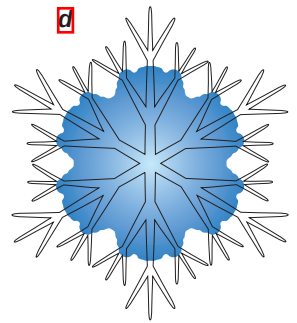
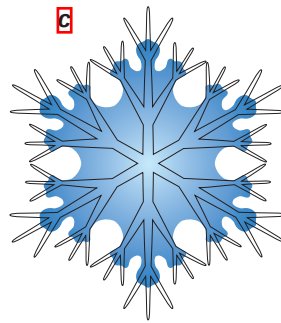
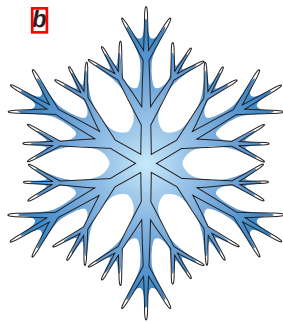
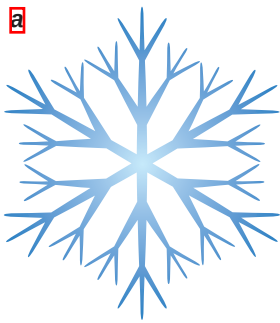
Le manteau neigeux

De sa formation en haute altitude jusqu'à sa fonte au printemps, la neige subit des métamorphoses qui modifient sa structure, sa cohésion, ainsi que les formes des cristaux. Dans un nuage, la neige cristallise sous des formes variées selon la température. Par exemple, lorsque la température est inférieure à -12°C , les cristaux ont une forme d'étoile ; quand la température est comprise entre -6 et -10°C , la neige tombe sous la forme de bâtonnets. Au sol, ces cristaux subissent également de nombreuses transformations en fonction du gradient de température qui règne à l'intérieur du manteau neigeux. Ce gradient varie selon le moment de la journée : au soleil, la surface est plus chaude que les couches enfouies ; inversement, pendant la nuit, la terre rayonne la chaleur emmagasinée, et les couches basses sont plus chaudes que la surface. Les métamorphoses des cristaux sont plus importantes la nuit, car les variations de température en fonction de la profondeur sont plus prononcées. Détaillons

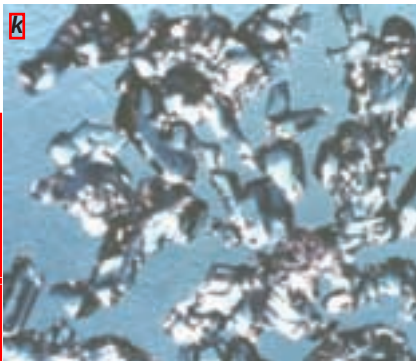
es

1. AU COL D'ORNAN, en Isère, le nuage de neige d'un écoulement aérosol dévale une pente.





0,5 MILLIMÈTRE



5 MILLIMÈTRES

2. LA FORME D'UN CRISTAL DE NEIGE varie selon la température. L'eau des excroissances d'un cristal en étoile se sublime, puis se condense dans les cavités (a et j). Le cristal s'émousse et devient un grain sphérique (de b à e). Ce dernier évolue encore et acquiert une forme pyramidale dite en «gobelet» (k et de f à i) lorsque la partie supérieure du grain se sublime tandis que de l'eau se condense sur sa partie inférieure.

un des scénarios possibles d'évolution des cristaux de neige.

La cohésion des cristaux en forme d'étoile, qui résulte de l'enchevêtrement des ramifications de ces cristaux, est faible (voir la figure 3). Quand la température varie peu dans l'épaisseur d'une couche (moins de 0,05 °C par centimètre), les cristaux en étoile évoluent spontanément vers une forme thermodynamiquement plus stable : les aspérités des étoiles se subliment, c'est-à-dire qu'elles passent de l'état

solide à l'état gazeux. Cette vapeur d'eau se condense au contact des zones concaves, au voisinage de la partie centrale des cristaux : les cavités se remplissent de glace. L'étoile s'émousse et prend peu à peu une forme sphérique nommée grain fin. Cet état compact confère à la couche une cohésion élevée grâce aux ponts de glace qui se forment : les points de contact des cristaux délimitent aussi des cavités où la vapeur d'eau se condense et relie les cristaux entre eux. Quand la température varie davantage (supérieure à 0,2 °C par centimètre), les grains fins se transforment à nouveau, car le gradient de température crée des zones plus chaudes où la sublimation est favorisée et des zones plus froides propices à la condensation : c'est toute la surface supérieure des grains qui se sublime, tandis que, sur la partie basse, l'eau se condense, s'accumule et cristallise : le grain acquiert une forme de pyramide, dite en «gobelet» (voir la figure 2). En raison des angles saillants, ces cristaux adhèrent moins les uns aux autres ; les couches de gobelets, dites «fragiles», sont moins stables.

Enfin, lorsque la température est proche de 0 °C, la neige s'humidifie et fond partiellement. Le film d'eau règle parfois : la cohésion de ces croûtes de regel, est forte. Le Centre d'étude de la neige de Météo-France, qui utilise aujourd'hui les rayons X pour étudier les transformations des cristaux de neige, a identifié plus de 1 000 types de particules neigeuses dont la formation dépend des échanges thermiques au sein de la couche et de la géométrie des cristaux. Les chutes de neige successives et les transformations des cristaux selon les variations climatiques constituent un manteau neigeux hétérogène et stratifié dont les propriétés mécaniques, notamment la cohésion, varient d'une couche à l'autre.

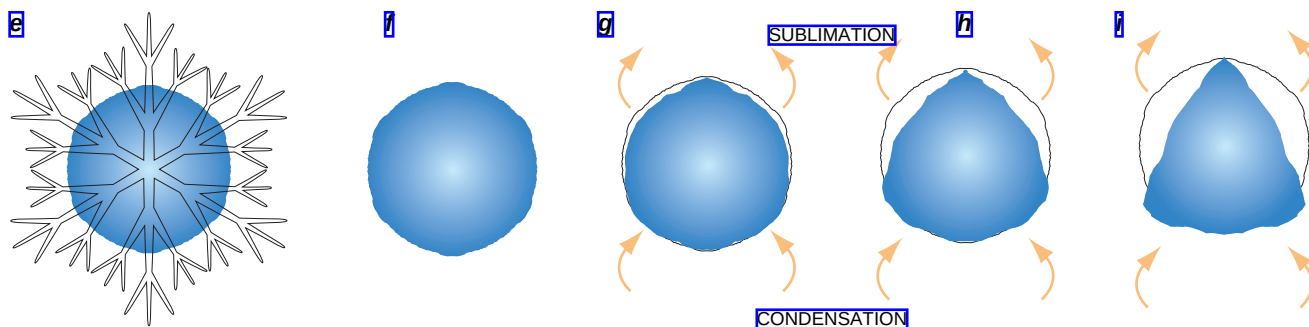
De plus, le vent transporte la neige tombée, il modifie sa répartition et le profil du manteau neigeux. Un vent suf-

fisamment fort arrache des grains de neige fraîche et les emporte jusqu'à ce qu'ils retombent sous l'effet de la gravité. Quand leur énergie cinétique est suffisante, ils expulsent à leur tour de nouveaux grains de neige (un grain arrache jusqu'à une dizaine d'autres grains) qui, par un effet «boule de neige», déplacent une quantité importante de neige. Ce phénomène, nommé saltation, est identique à celui de la formation des dunes de sable. Lorsque la vitesse du vent augmente, la saltation est prolongée au-dessus par une mise en suspension des grains de neige qui ne touchent plus le sol : leur déplacement devient turbulent (voir la figure 4).

Les plaques

En haute montagne, lorsque le vent accumule de la neige à proximité d'une crête, les risques d'avalanche sont renforcés. Sur la face exposée de la crête, le vent arrache des grains de neige fraîche, par exemple des cristaux en étoile, et les emporte. Avant la crête, le vent accélère par effet Venturi, selon lequel, en présence d'un goulet d'étranglement, la pression d'un fluide qui s'écoule diminue tandis que sa vitesse augmente. Au moment de l'arrachement et pendant le transport, les cristaux de neige sont brisés et deviennent sphériques. Après la crête, le vent ralentit : les cristaux se déposent et s'accumulent. Certains de ces cristaux de neige forment une corniche au sommet de la crête, d'autres s'accumulent sur le versant montagneux situé en aval et, grâce à la formation de ponts de glace, forment une plaque cohésive (voir la figure 5). Nous nous limiterons à l'étude du comportement de ces plaques créées par le transport éolien de la neige, dont on estime que les ruptures sont responsables d'environ 80 pour cent des avalanches majeures.

Les précipitations successives, ainsi que le transport de la neige par le vent sont responsables de la stratification



du manteau neigeux et de la formation des plaques. L'existence d'une couche fragile enfouie et la mauvaise adhérence des strates créent ainsi des zones de fragilité et d'instabilité. Quels sont les différents modes de rupture liés à cette stratification? Nous avons étudié le cas simple de la superposition de deux couches : une plaque qui repose sur une couche fragile.

À l'équilibre, une plaque est soumise à son poids ; aux frottements avec la couche inférieure et avec la neige située sur les côtés ; à la résistance à la traction de la zone d'ancrage en amont et à la résistance à la compression du manteau neigeux en aval. Cette plaque exerce sur la couche inférieure une contrainte définie par le rapport de la force (ici le poids de la plaque) sur sa surface : elle se décompose en une composante perpendiculaire à cette surface et en une composante tangentielle (parallèle à la pente). Cette composante tangentielle est la contrainte de cisaillement de la couche inférieure.

Lorsque la neige s'accumule sur une plaque, la couche fragile inférieure risque de s'effondrer brutalement sous la charge : les forces de frottement sous la plaque s'annulent, les résistances et les frottements restants ne suffisent plus à la retenir ; elle se détache et dévale la pente.

En d'autres termes, la plaque qui compose l'avalanche se désolidarise du manteau neigeux d'abord parallèlement au sol, puis perpendiculairement au reste du manteau neigeux qui reste en place.

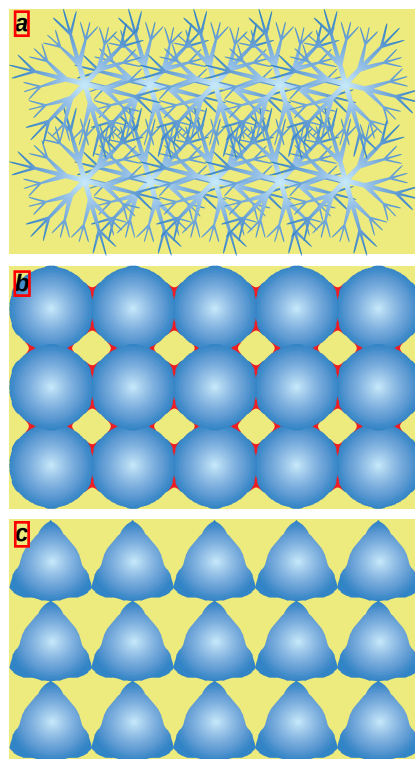
Cette instabilité est renforcée par le déséquilibre dans la répartition de la neige au sein d'une plaque : pour un même volume de neige, la surface des bords d'une plaque épaisse de trois mètres en son centre et de quelques dizaines de centimètres à la périphérie est inférieure à celle des bords d'une plaque homogène dans son épaisseur ; ainsi, sur les côtés, les forces de frottement d'une plaque hétérogène sont plus faibles.

Outre le déclenchement spontané, une perturbation locale, tels la chute d'une corniche ou le passage d'un skieur, est souvent la cause d'un écoulement. La surcharge instantanée de la plaque diminue localement l'épaisseur de la couche inférieure. La plaque se déforme alors pour s'adapter localement à la nouvelle géométrie de la couche inférieure. Cette déformation locale se propage dans la plaque, telle une ride à la surface de l'eau : la couche inférieure s'effondre alors de proche en proche ; le contact entre les plaques est rompu, les forces de frottements disparaissent et la plaque se décroche (voir la figure 7). Ce phénomène est d'autant plus probable que la plaque est fine et déformable. En outre, plus la pente est forte, plus le déclenchement est facilité. Désolidarisée du manteau neigeux, la plaque dévale la pente : c'est l'avalanche!

Les différents types d'avalanches

On distingue les avalanches denses où la neige reste compacte, les écoulements aérosols où la neige, mélangée à l'air, forme un nuage, et enfin les avalanches mixtes qui allient les deux types d'écoulement. L'écoulement le plus fréquent est l'avalanche dense qui suit les couloirs naturels, les ravins qui entaillent les versants montagneux : elle dévale les pentes à une vitesse de 20 à 30 mètres par seconde ; sa masse volumique est celle de la neige, de 150 à plus de 450 kilogrammes par mètre cube (l'eau a une masse volumique de 1 000 kilogrammes par mètre cube). En revanche, l'écoulement aérosol, plus rare dans les montagnes européennes, est plus turbulent et plus volumineux, car la neige, qui peut atteindre une vitesse de 60 mètres par seconde, incorpore l'air ambiant : sa masse volumique n'est que de 10 à 40 kilogrammes par mètre cube.

Les dégâts dépendent de l'énergie emmagasinée, de sa répartition au sein



3. LA COHESION D'UNE COUCHE dépend du type de cristal : une couche de cristaux en étoiles enchevêtrés (a) ou de gobelets aux angles saillants (c) est peu cohésive et instable. En revanche, grâce aux « ponts de glace » (en rouge), une couche de grains fins (b) est très cohésive, c'est-à-dire compacte et stable.

de l'avalanche et des obstacles, du volume de neige mobilisé et des caractéristiques du couloir. Les avalanches denses sont destructrices par la quantité d'énergie cinétique emmagasinée sur la pente parcourue, alors que les avalanches aérosols sont dévastatrices d'abord par le souffle engendré, puis par la vitesse et la turbulence de son écoulement. Les deux types d'écoulement arrachent parfois des arbres et descendent des blocs rocheux qui amplifient encore les dégâts, car ces éléments, plus denses, augmentent localement la pression de l'écoulement.

Les avalanches mixtes, telle celle d'Arinsal, en Andorre, en 1993, qui s'est déclenchée à plus de 2 000 mètres

d'altitude après une forte tempête, font encore plus de ravages : dans la faible pente où elle s'est formée, l'avalanche était un écoulement dense, puis, dans une zone plus pentue, sa vitesse a augmenté et sa couche supérieure s'est transformée en un aérosol. Les premiers étages d'un immeuble ont été brisés par la partie dense, tandis que les étages supérieurs ont été soufflés par l'aérosol. Avec de la neige sèche peu cohésive et sur une forte pente, l'augmentation de la vitesse fait évoluer l'avalanche vers un aérosol. À l'inverse, lorsque la

pente diminue, l'effet de la gravité disparaît, et les frottements arrêtent l'avalanche.

Cette première classification, qui distingue les écoulements selon leur masse volumique, n'explique pas tous les types d'écoulements, et nous l'avons complétée par l'analyse des mécanismes physiques. L'écoulement et les transitions entre les différents types dépendent des échanges d'énergie cinétique et de quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse de la masse en mouvement) entre les constituants de l'avalanche.

Les transferts d'énergie

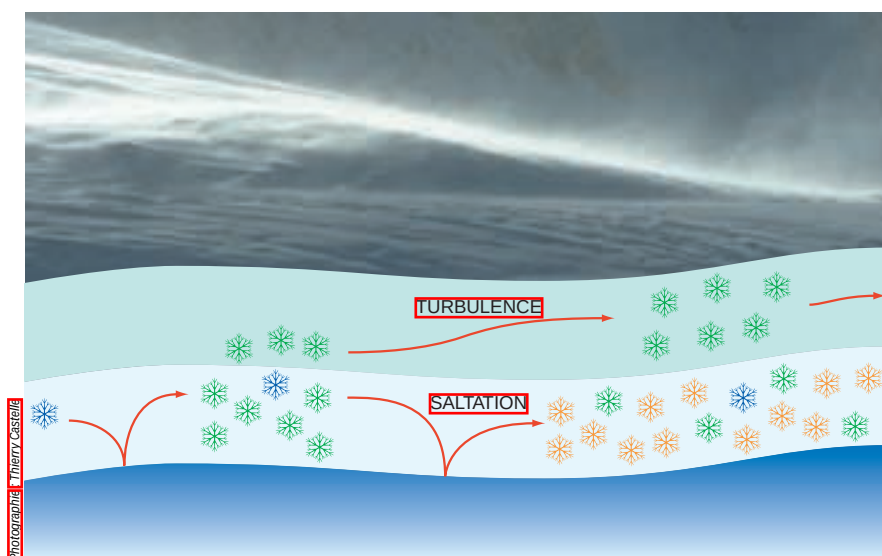
Initialement, le manteau neigeux est un milieu hétérogène et anisotrope, mais, après le déclenchement d'une avalanche, le matériau se désagrège, et le fort brassage mélange ses différentes couches et rend la composition de l'avalanche plus homogène.

Dans les avalanches de neige sèche et peu cohésive que nous avons étudiées, les frottements, les chocs ou la turbulence de l'air sont les seuls vecteurs d'énergie. Quand la masse volumique de l'avalanche de neige est élevée et la vitesse de l'écoulement faible, par exemple lorsqu'une avalanche dense dévale un couloir peu pentu, les contacts entre les grains sont longs, et les échanges d'énergie s'effectuent surtout par l'intermédiaire des frottements. Dans cette phase, les frottements entre les grains dominent, tandis que l'effet des chocs et de l'air est négligeable.

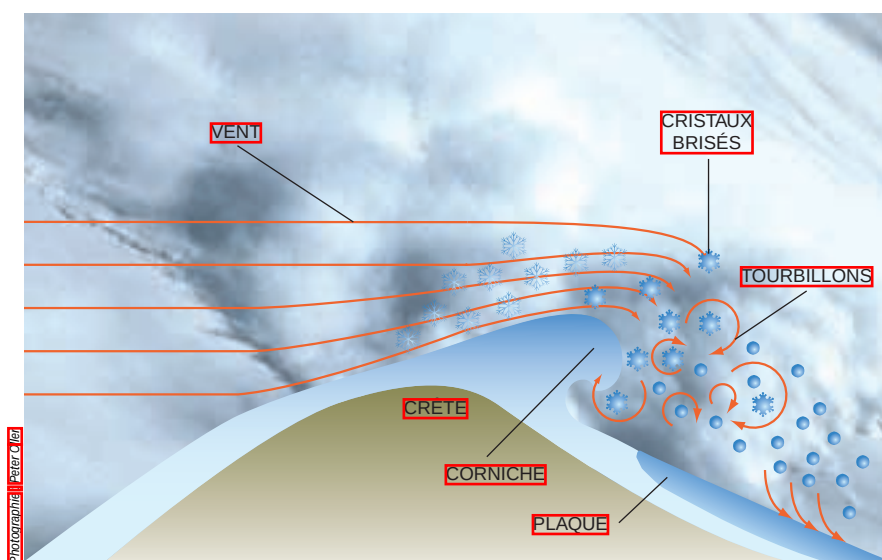
Lorsque la vitesse de l'avalanche dense augmente, son volume augmente également, tandis que sa concentration en glace diminue. Dans cette phase, les contacts entre grains sont de plus en plus courts, et la dissipation de l'énergie par frottements diminue au profit d'échanges de quantité de mouvement lors de chocs entre les cristaux de neige. L'écoulement est alors moyennement dense et rapide.

Quand la pente est forte sur une distance importante, la vitesse augmente. Les frottements et la cohésion de la neige étant faibles, les grains de neige sont alors arrachés et mis en suspension dans l'air : la majeure partie ou la totalité de la neige dense est ainsi intégrée dans l'aérosol qui se forme. Dans un écoulement aérosol, les grains sont totalement entourés d'air et n'interagissent plus. Les grains de neige sont portés par l'air, dont la turbulence assure la dissipation de l'énergie.

Pour une avalanche mixte, l'écoulement est composé d'une couche dense recouverte d'une couche de poudreuse en aérosol, qui se forme par l'érosion du sommet de la couche dense. Les deux couches interagissent en échangeant de la masse et de la quantité de mouvement (voir la figure 7). Dans les zones pentues, le front de l'avalanche est constitué de la partie dense, tandis que la partie aérosol est en retrait de 10 à 40 mètres, car elle est freinée par l'air qu'elle



4. UN CRISTAL DE NEIGE ARRACHÉ par un vent suffisamment fort déloge en retombant d'autres cristaux (cristaux verts) qui en font autant (cristaux orange) : peu à peu, la quantité de neige transportée par ce phénomène de saltation (couche bleu clair) augmente. Lorsque le vent s'accélère, les grains arrachés ne touchent plus le sol et sont emportés par la turbulence de l'air (couche verte).



5. AU-DESSUS D'UNE CRÊTE, le vent accéléré par effet Venturi arrache des cristaux de neige. Derrière la crête, le vent ralentit et forme des tourbillons : les cristaux brisés pendant le transport se déposent et forment, d'une part, une corniche et, d'autre part, une plaque de neige dense et cohésive qui, en se détachant, déclenche les avalanches.

incorpore. En revanche, dans la zone de faible pente, la partie dense, freinée par les frottements, s'arrête rapidement, tandis que la partie poussiéreuse en aérosol, entraînée par son inertie, parcourt une plus grande distance avant de s'arrêter.

En surface d'un écoulement dense, les particules de neige sont soulevées et mises en suspension dans l'air turbulent. La turbulence tend à maintenir les grains de neige en suspension, tandis que la gravité les entraîne vers le sol. Dans un aérosol, l'équilibre – ou le déséquilibre – entre ces deux forces détermine l'évolution de l'écoulement. Quand la turbulence de l'air l'emporte, l'écoulement s'amplifie ; à l'inverse, lorsque la gravité domine, l'aérosol régresse.

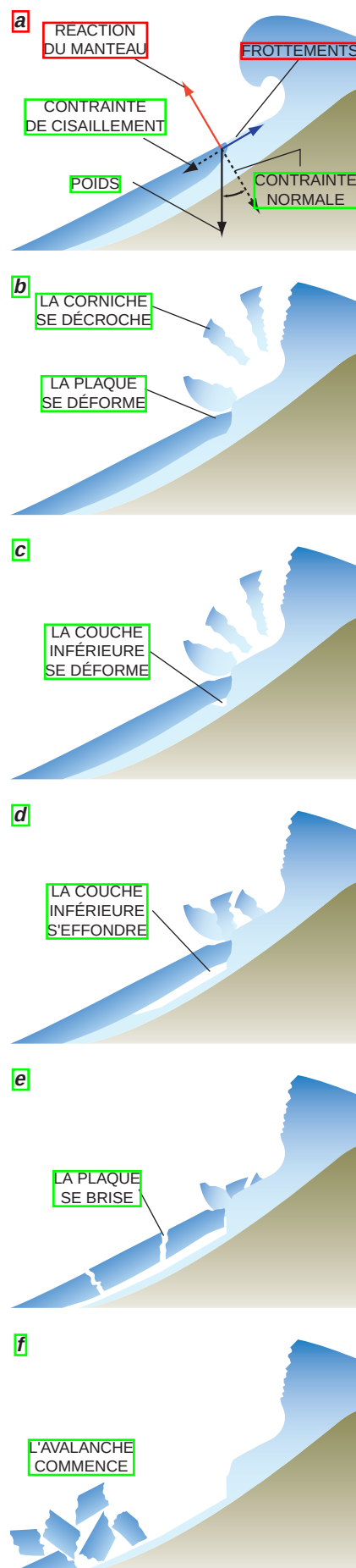
Connaissant la physique de la formation des couches de neige, du transport de la neige par le vent et du déclenchement des écoulements, nous avons modélisé la formation des avalanches catastrophiques et, pour les avalanches mixtes, les transitions et les échanges entre les deux phases de l'écoulement.

Modélisation et prévention

La modélisation du transport de la neige par les avalanches a longtemps consisté en des simulations effectuées sur des maquettes dans des souffleries. Cependant, celles-ci ne rendent pas compte de la complexité des phénomènes en jeu. Aussi, la modélisation physique a progressivement été remplacée par la simulation numérique.

Dans un premier temps, les écoulements denses et les aérosols étaient simulés par des modèles distincts. Par exemple, les avalanches denses étaient simulées par des modèles dits de la dynamique du point, dans lesquels l'écoulement est un bloc indéformable, assimilé à un point dont on étudie la trajectoire.

Puis, dans les années 1980, des modèles plus complexes sont apparus pour les avalanches aérosols : elles étaient étudiées comme l'écoulement d'une suspension. Toutefois, la plupart des avalanches catastrophiques sont composées d'une partie dense en contact avec le sol et d'une partie aérosol qui recouvre la partie dense. Les



6. UNE PLAQUE à l'équilibre (a) est soumise à son poids (en noir), à des forces de frottements du reste du manteau neigeux (en bleu) et à la réaction du manteau neigeux. L'ensemble des contraintes qui s'exerce sur la couche inférieure se décomposent en une composante normale et une composante tangentielle, nommée contrainte de cisaillement. La chute d'une corniche entraîne la rupture de la plaque. Sous la surcharge, la plaque en se déformant (b) écrase la couche inférieure (c). Cette dernière s'effondre de proche en proche (d) : les forces de frottements avec le reste du manteau neigeux ne suffisent plus à retenir la plaque, qui se brise (e et ci-dessus), se décroche, et dévale la pente (f).

modèles précédents étaient donc insuffisants et ne rendaient pas compte de la réalité.

Dans notre laboratoire *Érosion torrentielle, neige et avalanches*, au CEMAGREF, nous avons commencé par modéliser le transport de la neige et son effet sur le profil du manteau neigeux. Or, des expériences effectuées au Japon et en Norvège avaient mis au jour l'existence d'un échange de matière et de quantité de mouvement entre la couche dense et la couche aérosol d'une avalanche mixte. Cet échange est responsable de la formation et de la croissance de l'aérosol. Le transport de la neige sur un manteau statique pouvait ainsi s'appliquer sur un écoulement dense en mouvement : la modélisation des avalanches mixtes devenait possible.

Dans notre modèle du transport de la neige par le vent, la couche de neige transportée est décomposée en deux zones : la couche de saltation, où les grains de neige retombent sur le manteau neigeux, et la couche de suspension, où la concentration en grains de neige est faible et où ces grains sont maintenus en l'air par la turbulence de l'air. La couche de saltation correspond à la couche immédiatement en contact avec le manteau neigeux. Les grains de neige, arrachés par les forces aérodynamiques, ont des trajectoires paraboliques. Dans cette couche, ils atteignent jusqu'à 80 pour cent de la vitesse de l'air et retombent avec une énergie cinétique forte pour déloger d'autres grains de neige. Dans notre modèle, cette couche de saltation est décrite par son épaisseur, c'est-à-dire la hau-

teur des rebonds, sa concentration et les vitesses des grains et de l'air. Le modèle des échanges entre les deux couches tient compte de l'interaction entre la phase fluide et la phase solide, ainsi que de l'érosion de la couche dense et du dépôt des grains de la couche aérosol lorsque la turbulence de l'air diminue.

Les avalanches mixtes

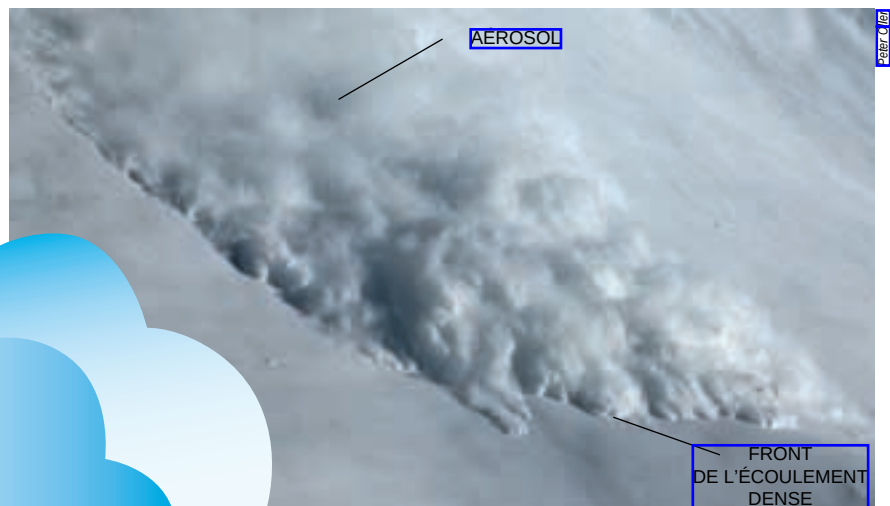
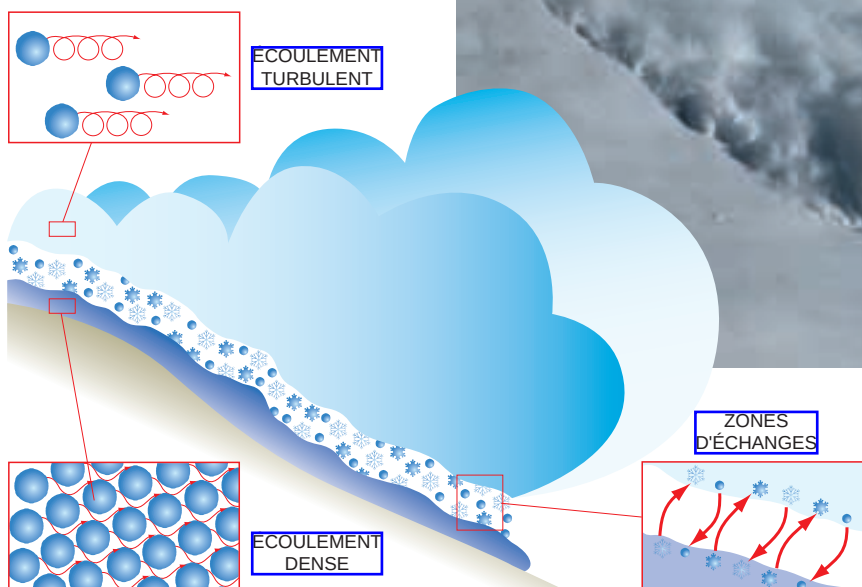
Notre modèle des avalanches mixtes, qui découle du modèle précédent, traite l'écoulement, du moment où il se déclenche jusqu'à son arrêt. La couche inférieure, la plus dense, se comporte comme un écoulement dense dont le paramètre principal est le frottement sur la neige immobile. Notre simulation se fonde sur les lois de conservation de la matière et de la quantité de mouvement, complétées par des modèles issus de la théorie des milieux granulaires. Dans les équations des écoulements denses, on intègre des termes qui représentent les flux de masse et de quantité de mouvement échangés, d'une part, entre la phase dense et la neige immobile et, d'autre part, entre la phase dense et la phase aérosol. À mesure que l'aérosol progresse, il incorpore de l'air, son volume augmente et le nuage de neige qui le compose s'étend.

Nous supposons que la zone qui sépare les deux couches de l'écoulement se comporte à la manière d'une couche de saltation. Nous retrouvons

dans les équations de cette zone les termes des flux de masse et de quantité de mouvement échangés : ils représentent l'érosion ou le dépôt des grains de neige. La quantité de neige prélevée est proportionnelle à la différence des contraintes exercées par les turbulences de l'aérosol et les forces qui résistent à l'arrachement des particules.

Avant de tester nos modèles numériques, nous devons donner des valeurs aux paramètres des équations : par exemple, la densité de la neige, l'angle limite de stabilité au-delà duquel une quantité de neige donnée se décroche, l'épaisseur des couches en jeu et la géométrie du couloir emprunté... Les valeurs de ces paramètres sont mesurées soit par des mesures effectuées sur le terrain, soit lors d'expériences en laboratoire.

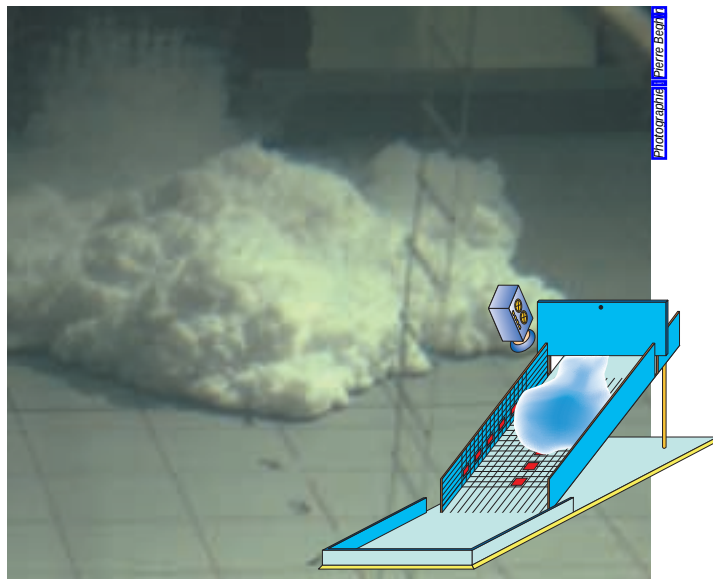
Pour les expériences sur le terrain, le CEMAGREF dispose d'un site expérimental, partagé avec le Centre d'études de la neige, situé à 2 700 mètres d'altitude dans le massif des Grandes Rousses, près de L'Alpe-d'Huez. Sur ce site, l'évolution du manteau neigeux (l'épaisseur et la composition) est suivie dans des zones de dépôt et d'érosion grâce à des sondages, et les paramètres météorologiques sont enregistrés automatiquement. Le transport de la neige par le vent est également suivi, grâce à des capteurs acoustiques. Il s'agit de microphones miniatures placés dans des tubes creux d'aluminium



7. LES AVALANCHES MIXTES, telle celle du Bourgeat, en Savoie, (*en haut*) sont constituées de deux écoulements. Le premier est un écoulement dense (couches inférieures) où les frottements dominent. Le second est turbulent (couches supérieures) : les cristaux ne se touchent plus. Les deux écoulements sont séparés par une zone d'échange de matière et de quantité de mouvement.



8. LA SIMULATION NUMERIQUE de l'avalanche de MontRoc, près de Chamonix, en Haute-Savoie, montre l'onde de pression (plus le rouge est foncé, plus la pression est forte) de la neige détachée de la zone de départ (en bleu, en bas à droite). L'écoulement dense, dont la zone d'arrêt, dans le village même, est marquée en violet, a suivi deux couloirs différents.



9. PAR DES EXPERIENCES EN LABORATOIRE, on mesure les paramètres des modèles numériques. Une masse de neige artificielle est libérée par une trappe sur un plan incliné muni de capteurs (en rouge sur le schéma) et filmé par une caméra. Dans un autre type d'expériences, les écoulements aérosols sont simulés par des suspensions de particules dans un bassin rempli d'eau (photographie).

exposés au flux de particules. Les sons des impacts des particules sont convertis en signaux électriques. Un filtrage élimine les basses fréquences dues au vent et les hautes fréquences parasites.

Des paramètres à la validation

Par ailleurs, nous étudions en laboratoire le comportement de matériaux modèles (poudre dérivée de la chaux, différents sables, billes de polychlorure de vinyle, sciure de bois) sur des plans inclinables équipés d'une caméra vidéo et de capteurs qui mesurent l'épaisseur de l'avalanche et les contraintes exercées sur le fond du canal lors de son passage.

Nous simulons également des écoulements aérosols dans des bassins d'eau où s'écoulent des suspensions de particules. Ainsi, l'écoulement est suffisamment lent pour être suivi avec précision (voir la figure 9). Les résultats des modèles numériques sont ensuite validés par comparaison avec les résultats des expériences en laboratoire et sur le terrain. Nos résultats numériques s'accordent avec les résultats expérimentaux, aussi bien pour les écoulements aérosols que pour les écoulements denses.

Enfin, nous validons nos modèles par des reconstitutions d'événements : il s'agit d'une justification globale des résultats par rapport à des données

d'enquêtes sur le terrain telles que les limites de l'avalanche, les dégâts, l'estimation de la zone de départ, l'estimation de l'épaisseur de neige initiale.

Par exemple, nous avons reconstitué l'avalanche du Bourgeat, en Savoie, et l'avalanche du Tour, à Chamonix (voir la figure 8), qui ont provoqué des dégâts importants dans des zones habitées. Nous avons, d'une part, relevé l'ensemble des informations de terrain laissées par l'avalanche et, d'autre part, étudié les conditions météorologiques qui ont produit cet événement. Le manteau neigeux était composé uniquement de la neige fraîche tombée durant les 24 heures précédentes. Le modèle a reproduit précisément le champ de pression dans la zone des dégâts. Ce protocole a été appliqué à cinq couloirs différents, dont les géométries et les topographies sont des archétypes de couloirs d'avalanches. Pour chacun, la comparaison des relevés sur le terrain et des résultats du modèle numérique a permis de reproduire les limites des cinq avalanches observées. Pour les couloirs étudiés, la simulation permet de

modifier des paramètres et de simuler les conséquences d'événements plus catastrophiques que ceux observés. Pour les couloirs mal connus, on procède par analogie avec des couloirs bien étudiés.

Ainsi, les collectivités seront en mesure d'optimiser le zonage d'une région, c'est-à-dire d'identifier les domaines où les implantations d'habitations et d'équipements sont déconseillées, risquées ou sans danger.

En outre, nous espérons créer un environnement commun européen pour le zonage assisté par ordinateur, alliant la modélisation numérique, les capacités des systèmes d'informations géographiques et les données du terrain. Les modèles présentés ne rendent pas encore compte de toute la complexité des avalanches, mais ils sont suffisants pour établir les scénarios possibles le long d'un couloir donné. Ajoutés à d'autres sources d'informations, notamment les données historiques et l'interprétation de photos aériennes, les modèles informatiques participent déjà à la prévention des avalanches.

Mohamed NAAIM est chargé de recherche au CEMAGREF, à Grenoble. Florence BOUVET-NAAIM est ingénieur de recherche au CEMAGREF. Lionel VIDAL est ingénieur à la Société Transmontagne.

F. BOUVET-NAAIM, M. PRAT, J.-A. CALGARO et J. RAOUL, *La neige : recherche et*

réglementation, CEMAGREF et Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.

M. NAAIM, F. BOUVET-NAAIM et H. MARTINEZ, *Numerical Simulation of Chifting Mow : Erosion and Deposition Models*, in *Annals of Glaciology*, n° 26, pp. 212-216, 1997.

À la recherche de l'îlot superlourd

IOURI OGANESSIAN • VLADIMIR UTYONKOV • KENTON MOODY

La synthèse de l'élément 114 a confirmé des prévisions théoriques vieilles de plusieurs décennies : un îlot de stabilité nucléaire existe au milieu de la mer des noyaux superlourds à courte durée de vie.

Au printemps 1940, la synthèse du neptunium marque le début d'une fascinante odyssée dans des eaux inexplorées. Dans l'océan des noyaux lourds, les noyaux qui ont plus de protons que l'uranium (soit plus de 92 protons) ont des propriétés remarquables. En raison de leur nombre élevé d'électrons, ces éléments «transuraniens» ont fourni aux chimistes des renseignements précieux sur les liaisons chimiques et sur l'arrangement des électrons dans les atomes. Ces éléments sont également utilisés dans des techniques variées, des armes nucléaires aux détecteurs de fumée.

La quête des éléments transuraniens a ainsi abouti à la synthèse de 23 éléments. Parmi ceux-ci, seuls les deux plus légers (le neptunium et le plutonium) existent à l'état naturel. La création récente de l'élément 114 a mis fin à une traversée particulièrement difficile, et les physiciens ont touché terre après une navigation périlleuse dans un océan d'instabilité, entre les éléments à plus de 106 protons : en bombardant des noyaux lourds à l'aide de faisceaux d'ions de noyaux plus légers, les physiciens fabriquent des noyaux superlourds si instables qu'ils se divisent presque aussitôt, une fraction de seconde après leur création ; alors qu'ils approchaient du nombre «magique» de 114, les expérimentateurs ont enfin vu apparaître un îlot de stabilité, où tout un ensemble d'éléments encore plus lourds font preuve d'une stabilité et d'une longévité étonnantes.

Les physiciens nucléaires entrevoient l'îlot de stabilité dès 1966. Toutefois, telle la cité légendaire d'El-

dorado, cet îlot de stabilité semble être inaccessible à jamais. Contrairement à l'Eldorado, la localisation de l'îlot n'était pas secrète : on a calculé que son point le plus stable était un isotope de l'élément 114 comprenant 184 neutrons. Ce point central était entouré d'éléments un peu moins stables, dont les nombres de protons étaient compris entre 109 et 115. Les physiciens avaient ainsi une carte qui montre où se rendre, mais le problème est de savoir comment s'y rendre et comment savoir quand on sera au but.

Les premières synthèses d'éléments lourds datent de 1934. On bombardait alors des noyaux d'éléments lourds par des faisceaux de neutrons. Chaque neutron capté par le noyau cible subit une désintégration bêta : il se transforme en un proton et un électron. Le noyau résultant possède un proton de plus que le noyau cible initial. Autrement dit, le numéro atomique (le nombre de protons du noyau) de l'élément créé augmente d'une unité par rapport à celui de l'élément cible, ce qui change la nature de l'élément ; le nombre de neutrons, lui, détermine la stabilité de l'«isotope» formé.

Au milieu des années 1950, les physiciens ont ainsi synthétisé les éléments 93 (le neptunium), 94 (le plutonium), 99 et 100. À la même époque, ils ont créé les éléments 95, 96, 97, 98 et 101 en irradiant des noyaux lourds avec des faisceaux de particules alpha, c'est-à-dire des noyaux d'hélium 4, constitué de deux protons et de deux neutrons. Par cette méthode, on augmente le numéro atomique de deux unités.



La mise au point des accélérateurs de particules permet ensuite aux physiciens de focaliser des jets intenses d'ions légers, comme le bore (de numéro atomique 5) sur les noyaux d'éléments dont les numéros atomiques sont compris entre 94 et 98, afin de les faire fusionner. La fusion ne s'opère que si la collision est suffisamment forte pour surmonter la répulsion électrostatique entre les noyaux, chargés positivement. Comme on doit donner beaucoup d'énergie aux projectiles, le noyau résultant est très chaud. C'est un inconvénient, car le nouvel élément risque alors de se désintégrer avant même d'être sorti de la cible, plutôt que d'aboutir à un état stable. Grâce à cette technique, dite de «fusion chaude», les physiciens

créent les éléments 102 à 106 entre 1958 et 1974. Au-delà, la tendance à fissionner empêche la synthèse de nouveaux éléments.

Du chaud au froid

En 1974, à l'Institut de recherches nucléaires de Dubna (près de Moscou), l'un de nous (I. Oganessian) découvre qu'un faisceau d'ions plus lourds envoyé sur des noyaux plus légers que les transuraniens engendre des noyaux dont l'énergie d'excitation est inférieure. Ainsi, ces noyaux restent intacts plus longtemps. La recherche à l'aide de cette technique de «fusion froide» est mise en œuvre l'année suivante après l'ouverture de l'accélérateur UNILAC (*Universal Linear Accelerator*) à l'Institut de recherche sur les ions lourds (GSI), à Darmstadt (cette fusion froide n'a rien à voir avec celle qui prétendait récupérer l'énergie nucléaire par la synthèse de l'eau). L'UNILAC est l'un des premiers à accélérer des ions très lourds à grande énergie. Malheureusement, au cours des expériences, très

peu de noyaux du nouvel élément recherché sont créés, et les noyaux-fils, qui résultent de la désintégration du nouvel élément, se désintègrent si vite qu'ils doivent être détectés alors que la synthèse est encore en cours. Les méthodes de l'époque ne permettent pas la détection des éléments créés par cette technique, et plusieurs années s'écoulent sans qu'un nouvel élément ne soit identifié.

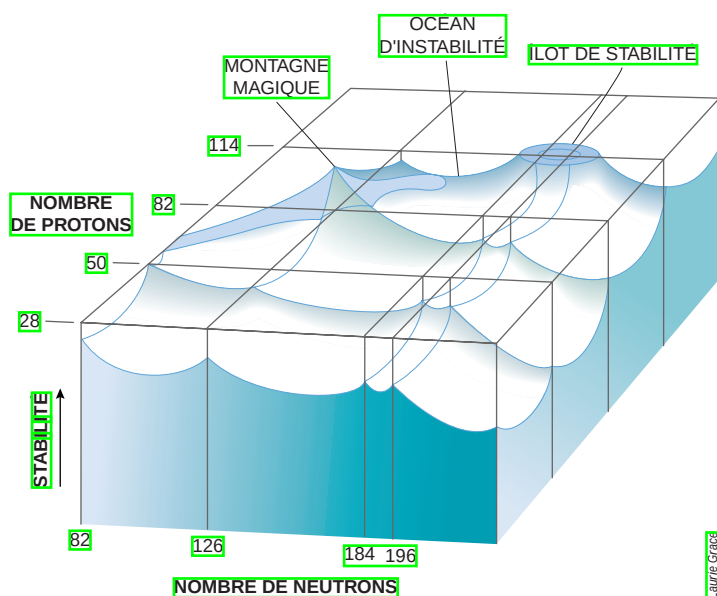
Au début des années 1980, une équipe de Darmstadt met au point une méthode sensible pour l'identification des produits de fusion. Grâce à elle, les physiciens allemands synthétisent et identifient les éléments 107, 108 et 109. C'est un exploit : l'accélérateur fonctionne pendant deux semaines d'affilée afin de créer un seul atome de l'élément 109. En ajustant l'intensité du faisceau d'ions et en augmentant la sensibilité des dispositifs de détection, la même équipe produit même l'élément 110 et 111, en 1994, et l'élément 112 en 1996. La période de l'élément 112 est de 240 microsecondes (la période, ou demi-vie, est le temps après lequel la moitié des noyaux d'un échantillon



sont désintégrés), et seuls deux de ces atomes sont produits en 25 jours d'expériences.

Depuis 1996, des équipes de recherche européennes, américaines et russes ont fabriqué six nouveaux éléments, avec des numéros atomiques allant jusqu'à 118. La synthèse la plus importante a été celle des isotopes de l'élément 114, parce qu'elle a établi l'existence de l'îlot de stabilité. Ce résultat a confirmé que certaines combinaisons de protons et de neutrons donnent des noyaux particulièrement cohésifs, des noyaux «magiques», tout comme les électrons réduisent l'instabilité chimique des atomes quand ils forment des couches complètes.

Selon le modèle nucléaire en couche, établi en 1948, plusieurs noyaux



1. L'OCEAN DES NOYAUX LOURDS contient de nombreux éléments instables. Le noyau atomique d'un élément contient un nombre fixe de protons, mais il existe différentes formes de cet élément, les isotopes, dont le nombre de neutrons et la stabilité diffèrent. Sur cette carte, se trouve une montagne magique : l'isotope particulièrement stable du plomb (élément à 82 protons) contenant 126 neutrons. Pour les noyaux à plus de 106 protons, beaucoup de ces isotopes sont relativement instables ; ils forment comme un «océan d'instabilité». Depuis 1966, les théoriciens ont prédit l'existence d'un îlot de stabilité, au centre duquel se trouverait un isotope à 184 neutrons de l'élément 114. Les expérimentateurs ont récemment accédé à cet îlot en créant un isotope à 175 neutrons de l'élément 114.

sont magiques. Par exemple le plomb est doublement magique, car ses 82 protons et ses 126 neutrons forment respectivement des couches complètes. En 1966, les physiciens avaient établi que le noyau doublement magique suivant aurait 114 protons et 184 neutrons, mais cette prévision contredisait la théorie alors dominante, selon laquelle la période de désintégration de ces éléments ainsi que leur stabilité, diminuait rapidement à mesure que la masse des noyaux augmenterait. La prévision de ces nombres magiques a engendré de nombreuses spéculations sur la présence d'un îlot de noyaux d'une longévité inhabituelle, perdu au milieu d'un océan de noyaux instables.



V. Utynkov, I. Oganessian

2. L'ÉQUIPE DE RECHERCHE de l'Institut de physique nucléaire de Dubna pose près de son installation expérimentale. Le séparateur à gaz est en haut à gauche de la photographie, et l'on voit dépasser

sur la droite les bras du dispositif de la cible. Deux des auteurs de cet article figurent sur ce cliché : V. Utynkov et I. Oganessian (respectivement deuxième et quatrième en partant de la gauche).

Cet îlot était difficile d'accès, parce que ses noyaux ont plus de neutrons par proton que n'importe quel noyau stable connu. Pour les obtenir, nous avons choisi une réaction qui introduisait beaucoup de neutrons dans le noyau cible : il s'agissait d'irradier du plutonium 244 (l'isotope le plus lourd du plutonium, de numéro atomique 94) avec un faisceau intense d'ions de calcium 48, un isotope rare et particulièrement riche en neutrons du calcium (numéro atomique 20). Nous espérions ainsi obtenir par fusion un noyau composé de 114 protons et de 178 neutrons, très proche de la configuration doublement magique de 114 protons et de 184 neutrons.

Nous savions que si les noyaux de calcium 48 heurtaient ceux de plutonium 244 avec une énergie suffisante pour vaincre leur répulsion électrostatique mutuelle, les noyaux résultants seraient peu excités, de sorte que certains d'entre eux au moins ne fissionneraient pas : ces noyaux perdraient rapidement trois neutrons, et le noyau alors formé serait à une température inférieure au seuil de fission (plus un noyau est chaud, plus il a des chances de fissionner).

Se débarrasser des indésirables

Toutes les tentatives précédentes avaient échoué, car les rares noyaux produits, au cours d'expériences qui durent des semaines, sont perdus au milieu de milliers de milliards d'autres espèces nucléaires. Pour détecter ces noyaux lourds, nous avons dû centupler la sensibilité des détecteurs. Grâce à ces détecteurs modifiés, nous avons détecté les éléments nouvellement synthétisés avant leur désintégration. Le cyclotron à ions lourds de Dubna accélérail les ions de calcium 48 jusqu'au dixième de la vitesse de la lumière, puis il les projetait sur une cible composée de minces feuilles de titane recouvertes de plusieurs milligrammes de plutonium 244.

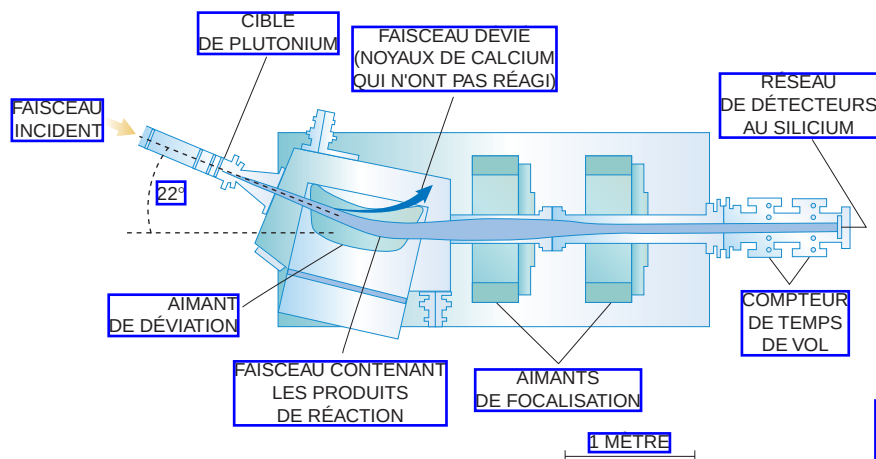
Comment séparer les produits de réaction qui nous intéressaient de la multitude de produits annexes de l'expérience? Nous savions que le noyau superlourd créé se désintégrerait par radioactivité alpha : à chaque désintégration, le noyau devait perdre un noyau d'hélium 4, soit deux protons et deux neutrons. L'élément 114 devait se désintégrer en l'élément 112, puis

en élément 110, puis en élément 108, jusqu'à ce que, hors de l'îlot de stabilité, une fission spontanée apparaisse. Malheureusement, la désintégration alpha et la fission des autres noyaux également produits lors de l'expérience ressemblent à ceux de l'élément 114. Or, des milliards de ces noyaux indésirables sont synthétisés chaque seconde, alors que l'on prévoyait moins d'un atome de l'élément 114 produit par jour. Comment éviter les événements parasites?

Les ingénieurs de Dubna ont conçu un séparateur rempli de gaz, qui laisse passer les produits que nous recherchons et détecte bien les désintégrations radioactives qui signalent leur présence, tout en éliminant les noyaux sans intérêt. Les produits de la fusion d'un noyau projectile et d'un noyau cible (mélange d'éléments 114 et d'autres produits non désirés) s'éloignent de la cible et entrent dans une chambre emplies d'hydrogène gazeux

à faible pression, dans l'entrefer d'un aimant. Les noyaux interagissent avec les atomes d'hydrogène gazeux, et ceux pour lesquels les électrons sont liés au noyau avec moins d'énergie que n'en fournit la collision ont tendance à se perdre. Le champ magnétique est ajusté de sorte que seuls les noyaux intéressants parviennent jusqu'au réseau de détection. Les noyaux de calcium 48 qui n'ont pas réagi avec la cible traversent rapidement l'hydrogène, mais ils sont si ionisés que le champ magnétique les dévie de la trajectoire qu'empruntent les particules recherchées. Le séparateur à gaz supprime également dans une grande mesure d'autres produits indésirables issus de collisions du noyau projectile sur le bord du noyau cible.

Les produits de réaction qui quittent le premier aimant sont alors focalisés magnétiquement vers un compteur de temps de vol, et ils finissent leur

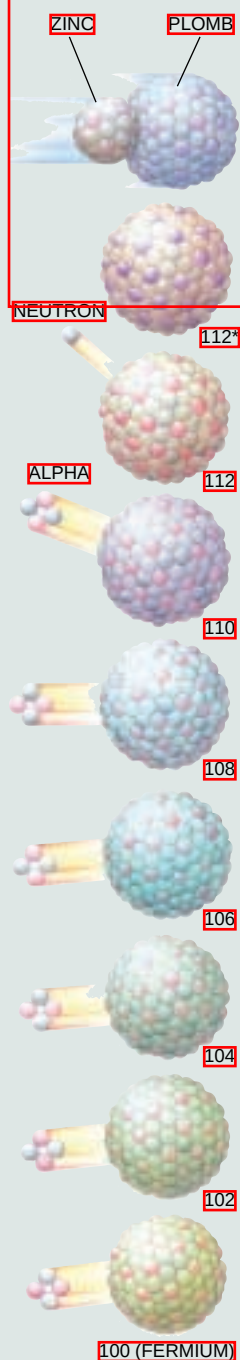


3. LE LABORATOIRE DE DUBNA (en haut) crée des faisceaux qui se déplacent de droite à gauche sur cette photographie. À gauche de la photographie se trouve le séparateur à gaz (schéma inférieur). Les faisceaux de produits de réaction provenant de la cible de plutonium sont déviés par un aimant. Les noyaux intéressants sont dirigés vers un ensemble de détecteurs en silicium. Les physiciens associent les informations sur les désintégrations nucléaires obtenues sur ces détecteurs et celles du compteur de temps de vol afin de déterminer quels isotopes ont été créés dans la cible.

1999, une année fertile en résultats et en interrogations

La synthèse d'éléments transuraniens, commencée en 1940, a procédé par sauts : quelques éléments découverts en une ou quelques années, puis plusieurs années consacrées à l'étude des propriétés de ces nouveaux éléments et à la mise au point de nouvelles méthodes de production ou d'identification. Ces méthodes servaient ensuite à la production des éléments suivants.

Entre 1981 et 1984, les physiciens nucléaires ont créé et observé les éléments 107 à 109, nommés bohrium (Bh), hassium (Hs) et meitnerium (Mt). Ce n'est que dix ans plus tard, entre 1994 et 1996, que les éléments 110 à 112 sont synthétisés. Jusque-là, la progression s'était faite pas à pas (mis à part l'élément 109 découvert avant l'élément 108) et il était vérifié que la chaîne de désintégration conduisait à un isotope déjà connu. Autrement dit, les physiciens mesuraient toutes les particules alpha et les durées de vie afférentes, et le noyau final était bien caractérisé : en remontant la chaîne des événements, on obtenait sans ambiguïté le nombre de protons et de neutrons du noyau initial implanté dans le détecteur.



Examinons, par exemple, la chaîne de désintégration de l'élément 112 produit par la fusion d'un noyau de zinc (70 nucléons, dont 30 protons) et d'un noyau de plomb (208 nucléons, dont 82 protons). L'élément 112 excité perd un neutron en 10^{-18} seconde, et c'est l'élément 112, avec 277 nucléons, qui s'implante dans le détecteur. La désintégration successive de cet élément, par émission d'une particule alpha, aboutit à un isotope du fermium dont les caractéristiques sont bien connues (voir la figure).

En 1999, la situation a changé à double titre : d'une part, on est passé directement à l'élément 114 (décrit dans cet article), puis à l'élément 118 (et au 116 par décroissance) ; d'autre part, la signature de l'attribution exacte n'a pu être obtenue. Dans le cas de l'élément 114, la chaîne de décroissance radioactive se fait bien par émission de particules alpha, mais elle se termine par une fission spontanée. Or, on n'identifie pas explicitement les produits de cette fission, mais uniquement l'énergie cinétique de ses deux fragments, qui augmente en moyenne avec le nombre de protons du noyau qui fissionne. Ici, elle est élevée, de sorte que l'on peut affirmer qu'elle vient d'un noyau très lourd. Toutefois, on ne peut préciser quel était le nombre de protons du noyau qui a fissionné et encore moins son nombre de neutrons.

Pour l'élément 118, le dernier noyau de la chaîne de désintégration n'est pas un isotope connu, et l'on ne peut remonter la chaîne des événements. Dans les deux cas, un important travail de vérification reste donc à faire.

Jean PETER,

Laboratoire de physique corpusculaire, Caen

course en s'implantant dans un détecteur de position. Le compteur de temps de vol permet de distinguer les impacts des produits qui traversent le séparateur et ceux des produits déjà arrivés et qui continuent leur désintégration. À partir de la mesure du temps de vol, on sépare les noyaux lourds (dont certains sont ceux qui nous intéressent) des noyaux légers (sans intérêt), car leur vitesse est très différente. Enfin, le détecteur de position élimine les produits indésirables.

Notre première expérience dura 40 jours, entre novembre et décembre 1998. Nous avons alors observé les signaux de trois désintégrations par fission spontanée, indiquant que trois noyaux qui avaient été synthétisés avaient traversé le séparateur avant de fissionner. Deux d'entre eux avaient une période d'environ une milliseconde : ils étaient dus à la désintégration indésirable d'américium 244. Seul un de ces trois événements correspondait à une implantation dans le détecteur, suivie de trois désintégrations alpha, ayant lieu en un même point dans le détecteur d'implantation.

C'est le signal que nous espérons : les relations entre les énergies de désintégration et les temps de désintégration étaient en accord avec les prédictions théoriques de la désintégration d'un isotope de l'élément 114. Le temps de vol du noyau dévié par les aimants et son énergie d'implantation dans le détecteur étaient également conformes aux prévisions. Au total, la probabilité que cet événement ait résulté d'événements indésirables était inférieure à un pour cent.

La chaîne des désintégrations

L'isotope de l'élément 114 à 175 neutrons a une période de désintégration de l'ordre de 30 secondes. Il engendre l'élément 112, après 15,4 minutes. Ce dernier forme ensuite l'élément 110, qui, après 1,6 minute, se désintègre en l'élément 108. L'isotope de l'élément 108, à 169 neutrons, est hors du domaine de stabilité et se désintègre par fission spontanée après 16,5 minutes.

Par une autre expérience réalisée à Dubna, nous avons également obtenu un isotope plus léger de l'élément 114, qui ne comporte que 173 neutrons, ce qui le situe près du bord de l'îlot de stabilité. Cet isotope plus léger a une période de cinq

secondes environ, au terme de laquelle il subit une désintégration alpha et donne l'élément 112, avec 171 neutrons. Ce dernier se désintègre par fission spontanée en trois minutes.

Par ces expériences, nous avons confirmé l'existence de l'îlot de stabilité et nous commençons à apprécier ses effets. La période de notre isotope de l'élément 114 à 175 neutrons est plus de 1 000 fois supérieure à la période de son isotope à 171 neutrons, qui est produit au cours de la chaîne de désintégrations de l'élément 118, et qui a été découvert au printemps 1999, au Laboratoire Lawrence Livermore, à Berkeley. Notre isotope de l'élément 112 à 173 neutrons est un million de fois plus stable que son isotope à 165 neutrons, découvert à Darmstadt en 1996. Ces périodes relativement longues de nos produits de synthèse par fusion facilitent leur étude, ce qui pourrait modifier notre vision des propriétés fondamentales de la matière.

Entre juin et octobre 1999, nous avons aussi obtenu l'isotope de l'élément 114 à 174 neutrons (nous avons réussi à synthétiser deux atomes). L'observation de la désintégration de cet isotope laisse penser que les éléments superlourds pourraient être encore plus stables que ne le prévoit la théorie. L'étude des limites de la stabilité nucléaire est promise à un grand avenir. En conjuguant leurs efforts, les chercheurs parviendront peut-être même à résoudre, pour l'élément 114, le problème considéré comme le plus délicat du processus de synthèse d'un nouvel élément : lui trouver un nom qui convienne à tous ceux qui ont contribué à sa découverte.

Iouri OGANESSION et Vladimir UTYONKOV sont chercheurs au Laboratoire Flerov des réactions nucléaires à l'Institut de recherche nucléaire de Dubna. KENTON Moody travaille au département de chimie analytique et nucléaire du Laboratoire Lawrence Livermore.

Glenn T. SEABORG et Walter LOVELAND, *Search for the Missing Elements*, in *New Scientist*, vol. 131, n° 1784, p. 29, août 1991.

Transuranium Elements : A Half Century, sous la direction de Lester R. Morss et J. Fuger, American Chemical Society, 1992.

Peter ARMBRUSTER et Fritz Peter HESSBERGER, *La création de nouveaux éléments*, in *Pour la Science*, novembre 1998.

SOS génome : réparation et évolution

TAMARA (FRANÇOIS TADDEI • IVAN MATIC • MIROSLAV RADMAN)

La vie repose sur un équilibre fragile entre stabilité et modification des gènes : conservatisme et mutations excessives nuisent. Des systèmes de mutations activés «à la demande» semblent être la clé de la réussite adaptative des bactéries, qui disposent d'une boîte à outils moléculaires sans cesse plus perfectionnée.

L'évolution, la stratégie première de la vie, est fruit de deux mécanismes indépendants, la mutagenèse, qui produit les mutations sources de variabilité, et la sélection naturelle des individus les mieux adaptés. La théorie néo-darwinienne stipule qu'au sein d'une population il existe une variabilité génétique et que sont sélectionnés les gènes qui ont la plus grande valeur adaptative, c'est-à-dire qui optimisent les chances d'un individu d'avoir une descendance nombreuse.

Avant Darwin, le grand évolutionniste était Lamarck. Selon les propositions de ce dernier, reformulées en termes modernes, la mutagenèse serait dirigée par la pression de sélection de façon à ne créer que des mutations «utiles», concept rejeté par la quasi-totalité des évolutionnistes d'aujourd'hui. Toutefois, en 1988, John Cairns et ses collègues de l'Université Harvard ont ébranlé cette conviction par des expériences qui semblaient montrer que la bactérie *Escherichia coli* était capable de «diriger» les mutations adaptatives qui permettaient sa croissance.

Cette hypothèse lamarckienne, selon laquelle les bactéries seraient capables de transmettre à leur descendance des caractères utiles acquis sous l'effet d'une pression de sélection, a agité la communauté des généticiens. Depuis, l'hypothèse a été invalidée : on a montré que ce que l'on pensait être un événement lamarckien macroscopique n'était en fait que la somme de plusieurs effets darwiniens microscopiques. Quoi qu'il en soit, cette controverse a eu le mérite

incontestable de stimuler les recherches dans le domaine de l'évolution des mécanismes adaptatifs.

Que savons-nous des interactions de l'environnement et de la mutagenèse ? D'une part, les bactéries disposent de nombreux mécanismes de prévention et de réparation des erreurs produites lors de leur reproduction, lorsque l'ADN est recopié par la machinerie cellulaire, et, d'autre part, la plupart des erreurs qui se produisent dans un génome sont neutres ou délétères. On a donc longtemps pensé que le taux de mutation était nécessairement minimal, car tout mécanisme qui engendre des mutations semblait avoir un coût trop élevé face au bénéfice que confèrent les rares mutations favorables. Toutefois, ce taux n'est pas nul, parce que les systèmes qui assurent l'intégrité du génome ont un «coût biologique».

Or, cette assertion d'un taux nécessairement minimal est aujourd'hui rejete

tée : on a montré que un pour cent des bactéries ont naturellement des taux de mutation élevés et que la fréquence des bactéries mutatrices est ainsi 100 fois supérieure à ce qu'elle serait si les bactéries étaient parfaitement adaptées. On a récemment observé qu'un taux de mutation élevé semble favoriser l'évolution, l'adaptation et, par conséquent, la survie des populations de bactéries soumises à un stress ou à une carence (par exemple, à un manque de nutriments). Au début des années 1970, l'un d'entre nous (Miroslav Radman) a montré que les bactéries «décident» de muter, c'est-à-dire qu'un mécanisme génétiquement contrôlé est déclenché quand elles sont soumises à un stress endommageant l'ADN, par exemple les rayonnements.

Nous montrerons, ici, que la mutagenèse n'est plus le mal nécessaire qu'il faut à tout prix minimiser, nous décrirons la boîte à outils des bactéries qui

1. LA BACTERIE MUTATRICE, PREMIERE DE CORDEE : dans ce paysage adaptatif, le degré d'adaptabilité des bactéries a été schématisé. Dans la nature, les bactéries naturellement mutatrices (*en rouge*) sont plus abondantes que si toutes les mutations produites étaient délétères. Une bactérie non mutatrice sauvage (*en bleu*) dans un environnement favorable évolue peu : ses systèmes de réparation de l'ADN sont efficaces, et son génome est scrupuleusement recopié. Au contraire, chez les bactéries mutatrices, les mutations s'accumulent rapidement. Parfois apparaît un mutant favorable, qui est mieux adapté aux conditions environnantes et qui prolifère : il réussit à graver les différents obstacles (la terre, les cailloux, les parois rocheuses), parce qu'il acquiert de nouvelles fonctions qui l'aident à survivre. Au contraire, très peu de bactéries non mutatrices réussissent l'ascension. La bactérie mutatrice la mieux adaptée, la «première de cordée», parvient la première au col le plus élevé. Péniblement, une bactérie non mutatrice y parvient également. Lorsque les conditions sont stabilisées, la bactérie mutatrice continue à accumuler les mutations qui finissent par être fatales : beaucoup d'entre elles meurent. La bactérie non mutatrice mal adaptée aux conditions difficiles de l'ascension retrouve des conditions stables et elle redevient prédominante. Parfois s'échappe une mutatrice encore mieux adaptée : elle s'attaque à une paroi encore plus difficile.

leur sert à réparer les génomes endommagés, et nous verrons que, si l'environnement ne dirige pas les mutations (comme le voudrait la théorie néo-lamarckienne), il peut en augmenter la fréquence, et que les mutations conférant une meilleure adaptation sont alors sélectionnées.

Conservation de l'intégrité du génome

Quelque trois milliards d'années d'évolution sont gravées, généralement sous forme d'ADN (ou d'ARN pour certains virus), dans les séquences d'acides nucléiques (les briques constitutives du génome). La fonction biologique des protéines est sous le contrôle de l'«ADN-mémoire» : la molécule d'ADN est la mémoire moléculaire la plus fiable que l'on connaisse. Au contraire, les protéines sont trop instables pour être le support de l'information génétique. Ainsi, le taux d'erreur dans la synthèse de l'ADN est d'environ un nucléotide sur un milliard (10^{-9}), ce qui est notablement inférieur au taux d'erreur lors de la synthèse des ARN (10^{-5}), laquelle est dix fois plus précise que celle des protéines (10^{-4}).

D'où vient cette stabilité remarquable de l'ADN ? Cette molécule n'est pas une entité chimique particulièrement robuste, et subit sans cesse l'attaque des radicaux libres oxydants, des réactions d'hydrolyse (la molécule perd des bases entières ou des groupes présents sur ces bases, laissant la place à des vides ou à des appariements de bases erronés), ou encore l'assaut d'agents physiques et chimiques de

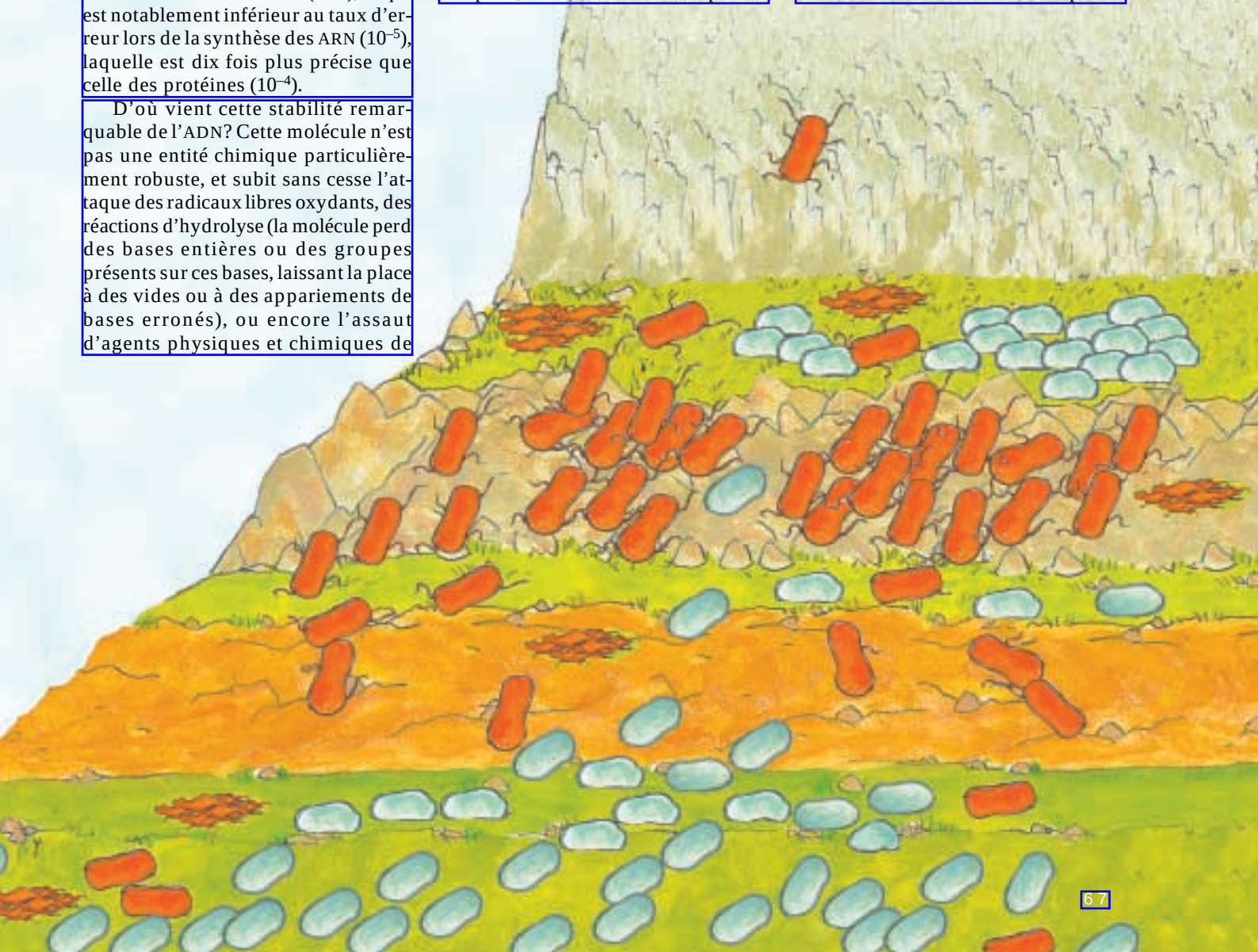
l'environnement. Toutefois, toute une panoplie de protéines a été sélectionnée parce qu'elle garantit la stabilité de l'ADN et, par conséquent, de l'information génétique. Certaines protéines assurent la protection et d'autres la réparation, maintenant la structure de l'ADN contre vents et marées moléculaires. Examinons ces stratégies de prévention et de réparation.

Certains mécanismes interviennent lorsque le brin d'ADN est recopié, d'autres après. L'ADN peut être réparé par élimination des nucléotides qui portent des altérations : le brin d'ADN est alors dégradé, puis resynthétisé. Un autre mécanisme possible est celui de la réparation par recombinaison. Au cours de ce mécanisme, des fragments de chromosomes s'échangent, de sorte que ces appariements et réarrangements réintroduisent parfois dans un chromosome une séquence génique manquante qui aurait été dégradée lors d'un stress environnemental.

Les conditions préparatoires étant remplies, l'ADN doit être recopié. La

copie fidèle n'est possible que si les ingrédients pour la synthèse de l'ADN ont été purifiés. La machine de copie est un dispositif haute fidélité : lors de la division des cellules, l'ADN se dédouble, et chaque brin sert de modèle pour la fabrication d'un brin complémentaire ; l'enzyme ADN polymérase synthétise le nouveau brin en enchaînant les uns aux autres les nucléotides complémentaires de ceux qu'elle rencontre sur le brin modèle (face à un nucléotide qui contient une base adénine, elle en ajoute un qui contient une thymine et, à une guanine, elle adjoint une cytosine, et réciproquement). L'enzyme ADN polymérase recopie les brins d'ADN en fabriquant un «collier» d'oligonucléotides complémentaires de ceux qui constituent les brins simples.

Une autre enzyme, l'exonucléase, s'assure que la copie ne contient pas d'erreurs. Quand elle en détecte, les nucléotides erronés sont retirés. Le taux d'erreur global de la machinerie de copie de l'ADN est de l'ordre de 10^{-7} . Ce taux d'erreur est notablement réduit par les



dispositifs de corrections d'erreurs qui entrent en scène après la réplication.

La copie terminée, un dernier contrôle de qualité est effectué par le système de réparation des mésappariements. Quand la protéine MutS détecte une erreur d'appariement (par exemple, une guanine a été placée en face d'une thymine au lieu d'une cytosine, ou bien une base est restée non appariée), les protéines MutH et MutL viennent à la rescousse (voir la figure 3). Le brin nouvellement synthétisé, que la machinerie de réparation distingue du brin modèle, parce que le degré de méthylation de ce dernier (le nombre de groupes méthyle, $-CH_3$, qu'il contient) est supérieur, est découpé à proximité de l'erreur ; une séquence d'environ 1 000 bases, qui contient l'erreur, est retirée, et la construction d'une nouvelle séquence correcte recommence. Ces étapes successives de surveillance assurent une fiabilité telle qu'un seul nucléotide sur un milliard est mal apparié, ce qui correspond, chez les micro-organismes à ADN, à une mutation pour 300 génomes répliqués.

Pourtant, malgré tous ces mécanismes de prévention des erreurs de copie et de réparation, des fautes se produisent. Or, la survie à long terme des populations naturelles, encore nommées populations sauvages, repose sur leur capacité à s'adapter aux changements imprévisibles de l'environnement, grâce à la variabilité génétique, fondée sur les mutations et les recombinaisons. Comme nous l'avons souligné, on a longtemps admis que les taux de mutation sont aussi faibles que possible ; s'ils ne sont pas nuls c'est en raison du «coût» de tous les mécanismes qui éviteraient ou répareraient totalement les mutations. Or on peut trouver, en laboratoire, des bactéries dont la précision dans la construction de l'ADN est supérieure à 10^{-9} : on en déduit que la nature ne recherche pas la fiabilité maximale.

Ces considérations sur la fiabilité et l'efficacité de la réplication de l'ADN prennent une tout autre dimension quand on relie cette fiabilité aux capacités adaptatives des bactéries. Nous allons montrer que les bactéries favorisées par la sélection naturelle, celles qui réussissent le mieux à s'adapter à des conditions de stress métabolique ou génotoxique (toxique pour le génome), sont celles qui produisent davantage de mutations, celles dont les systèmes de réparation des mutations sont inactifs : le «fatras» gé-

rique qui tend à augmenter le taux de mutation peut alors améliorer l'adaptation au milieu. Dans certaines conditions, l'efficacité serait sélectionnée au détriment de la fidélité génétique. Chez les bactéries, il vaut mieux être approximatif et rapide que précis et lent.

Les mutations aléatoires créent de nouveaux allèles (un allèle est l'une des variantes d'un gène présentes dans une population), tandis que les recombinaisons donnent de nouvelles combinaisons des allèles existants (la recombinaison peut aussi se produire au sein d'un même gène). La plupart des mutations ponctuelles sont délétères ou neutres, très peu sont avantageuses, c'est-à-dire favorables d'un point de vue adaptatif. Chez les bactéries, les mutations délétères sont environ 10 000 fois plus fréquentes que les favorables. Ainsi, pour produire de nouvelles mutations favorables, sans que les mutations délétères soient trop nombreuses dans la même cellule, on peut envisager deux scénarios : un taux de mutation faible dans une large population (le taux de mutation est faible, mais, la population étant nombreuse, les chances de voir apparaître une mutation favorable sont élevées) ou un taux élevé de mutation dans une population plus restreinte : dans ces conditions, les mutations délétères sont nombreuses, mais une mutation favorable a aussi des chances de se produire.

Toutefois, quand le taux de mutation est trop élevé, les quelques mutations intéressantes risquent d'être portées par les organismes qui ont aussi des mutations délétères. Ainsi, pour qu'un mutant adapté (c'est-à-dire ne portant que la mutation favorable) apparaisse, il faut soit que le taux de mutation soit inférieur à une mutation par génome, soit qu'il y ait une recombinaison des génomes mutés : les quelques mutations intéressantes ont ainsi des chances d'être séparées des mutations délétères.

Pour relier l'évolution des taux de mutation chez les bactéries à leur degré d'adaptation, plusieurs expériences ont été réalisées sur l'entérobactérie *Escherichia coli*. Ce sont des bactéries fréquentes et anodines qui résident dans l'intestin des animaux à sang chaud, notamment des mammifères, mais qui deviennent parfois pathogènes. Chez l'homme, elles sont menacées par le système immunitaire et par les antibiotiques, mais aussi, lorsqu'elles sont rejetées dans l'environnement, par les conditions drastiques

auxquelles elles sont exposées. Comme tous les autres parasites, elles satisfont au principe de la Reine rouge : elles ne survivent qu'à condition de «courir» génétiquement plus vite que le système immunitaire de leur hôte, d'une part, et que l'arsenal thérapeutique humain, de l'autre. Or les maladies «émergentes» se multiplient, et les bactéries résistant aux antibiotiques également : les bactéries semblent gagner sur les deux fronts.

Évolution en laboratoire

C'est l'équipe de Richard Lenski, à l'Université du Michigan, qui, depuis plus de dix ans, a commencé l'une des expériences fondatrices de l'«évolution expérimentale» des bactéries, expérience qui a révélé l'amélioration de l'adaptation des bactéries à leur milieu. Ils ont réalisé des cultures de bactéries : la colonie fondatrice a été placée dans 12 tubes dont le contenu a été dilué, tous les jours, depuis dix ans. Les 20 000 générations (voire même davantage) obtenues dans chaque tube ont évolué dans les mêmes conditions de laboratoire, un milieu stable et «non stressant». Cette expérience répond en partie à une question que se posent tous les biologistes de



2. LA REINE ROUGE du roman de Lewis Carroll, *De l'autre côté du miroir*, court sans cesse tout en restant sur place, car le paysage qui l'entoure avance aussi vite qu'elle. Une bactérie

l'évolution : si l'on «rembobinait la cassette de l'évolution», c'est-à-dire si l'on se replaçait dans les conditions de l'apparition de la vie, l'évolution reprendrait-elle le même chemin ?

L'équipe de R. Lenski a constaté qu'une grande partie de l'évolution est reproductible : dans les 12 tubes, les bactéries sont mieux adaptées que leurs ancêtres, c'est-à-dire qu'elles utilisent mieux les ressources. En revanche, l'adaptation n'a pas toujours été la même, certaines voies métaboliques ayant été favorisées dans certaines populations, d'autres dans les autres. On en conclut que l'adaptation au milieu ne cesse de croître, mais que les chemins adaptatifs diffèrent.

Le fait le plus étonnant de cette expérience est que, sur les 12 populations, quatre sont devenues des mutatrices : elles mutent 100 fois plus vite que la population initiale, car elles ont un défaut de leur système de réparation de l'ADN. Cette découverte est contraire aux prévisions de R. Lenski et de ses collègues, qui attendaient un taux de mutation minimal : ils supposaient qu'une fois les bactéries adaptées à leur milieu, le taux de mutation diminuait pour se stabiliser à un niveau faible. Cette expérience montre que, malgré

les innombrables mutations délétères qui se produisent, l'infime proportion de mutations favorables confère un tel avantage au mutateur qu'il prend le dessus sur le reste de la population.

Nous avons fait une simulation informatique de l'expérience de R. Lenski en introduisant tous les paramètres de l'expérience : nous avons trouvé la même proportion de mutateur que notre collègue (25 à 30 pour cent), et montré qu'un mutateur est sélectionné à condition d'avoir accumulé au moins quatre mutations favorables. Dans ce travail effectué en collaboration avec Bernard Godelle, de l'Université de Montpellier, Pierre-Henri Gouyon, à la faculté d'Orsay, Bruno Toupance et John Maynard-Smith, nous avons montré que les taux de mutation augmentent quand les bactéries doivent s'adapter à de nouvelles conditions et qu'ils restent élevés tant que leur adaptation n'est pas achevée.

Par ailleurs, divers mécanismes moléculaires qui assurent une telle augmentation du taux de mutation ont été décrits. On distingue des systèmes mutateurs constitutifs, qui fonctionnent en permanence, des systèmes mutateurs inductibles, qui ne sont activés que dans certaines conditions drastiques, et des sites de contingence, des

«points chauds» dans le génome, qui sont très souvent le siège d'erreurs de réplication. Ces trois dispositifs font partie de la boîte à outils moléculaire des bactéries, où l'on trouve également des mécanismes de transfert et de capture de gènes sur lesquels nous reviendrons.

Les mutateurs chanceux

Dans la nature, les mutateurs constitutifs représentent quelques pour-cent des souches bactériennes. Ils sont dépourvus du mécanisme de contrôle de qualité qui corrige les erreurs de réplication de l'ADN, ce qui a pour conséquence une augmentation des taux de mutation et de recombinaison dans tout le génome. C'est précisément le cas dans l'expérience de R. Lenski. Les gènes responsables de cet effet sont les gènes *mut*. Normalement, ces gènes ont un rôle antimutateur ; quand ils sont mutés, le taux de mutation augmente. Les mutateurs constitutifs ont généralement perdu un allèle fonctionnel de leur système de réparation des mésappariements, par inactivation d'un des gènes *mutS*, *mutL*, *mutU* ou *mutH*.

Lorsque l'on met en compétition, dans le même milieu de culture, deux populations de taille équivalente, l'une de type sauvage et l'autre d'un mutateur *mut*, les mutateurs gagnent inévitablement ; en revanche, le plus souvent, les mutateurs perdent lorsqu'ils sont minoritaires. Néanmoins, des mutateurs apparaissent inévitablement dans les cultures bactériennes, et, parmi eux, certaines bactéries acquièrent une mutation adaptative favorable (elles se développent plus rapidement que les autres) avant d'être elles-mêmes handicapées par des mutations délétères plus fréquentes que chez les bactéries qui se reproduisent plus fidèlement. Les mutateurs «chanceux» se multiplient et deviennent suffisamment nombreux pour qu'il soit de plus en plus improbable que tous dégénèrent en même temps à cause des mutations délétères. Les mutateurs «chanceux», qui portent à la fois les gènes mutateurs et les allèles conférant un meilleur pouvoir d'adaptation, dépassent bientôt en nombre le type sauvage plus lent à s'adapter et finissent par coloniser tout le milieu de culture.

Quand la mutation qui inactive les gènes *mut* est une délétion irréversible, la culture, isolée dans un tube à essai, reste un mutateur durant des années,



Reine rouge (à droite) court également pour échapper aux antibiotiques créés par l'homme et aux agents du système immunitaire. Chacun des acteurs de ce surprenant marathon tente de dépasser les autres, et court aussi vite que possible pour rester immobile. Aujourd'hui, certaines bactéries, par exemple celles qui résistent aux antibiotiques, semblent prendre l'avantage.

quasi indéfiniment. Si ces bactéries se développaient dans la nature, l'une d'elles pourrait acquérir un système de réparation des mésappariements fonctionnel, par échange d'ADN avec des bactéries d'une souche sauvage.

Ce type adapté redeviendrait alors non mutateur et il dépasserait rapidement en nombre le mutateur adapté, car ce dernier continuerait à accumuler des mutations potentiellement dangereuses. Le génotype adapté redevenu non mutateur dépasserait également le type sauvage non mutateur, dont le degré d'adaptation est inférieur à celui du type adapté resté mutateur. Le système de réparation des mésappariements d'un mutateur constitutif peut ainsi être restauré par un transfert horizontal de gènes. Les biologistes de l'évolution ont acquis la certitude que ce phénomène s'est produit plusieurs fois au cours de l'évolution.

Les barrières génétiques entre des espèces bactériennes apparentées disparaissent chez les mutateurs dont le système de réparation des erreurs de réplication est défectueux, car les erreurs de recombinaison génétique ne sont ni repérées ni corrigées ; c'est ce que l'on nomme le phénotype *hyper-rec* des bactéries dont le système de réparation des mésappariements est déficient. Chez les bactéries, les gènes homologues de différentes espèces se recombinent avec une facilité étonnante – on constate même des échanges de larges fractions de génomes entre microbes appa-

rentés –, notamment dans les bactéries dont les gènes *mutS* et *mutL* ont été inactivés. Par ailleurs, en l'absence de ces gènes, le polymorphisme (ou variabilité génétique) augmente, en raison de l'accumulation de mutations. Quand les systèmes de réparation des mésappariements sont restaurés, si la divergence des gènes (le polymorphisme) est trop marquée, les gènes, trop différents, ne s'échangent plus entre espèces bactériennes. Dès lors, on s'interroge : le système de réparation des mésappariements est-il l'un des instruments de l'évolution divergente des bactéries ? Quoi qu'il en soit, le phénotype *hyper-rec* des bactéries mutatrices permet l'apparition de nouveaux génomes mosaïques et, même, de nouveaux gènes mosaïques, sources potentielles de nouvelles activités enzymatiques et de nouveaux métabolites.

Mutateurs inductibles : le système sos

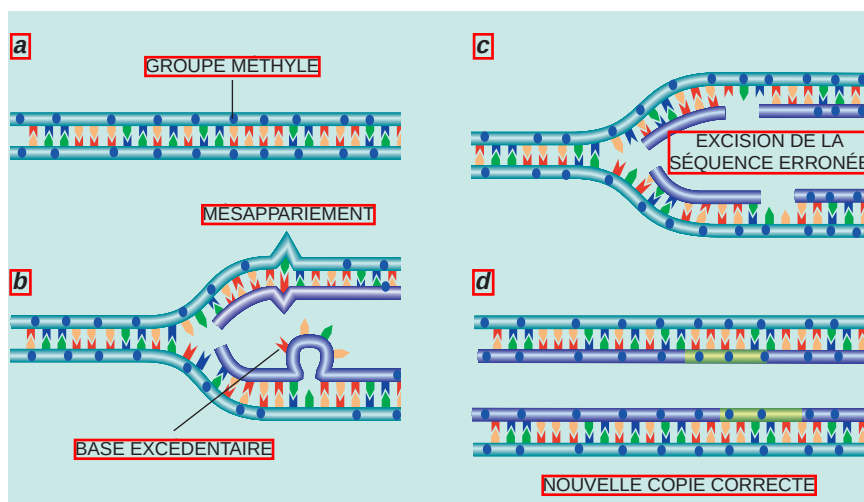
Mutagenèse et degré d'adaptation (également nommée valeur sélective) d'une population sont parfois antinomiques, surtout quand un taux de mutation élevé persiste après l'apparition d'une mutation favorable. Les mutateurs inductibles, c'est-à-dire les bactéries sauvages où les activités mutatrices temporaires sont génétiquement programmées, sont une façon de réduire le coût de la mutagenèse adaptative. Chez ces bactéries, les gènes mutateurs ne sont activés qu'en

réaction à une forte pression de sélection, et ils sont réprimés lorsque cesse le stress ou la carence.

Le système SOS des bactéries est l'exemple type d'un système mutateur inductible : contrairement au système de réparation des mésappariements, il n'intervient qu'en cas de stress notable. Chez ces bactéries, dès que l'ADN est lésé, l'ADN polymérase s'arrête de recopier le génome ; la protéine RecA facilite le clivage la protéine LexA, qui est le frein du système SOS (voir la figure 4). Dès que LexA est clivée (découpée), le système SOS, qui code une vingtaine de protéines, est activé. Les protéines de réparation assure la restauration du génome. Le système SOS contrôle divers gènes de recombinaison (*recA*, *recN*, *recQ*, *ruvA*, *ruvB*) et des enzymes mutases (*UmuC*, *UmuD* et *DinB*) qui favorisent l'accumulation des mutations : quand les bactéries subissent un stress génotoxique ou une carence, des gènes mutateurs normalement inhibés (*umuC*, *umuD* et *dinB*) sont activés. Lorsque le stress disparaît et que les conditions normales sont restaurées, en raison d'une adaptation génétique ou d'une modification favorable de l'environnement, les activités des gènes mutateurs et des gènes de recombinaison sont réduites.

Ces mutases sont des ADN polymérases très particulières : elles assurent la réplication de l'ADN, mais font beaucoup d'erreurs d'appariements des bases. Elles autorisent que des brins qui portent des lésions soient recopiés, permettant ainsi la survie de la bactérie (une ADN polymérase « normale » s'arrête dès qu'elle rencontre un brin endommagé). Cependant, comme elles augmentent le taux d'erreur, même en l'absence de lésions exogènes, le taux de mutation croît. Ces polymérases peu fiables ont vraisemblablement été sélectionnées pour permettre aux bactéries, d'une part, de faire face aux lésions, mais aussi, d'autre part, de produire, en cas de stress ou de carence, de nombreuses mutations, dont certaines ont une chance d'être adaptatives.

Ainsi, la sélection naturelle favoriserait une augmentation du taux de mutation lorsque les conditions ne sont plus favorables à la croissance. Si l'environnement ne semble pas diriger les mutations, il peut en augmenter la fréquence dans des situations de stress, même en l'absence de lésions exogènes de l'ADN : plus d'une souche bactérienne sur deux, isolée dans la nature, serait un mutateur inductible.



3. LE SYSTEME DE RÉPARATION DES MESAPPARIEMENTS garantit que les brins d'ADN recopiés par la machinerie cellulaire des bactéries ne comporte pas d'erreurs. Lorsque les brins d'ADN modèles, caractérisés par les groupes méthyle qu'ils portent (a), sont recopiés, il se produit parfois des erreurs d'appariement : par exemple une adénine est placée face à une cytosine, ou des bases excédentaires sont introduites dans la séquence (b). La protéine de réparation MutS détecte l'erreur, active les protéines MutL et MutH et des enzymes qui découpent les zones lésées (c). La copie des brins erronés reprend et l'on obtient deux doubles brins corrects qui sont progressivement méthylés, comme les brins d'origine.

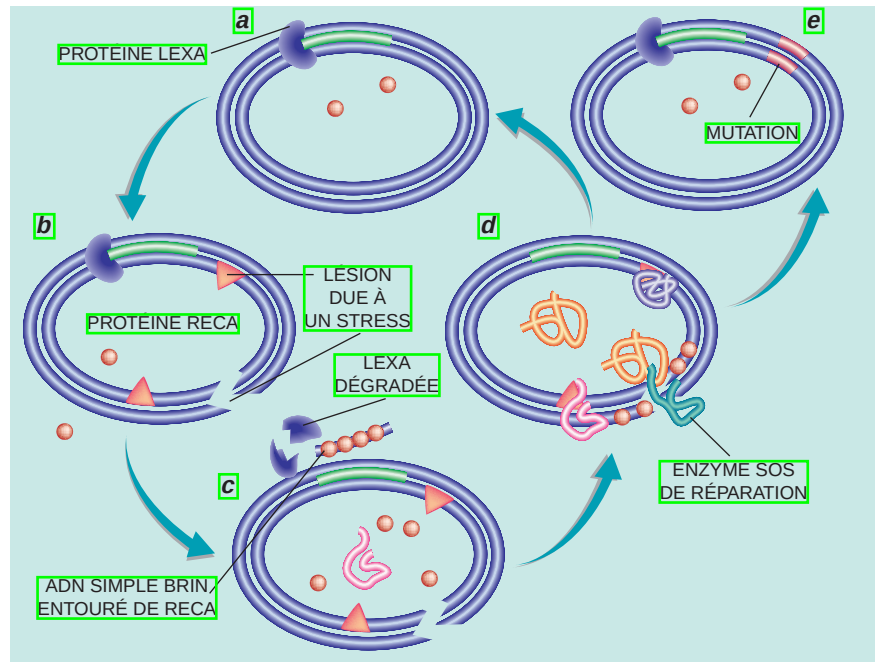
Les sites de contingence

Les événements de mutation sont particulièrement nombreux dans certaines régions du génome nommées locus ou sites de contingence. Certains pathogènes, tels les parasites et les bactéries, ont des groupes de gènes hypermutables qui, généralement, codent des molécules de surface que reconnaît le système immunitaire. Ces séquences hypermutables, les sites de contingence, permettent aux agents pathogènes de tirer parti de l'environnement tout en augmentant leur degré d'adaptation. La recombinaison, au sein d'un même génome ou entre génomes différents, augmente encore la probabilité qu'apparaissent des variants dont les antigènes de surface diffèrent.

Ces stratégies qui produisent de la variabilité génétique ont été adoptées par de nombreux parasites et par les bactéries, qui augmentent ainsi la diversité de leurs antigènes de surface : de cette façon, ces micro-organismes échappent au système immunitaire de l'hôte. Pour rendre leurs gènes hypermutables lorsque la pression de sélection est élevée, ils utilisent un stratagème qui a probablement été sélectionné par une alternance de pressions de sélection qui favorisaient l'expression des protéines de surface ou qui s'y opposaient. Dans les gènes codant ces protéines ou dans les régions situées en amont (dites promotrices) des motifs simples sont répétés ; ils sont constitués de séquences d'ADN courtes (de une à cinq paires de bases). Lorsque ces séquences courtes répétées sont recopiées, les ADN polymérases piétinent devant cette accumulation de motifs identiques, et se trompent.

Ces erreurs dues au glissement de la polymérase sont jusqu'à 10 000 fois plus probables qu'une substitution de bases, mais elles sont très bien corrigées par le système de réparation des mésappariements. Dans les souches sauvages, mais surtout dans les mutateurs dépourvus de système de réparation des mésappariements, ces séquences répétées augmentent les risques d'une mutation qui décale le cadre de lecture des gènes codant les antigènes de surface, de sorte que les protéines produites sont tronquées, ou qui modifie l'expression des gènes (voir la figure 5).

La longueur des motifs qui sont répétés dans les sites de contingence diffère d'une espèce de bactéries à une autre : courts chez *Helicobacter pilori* et *Myco-*



4. LE SYSTÈME SOS aide les bactéries à survivre aux lésions de l'ADN. Normalement, ce système est inhibé par la protéine LexA (a). En cas de stress (b), l'ADN est lésé, la protéine RecA est activée et forme un filament autour des brins simples d'ADN libérés lors de la dégradation ; cet ensemble dégrade la protéine LexA dont le rôle répresseur cesse (c). L'inhibition du système SOS est levée, et des enzymes de réparation commencent à être synthétisées. Certaines lésions (en orange) sont réparées : les délétions sont comblées et les bases endommagées remplacées (d). Quand la réparation est complète, la bactérie est identique à la bactérie d'origine et le système SOS est à nouveau mis au repos par la protéine LexA. Certaines lésions (en rouge, e) peuvent être transformées en mutations ; elles donnent alors naissance à de nouvelles protéines potentiellement avantageuses. Le système SOS confère temporairement une aptitude supérieure à la normale à réparer l'ADN endommagé, mais aussi à muter. Parce qu'il ne répare pas toutes les lésions fidèlement, et qu'il active des polymérases peu fidèles, il augmente la variabilité génétique.

plasma genitalium, ils sont plus longs chez *Neisseria gonorrhoeae* et *Haemophilus influenzae*. Notons qu'*Helicobacter* et *Mycoplasma* sont dépourvues d'un système de réparation des mésappariements classique. Étant donné la spécificité des systèmes de réparation des mésappariements chez les bactéries (réparation très efficace d'une ou de deux bases mal appariées, mais peu ou pas de réparation de plus de trois paires mal appariées) et étant donné le fait que l'ADN polymérase est d'autant plus infidèle que la séquence répétée est courte, on peut se demander si le taux de mutation des séquences répétées dans les sites de contingence n'a pas été optimisé.

Ces sites de contingence sont des «points chauds» de mutation et ils permettent de passer rapidement d'une population de bactéries qui expriment une protéine de surface particulière, ce qui peut être avantageux dans un environnement donné, à un variant qui ne l'exprime pas, ce qui serait intéressant pour la bactérie si les anticorps de l'hôte reconnaissent ses antigènes. Ces points chauds de muta-

tion agissent donc comme des «interrupteurs génétiques».

Ainsi, en plus des mutateurs qui modifient le taux de mutation de l'ensemble du génome et qui sont des mutateurs généralisés à tout le génome, tels le système de réparation des mésappariements – constitutif et généralisé – et le système SOS – inductible et généralisé –, des mutateurs localisés ne touchent qu'une partie du génome : les sites de contingence sont des mutateurs constitutifs localisés ; certains types de recombinaison qui permettent l'intégration ou la transposition de séquences d'ADN, grâce à des enzymes spécifiques, sont des mutateurs inductibles localisés. Ce type de mutations ciblées sur des gènes spécifiques ou sur certaines séquences représente encore un progrès vers l'optimisation du prix à payer pour la production de mutations favorables dans les gènes de contingence. Ces mécanismes moléculaires permettent l'émergence d'agents pathogènes qui présentent des antigènes modifiés que les anticorps ne reconnaissent pas.

Ces agents pathogènes, qui exploitent les failles du système immunitaire, sélectionnent alors des mécanismes moléculaires qui engendrent, chez l'hôte, un nouveau répertoire d'anticorps. Citons à nouveau la Reine rouge, «pour rester au même endroit, il faut courir aussi vite que possible». Et la course continue, sans interruption : les pressions de sélection varient avec le temps, obligeant micro-organismes et systèmes immunitaires à évoluer en permanence. Le devenir d'un système qui engendre de la variabilité génétique est vraisemblablement lié à l'intensité des pressions de sélection qu'il subit. Si les points chauds de mutation jouent un rôle notable dans la genèse de mutations, lorsque la pression de sélection est récurrente, ils ne sont pas associés aux mécanismes d'acquisition d'une résistance aux antibiotiques, laquelle ne peut survenir qu'en raison d'une mutation ponctuelle ou du transfert horizontal d'un gène de résistance.

Une autre façon d'accélérer la vitesse d'évolution consiste à augmenter les échanges génétiques, ce qui permet le transfert de fonctions préalablement sélectionnées. Ainsi, les bactéries peu-

vent acquérir des séquences chromosomiques portant un gène de résistance d'une autre souche d'autant plus facilement que le système de réparation des mésappariements est inactivé, de façon transitoire ou permanente. Toutefois, les gènes de résistance sont souvent portés par des plasmides (des «minichromosomes» circulaires qui peuvent se propager d'une bactérie à une autre) et des transposons (des éléments mobiles qui «sautent» d'un génome à un autre).

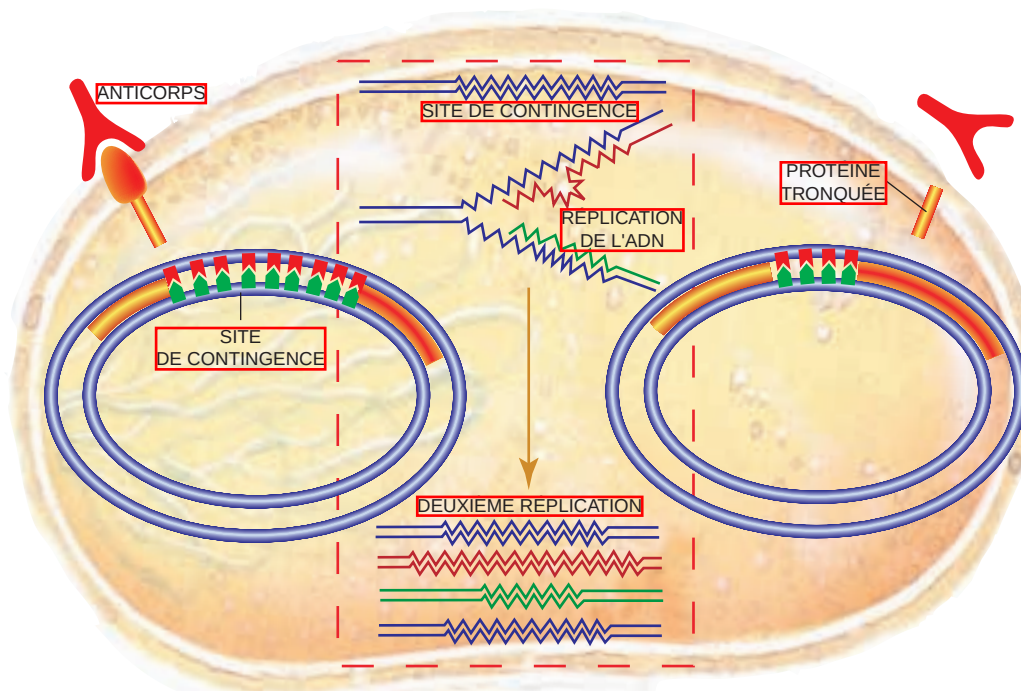
Évolution et résistance aux antibiotiques

Ces éléments mobiles que l'on qualifie souvent d'égoïstes ou de parasites, cherchent à optimiser leur survie, même au détriment du reste du génome. Ainsi, un prophage (un ADN de virus intégré à un chromosome bactérien) peut quitter une bactérie hôte dont la survie est menacée ; il entraîne la lyse. Ce type de comportement égoïste est fréquent, surtout pour les gènes portés par les plasmides et les transposons. Lors d'un stress, un plasmide peut survivre à son hôte en

quittant le navire bactérien ; il est alors transféré à d'autres bactéries, qui expriment les gènes qu'il contient. De plus, au cours d'un stress, on constate une augmentation de la mobilité des éléments transposables et une augmentation du transfert des plasmides. Ces mécanismes ne semblent pas dirigés par la pression de sélection que subit la bactérie, mais correspondraient à une réaction sélectionnée par l'évolution pour augmenter la survie des ADN parasites. Or ces éléments transférables portent souvent des gènes qui permettent aux bactéries de résister aux antibiotiques.

Normalement les antibiotiques agissent en inhibant la transcription de l'ADN bactérien en ARN, ou en empêchant la fabrication des protéines bactériennes, ou encore celle de la paroi des nouvelles bactéries, qui se vident alors de leur contenu. Toutefois, les bactéries ont acquis divers moyens de contrecarrer ces actions : certaines produisent des usines à protéines (les ribosomes) que les antibiotiques ne reconnaissent pas et, par conséquent, n'inactivent pas ; certaines enzymes bactériennes inactivent les antibiotiques ; certains canaux qui permettent normalement aux antibiotiques de pénétrer dans les bactéries restent obturés ; enfin, des «pompes» refoulent vers l'extérieur tout antibiotique qui aurait réussi à pénétrer dans la bactérie (voir la figure 6).

Ces résistances sont acquises par des mutations qui se transmettent ensuite «verticalement» d'une génération à la suivante, tandis que les plasmides peuvent non seulement se transmettre «verticalement» comme les chromosomes, mais aussi «horizontalement», en passant d'une bactérie donatrice à une bactérie réceptrice. Les plasmides se multiplient au même rythme que le chromosome bactérien et sont transférés à toute la descendance des bactéries qui les portent. Quand une bactérie est résistante en raison d'un gène plasmidique, toute sa descendance est résistante. De surcroît, les plasmides de résistance peuvent être transférés horizontalement à d'autres espèces de bactéries. Ainsi, les plasmides favorisent la dissémination de la résistance. Ces transmissions de gènes sont d'autant plus redoutables que les plasmides portent souvent plusieurs gènes de résistance, notamment des gènes codant des enzymes qui inactivent les antibiotiques. La multirésistance portée par les plasmides est



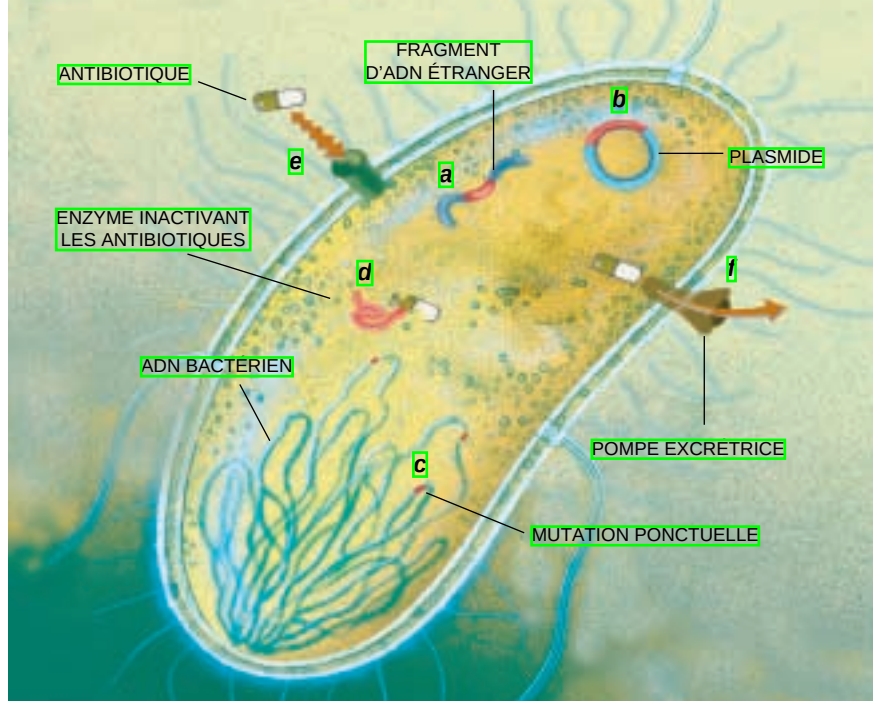
5. LES SITES DE CONTINGENCE sont constitués de séquences répétées, par exemple de paires adénine-thymine (en vert et rouge). Quand l'ADN polymérase recopie les gènes qui contiennent de telles séquences, elle trébuche et se trompe (au centre) : les séquences répétées (le zigzag vert et le rouge dans le cadre en pointillés) sont soit trop longues (en rouge), soit trop courtes (en vert). Après une deuxième réplication de l'ADN, les bactéries qui héritent de l'ADN identique à l'ADN initial produisent des protéines fonctionnelles. Au contraire, les bactéries qui ont des séquences répétées trop longues ou trop courtes codent des protéines tronquées. Ces protéines sont souvent des antigènes de surface : quand elles sont tronquées, le système immunitaire de la personne infectée ne les reconnaît pas. Les sites de contingency sont une des ruses utilisées par les bactéries pour déjouer les défenses immunitaires.

souvent due à des éléments génétiques nommés intégrons qui permettent l'intégration de plusieurs gènes de résistance (ou cassettes) sous le contrôle d'un même promoteur.

À nouveau, les bactéries ont «bricolé» avec les outils dont elles disposaient ou qu'elles ont acquis. Didier Mazel, de l'Institut Pasteur, et Julian Davies, de l'Université de Vancouver, ont montré que des bactéries *Vibrio* conservées depuis l'«ère pré-antibiotique» étaient déjà pourvues d'un système d'intégrons. En revanche, *Escherichia coli* en était dépourvue et l'a donc acquis par transfert horizontal en raison de la pression de sélection imposée par l'homme (par l'intermédiaire des antibiotiques). Les bactéries acquièrent et amplifient certaines fonctions, et leur boîte à outils moléculaires évolue ; les intégrons et les plasmides se sont propagés avec les gènes de résistance aux antibiotiques qu'ils ont contribué à rassembler et à disséminer.

L'évolution de cette boîte à outils a des conséquences graves en termes de santé publique : on peut craindre qu'en raison de cet arsenal, les bactéries soient de mieux en mieux préparées pour échapper aux antibiotiques, et que les nouveaux antibiotiques aient une «espérance de vie» (le temps que mettraient des bactéries résistantes à apparaître et à se propager) notablement inférieure à celle des premiers antibiotiques.

Les bactéries ne sont pas les seules cellules à subir une mutagenèse qui leur est favorable, mais qui est défavorable pour l'homme. Ainsi, des mutations favorisent l'adaptation des cellules tumorales au détriment de l'homme, même si, contrairement aux bactéries, elles sont vouées à l'extinction. Ces cellules égoïstes se multiplient aux dépens des autres cellules, s'adaptant aux conditions environnantes tout en diminuant la valeur adaptative de l'individu. Étant donné que bactéries pathogènes et cellules cancéreuses sont soumises à des pressions de sélection qui se ressemblent, on s'interroge : utilisent-elles les mêmes stratégies ? Quasi toutes les cellules tumorales sont instables génétiquement ; on observe soit des instabilités chromosomiques, soit des taux de mutation élevés. Dans de nombreux cancers (notamment dans les cas familiaux de cancer du colon), on observe une instabilité des séquences microsatellites ; on a montré que cette prédispo-



6. LA RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES s'acquiert de diverses façons. Les bactéries peuvent «absorber» de l'ADN libre qui contient éventuellement des gènes de résistance (a). Les plasmides (de l'ADN circulaire) contiennent très souvent de tels gènes ; ils sont transférables d'une bactérie à une autre (b). Des mutations ponctuelles (c) sont parfois favorables aux bactéries. Les mutations ou les gènes acquis par transfert ont diverses conséquences : de nouvelles enzymes qui inactivent les antibiotiques sont synthétisées (d) ; les pores qui laissent pénétrer les antibiotiques sont obturés (e), de sorte que la substance pharmacologique ne pénètre plus dans la bactérie ; ou encore des «pompes» membranaires (f) expulsent les antibiotiques dès qu'ils pénètrent dans la bactérie.

sition familiale au cancer était due à un défaut du système de réparation des mésappariements. Ce sont les gènes humains homologues des gènes *mutS* et *mutL* bactériens qui sont responsables de ces cancers. Une fois encore, l'étude des mécanismes moléculaires fondamentaux a des conséquences inattendues et cruciales pour la compréhension des pathologies humaines.

Les bactéries sont-elles des «bricoleurs malades» qui font d'innombrables erreurs et qui ne les réparent pas, car cela leur «coûterait» trop cher, ou des ingénieurs en génie génétique qui ont «décidé» de faire des erreurs, et acquis au cours de l'évolution des stratégies de survie et d'adaptation dont on n'a pas encore mesuré

tout le degré d'élaboration ? À chaque fois qu'une stratégie adaptative est sélectionnée, la boîte à outils moléculaires des bactéries est encore améliorée. Les mutateurs, loin d'être des bactéries représentant des culs-de-sac de l'évolution, en sont au contraire des éléments clés. En combinant les différents outils de la boîte, les bactéries acquièrent des compétences nouvelles, qui leur permettent de «courir» toujours plus vite et de s'adapter à de nouveaux environnements. La Reine rouge affirme que, pour avancer, il faut courir au moins deux fois plus vite que les autres. La médecine rattrapera-t-elle les pathogènes dont on avait espéré qu'ils seraient définitivement distancés par les antibiotiques et les vaccins ?

François TADDEI, ingénieur du génie rural des eaux et forêts, détaché à l'INSERM, et Ivan MATIC, chercheur au CNRS, mènent leurs recherches dans le Laboratoire de génétique moléculaire évolutive et médicale dirigé par Miroslav RADMAN, à la Faculté de médecine Necker-Enfants malades - Université Paris V.

M. RADMAN et R. WAGNER, *La réplication de l'ADN : un mécanisme «haute fidélité»*, in *Pour la Science*, n° 132, octobre 1988.
F. TADDEI et al., *Mutagenèse et adaptation*, in *Médecine/Sciences*, n° 3, vol. 13, mars 1997.

I. MATIC et al., *Highly Variable Mutation Rates in Comensal and Pathogenic E. coli*, in *Science*, n° 277, pp. 1833-1834, 1997.

R. MOXON et al., *ADN et évolution*, in *Pour la Science*, n° 255, pp. 84-89, mars 1999.

M. VULIC et al., *Mutation, Recombination, and Incipient Speciation of Bacteria in the Laboratory*, in *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 96, pp. 7348-7351, 1999.

M. RADMAN et al., *Evolution of Evolvability*, in *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, vol. n° 870, pp. 146-155, 1999.

Autrefois, nous n'étions pas seuls

IAN TATTERSALL • JAY MATTERNES

Homo sapiens est aujourd'hui le seul hominidé sur la Terre. Pourtant, pendant au moins quatre millions d'années, de nombreuses espèces d'hominidés se sont partagé la planète. Pourquoi nos cousins ont-ils disparu ?

Homo sapiens est le seul hominidé sur Terre depuis 25 000 ans environ. Nous nous sommes habitués à notre particularité, au point que, dans les années 1950 et 1960, certains anthropologues pensaient que les espèces d'hominidés s'étaient succédé, sans jamais coexister. Cette hypothèse de «l'espèce unique» supposait qu'il n'y avait pas de place écologique pour plusieurs espèces dotées de culture sur notre planète. Elle n'a jamais été très convaincante, même quand on disposait de trop peu de fossiles pour la tester. Cependant, elle proposait une histoire séduisante : un hominidé ancestral, voûté et plongé dans les ténèbres de l'ignorance, se serait lentement transformé en *Homo sapiens* moderne, élégant et intelligent. Comme dans les contes de fées, le crapaud se serait transformé en prince charmant.

L'hypothèse ne fut abandonnée que vers la fin des années 1970, parce que les paléontologues avaient découvert des fossiles qui prouvaient que plusieurs espèces d'hominidés avaient coexisté, il y environ 1,8 million d'années, dans le nord du Kenya. Malgré tout, les paléontologues ont continué leur interprétation «minimaliste» des fossiles : ils n'admettaient qu'un petit nombre d'espèces, attribuant des fossiles nettement différents à une «espèce unique et vague, telle qu'*Homo sapiens* archaïque». Pour-

quoi oubliaient-ils que de nombreuses espèces d'hominidés avaient pu coexister pendant la préhistoire ?

Malgré la persistance de cette conception minimaliste, des découvertes récentes et le réexamen de fossiles montrent que l'histoire biologique des hominidés ressemble à celle de la plupart des autres familles animales : elle a été buissonnante et non linéaire. Plusieurs espèces d'hominidés sont apparues, ont coexisté, puis ont disparu, mais pas *Homo sapiens*, qui reste seul aujourd'hui. Pourquoi ? Les paléontologues l'ignorent. Cependant, l'analyse de la coexistence des derniers

hominidés (*Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis*) dans deux régions du Globe fait apparaître des différences intrigantes qui éclairent la question.

Une ribambelle d'espèces

Nous avons des preuves de la diversité des hominidés depuis le début de leur histoire évolutive, c'est-à-dire depuis que ces bipèdes (des australopithèques) se sont timidement aventurés à l'extérieur de la forêt. La plus ancienne espèce connue, susceptible d'avoir appartenu à la famille des hominidés, est *Ardipithecus ramidus*

1. IL Y A 1,8 MILLION D'ANNEES, plusieurs espèces d'hominidés se partageaient le Nord du Kenya. Avaient-elles des contacts ? De quelle nature ? Les paléontologues savent seulement que *Paranthropus boisei*, *Homo habilis* et *Homo ergaster* vivaient dans la même région, autour du lac Turkana.

Peintures de Jay Matternes



(voir la figure 3) : on le connaît par quelques fragments de fossiles qui datent de 4,4 millions d'années, et qui ont été découverts sur le site d'Aramis, en Éthiopie. L'analyse des fossiles semble indiquer qu'il marchait en position verticale, mais, à de nombreux points de vue, il ressemblait beaucoup à un singe. Un tout petit peu plus récent, *Australopithecus anamensis* est mieux connu, par des fossiles qui datent de 4,2 millions d'années, trouvés dans plusieurs sites du Nord du Kenya. D'apparence moins simienne,

il ressemblait déjà à son cousin plus récent, *Australopithecus afarensis*, au petit cerveau et à la face développée (c'est-à-dire au système masticateur puissant), qui vécut il y a 3,8 à 3 millions d'années. La fameuse Lucy appartient à cette espèce. D'après le réexamen de restes attribués à *Australopithecus afarensis* provenant de sites dispersés en Afrique de l'Est, on suppose qu'ils appartiennent à plusieurs espèces différentes. Quoi qu'il en soit, *Australopithecus afarensis* n'était pas le seul hominidé d'Afrique : récemment, on

a découvert, au Tchad, une mâchoire d'*Australopithecus bahrelghazal*. Elle date de 3,5 à 3 millions d'années, comme le squelette de Lucy.

En Afrique du Sud, des paléontologues viennent de trouver les restes d'une autre espèce d'hominidés primitifs, qui vivait il y a 3,3 millions d'années. Elle n'est encore ni nommée ni décrite. *Australopithecus africanus* habitait la même région, il y a trois millions d'années (les premiers fossiles d'australopithèque, découverts en 1924, appartenaient à cette espèce). Il n'a pas



PARANTHROPUS BOISEI avait un crâne à fortes crêtes osseuses, adaptées aux muscles puissants de son système masticatoire. Sa grande mâchoire, équipée d'énormes molaires, indique qu'il était végétarien.



HOMO ERGASTER avait le crâne haut et arrondi. D'après la régression de ses dents masticatrices (prémolaires et molaires), il mangeait de la viande. «L'Adolescent du Turkana», de 1,6 million d'années, est de cette espèce.



HOMO HABILIS («l'homme habile») tient son nom des outils de pierre découverts dans les gorges d'Olduvai, en Tanzanie, qu'il aurait fabriqués. Cet hominidé façonnait des éclats tranchants en tapant sur un galet avec un autre.





HOMO RUDOLFENSIS avait un crâne et un cerveau plus gros que ceux d'*Homo habilis*, dont il est contemporain.



HOMO NEANDERTALENSIS a coexisté en Europe et au Proche-Orient avec les hominidés anatomiquement modernes.



HOMO ERECTUS a peut-être aussi coexisté avec les hominidés anatomiquement modernes. Il vivait à Java.

persisté plus d'un million d'années. Une autre espèce, récemment nommée *Australopithecus garhi*, vivait en Éthiopie il y a 2,5 millions d'années. Elle serait intermédiaire entre *Australopithecus afarensis* et un vaste groupe incluant les australopithèques plus récents et les espèces du genre *Homo*. L'espèce la plus primitive du groupe des australopithèques «robustes», *Paranthropus aethiopicus*, vivait presque à la même époque. Les paléontologues la connaissent principalement grâce au «crâne noir» vieux de 2,5 millions d'années, trouvé dans le Nord du Kenya. Il y a 2 à 1,4 millions d'années, les australopithèques robustes *Paranthropus boisei* habitaient toute l'Afrique de l'Est. En Afrique du Sud, il y a 1,6 million d'années, les australopithèques robustes étaient des *Paranthropus robustus* et, peut-être aussi, des *Paranthropus crassidens*, étroitement apparentés aux premiers.

Cette liste déjà longue est pourtant incomplète. Nous ignorons la longévité de chaque espèce. Même si chacune n'a vécu que quelques centaines de milliers d'années, le continent africain fut peuplé de plusieurs espèces, au moins périodiquement (et probablement de façon continue), dès le début de l'évolution des hominidés.

L'apparition du genre *Homo*, il y a 2,5 à 1,8 millions d'années, ne changea rien à cette situation. Les fossiles *Homo* les plus anciens, découverts en Afrique de l'Est et du Sud, forment un ensemble disparate ; on les a attribués aux deux espèces *Homo habilis* et *Homo rudolfensis*, mais certains pourraient appartenir à d'autres espèces que ces deux-là. Il y a 1,9 à 1,8 million d'années, à l'Est du lac Turkana (Kenya), ces deux espèces

furent rejointes par l'espèce *Paranthropus boisei*, largement présente en Afrique, et aussi par *Homo ergaster*, le premier hominidé à la silhouette moderne. Ainsi, au moins quatre espèces d'hominidés partageaient le même continent et, aussi, le même environnement (voir la figure 1).

Le premier exode des hominidés hors d'Afrique par *Homo ergaster* ou par une espèce très proche provoqua une diversification plus poussée que celle qui s'était produite jusqu'alors. Les paléontologues cherchent à mieux connaître ce mouvement de population et, notamment, sa date, mais ils pensent qu'il y a 1,8 million d'années des hominidés avaient déjà atteint la Chine et Java. Une mandibule qui daterait de cette époque, retrouvée à Dmanisi, en Géorgie, se distingue nettement de tout ce qu'on avait trouvé précédemment (voir *Les premiers exodes*, par Ian Tattersall, *Pour la Science*, juin 1997). Il y a un million d'années, *Homo erectus* était établi à Java et en Chine. Une espèce d'hominidé plus robuste était peut-être aussi présente à Java. À l'autre bout du continent eurasiatique, les hominidés européens les plus anciens (ils vivaient il y a 800 000 ans environ) diffèrent des précédents. Les paléontologues espagnols qui les ont découverts les ont attribués à une espèce particulière, qu'ils ont nommée *Homo antecessor*.

En Afrique, *Homo heidelbergensis* apparaît il y a 600 000 ans. Il y a 500 000 à 200 000 ans, cette espèce était aussi présente en Europe et peut-être en Chine. Quand les paléontologues connaîtront mieux *Homo heidelbergensis*, ils découvriront certainement que ces fossiles appartiennent en fait à plusieurs espèces. En Europe, *Homo heidelbergensis* ou

l'un de ses cousins, a engendré un groupe endémique d'hominidés, dont le représentant le mieux connu est *Homo neanderthalensis*. Cette espèce, aussi présente au Proche-Orient, a prospéré il y a 200 000 à 30 000 ans. À la même époque, les hominidés africains y ont évolué de façon indépendante, notamment en *Homo sapiens*. À Java, sur le site de Ngandong, des fossiles probablement d'*Homo erectus* viennent d'être datés de 40 000 ans, ce qui signifie que cette région a été le cadre d'une évolution différente, peut-être pendant des millions d'années.

Cette rapide description s'éloigne beaucoup de la théorie qui prévalait il y a 40 ans et qui stipulait qu'*Australopithecus africanus* avait engendré *Homo erectus*, qui avait engendré *Homo sapiens*. La rénovation résulte évidemment des découvertes de fossiles effectuées au cours des dernières décennies. Cependant, la généalogie linéaire est une impasse qui pèse toujours lourdement sur la paléontologie. Nombre de mes collègues supposent que ma description surestime la diversité des espèces d'hominidés ; ils simplifient souvent le tableau, généralement en regroupant tous les types d'*Homo* du dernier million d'années, voire des deux derniers, dans la même espèce *Homo sapiens*.

Selon moi, en revanche, au moins 20 espèces d'hominidés ont existé (je les ai évoquées précédemment, à défaut de les avoir toutes citées). En effet, l'ensemble des fossiles d'hominidés comporte de nombreuses indications morphologiques de diversité que la phylogénèse classique ne prend pas en compte. De plus, on a probablement pas encore découvert toutes les espèces d'hominidés. Même si c'était le cas,

l'histoire de l'évolution humaine n'est pas la progression régulière d'un héros solitaire, mais plutôt une série d'apparitions et d'extinctions d'espèces, avec des phases d'expansion et de réduction des populations, comme pour n'importe quel groupe animal ou végétal. Pendant les cinq derniers millions d'années, de nouvelles espèces d'hominidés sont régulièrement apparues, ont coexisté, ont interagi, ont colonisé de nouveaux environnements et ont perduré ou ont disparu. Nous n'avons qu'une très vague idée de la manière dont cette histoire s'est déroulée, mais nous sommes sûrs que notre espèce, loin d'être le point culminant de l'évolution linéaire des hominidés, n'est que l'une des ramifications de leur arbre évolutif.

Les racines de notre solitude

Si *Homo sapiens* a autrefois partagé la Terre avec ses cousins hominidés, il est le seul qui n'ait pas disparu. Pourquoi? Sans doute parce que nos interactions avec notre environnement ont assuré notre survie. Ces interactions résultent de nos comportements, dont

les traces sont les objets archéologiques. Les plus anciens de ces objets datent d'il y a 2,5 millions d'années. Ce sont les premiers outils : de simples éclats tranchants, taillés dans une pierre plus grosse, probablement par des australopithèques.

Cette innovation représente un progrès cognitif, et ses conséquences furent durables. Elle marque le début d'une série d'avancées techniques. La suivante fut le biface, inventée un million d'années plus tard, probablement par *Homo ergaster*. Cet outil symétrique, taillé dans la pierre, fut le premier à se conformer à un «modèle mental» de celui qui le fabriquait. Ce modèle n'a pas changé pendant un million d'années, jusqu'à l'invention d'une technique de préparation des blocs de pierre par *Homo heidelbergensis* ou l'un de ses proches cousins. Ces blocs étaient façonnés de sorte qu'un seul coup suffise à les débiter pour obtenir un outil fini.

Les plus habiles à cette technique furent les Néandertaliens, au gros cerveau, à la face puissante et au crâne bas, qui occupèrent l'Europe et le Proche-Orient jusqu'à ce qu'ils disparaissent,

il y a 30 000 ans. Ils ont laissé de nombreuses traces, de même qu'*Homo sapiens*, qui les a brusquement remplacés. La comparaison des deux espèces fait apparaître la spécificité d'*Homo sapiens*.

Les Néandertaliens, qui taillaient la pierre avec une impressionnante habileté, bien que de façon assez stéréotypée, fabriquaient rarement (ou pas du tout) des outils à partir d'autres matériaux durables. De plus, beaucoup d'archéologues supposent que leurs techniques de chasse étaient rudimentaires. Les premiers travaux sur cette espèce mentionnaient l'existence d'un étrange «culte des ours» et d'autres rituels. Toutefois, on n'a pas retrouvé d'indice convaincant d'un comportement symbolique ni de la production d'objets symboliques avant la rencontre des Néandertaliens avec *Homo sapiens*. L'inhumation occasionnelle des morts évitait peut-être seulement que les hyènes n'entrent dans les campements, et les tombes ne renfermaient aucun objet témoignant d'un rituel ou d'une croyance dans l'au-delà. Autrement dit, les Néandertaliens, bien qu'assez évolués à de nombreux points



2. IL Y A 11 000 A 13 000 ANS, des *Homo sapiens* (ou hommes de Cro-Magnon) ont sculpté de petits bisons d'argile et les ont placés dans la grotte du Tuc-d'Audoubert (dans les Pyrénées), à plus de un kilomètre de l'entrée.

de vue, ont survécu à plusieurs glaciations, mais ils n'avaient pas l'étincelle de créativité qui a finalement donné l'avantage à *Homo sapiens*.

L'origine d'*Homo sapiens* reste débattue. Il semble né en Afrique, il y a 200 000 à 150 000 ans. Toutefois, les comportements modernes sont apparus beaucoup plus tard. Il y a 200 000 ans, *Homo neandertalensis* vivait déjà en Israël et dans les environs. *Homo sapiens*, à l'anatomie moderne, l'a rejoint, il y a 100 000 ans. Ces deux hominidés ont laissé des sites et des outils semblables. Malgré leurs différences

anatomiques, ils avaient certainement le même comportement et se sont partagé le Proche-Orient.

En Europe, la situation est différente. Les sites les plus anciens laissés par *Homo sapiens* datent de 40 000 ans. *Homo neandertalensis*, alors très répandu, a disparu 10 000 ans après l'arrivée de l'homme moderne. En envahissant l'Europe, *Homo sapiens* a apporté avec lui de nombreux témoignages d'une pensée moderne parfaitement aboutie et sans précédent. Par une nouvelle technique de taille de la pierre, caractéristique du Paléolithique supérieur, il

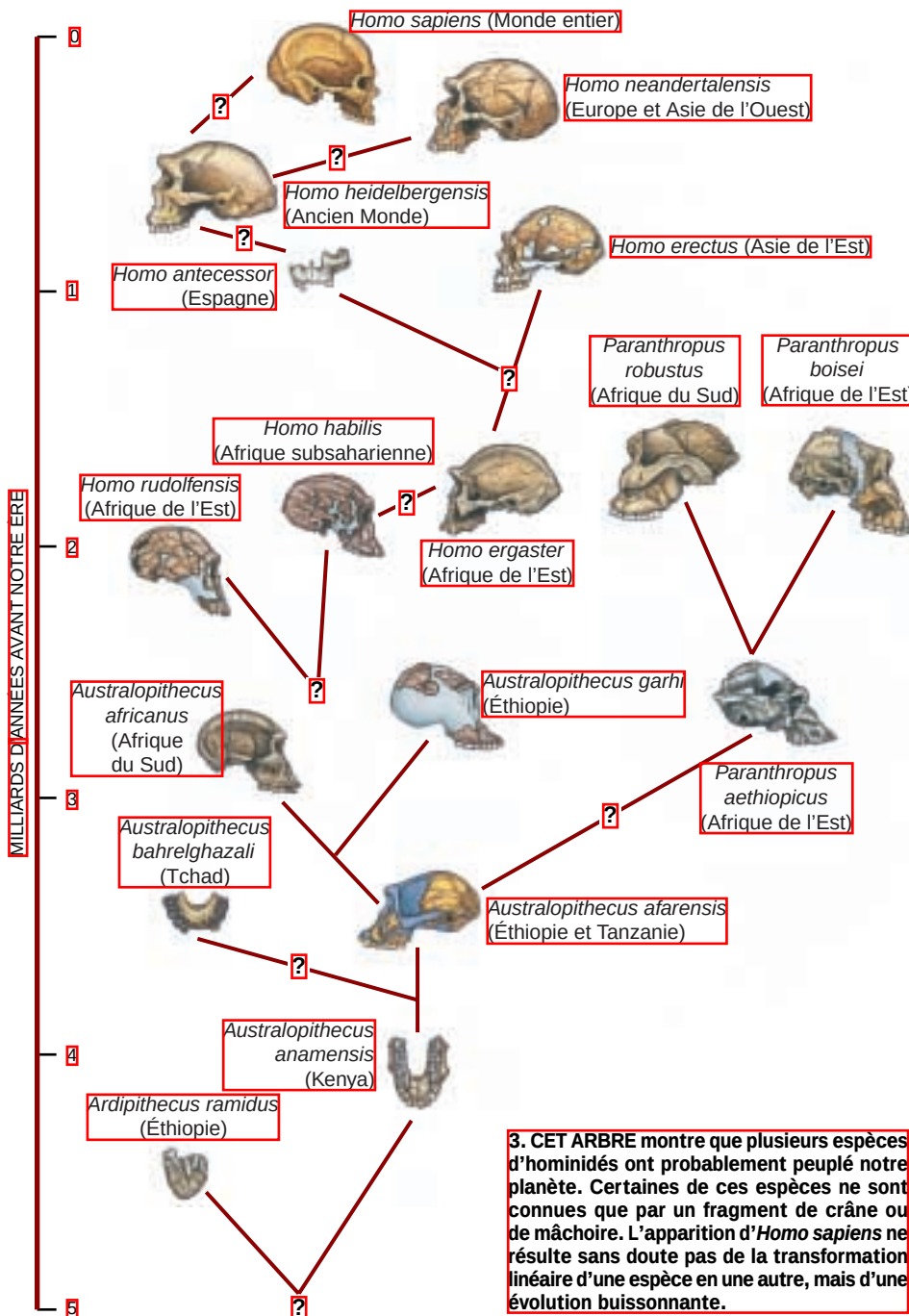
produisait des lames minces et allongées à partir d'un bloc cylindrique. Il fabriquait aussi des outils en os et en bois de cervidé, avec une grande maîtrise des propriétés de ces matériaux. *Homo sapiens* a également apporté l'art, sous la forme de sculptures, de gravures et de peintures rupestres spectaculaires. Il conservait des informations sur des plaques d'os ou de pierre. Il jouait de la musique sur des instruments à vent. Il réalisait des parures ouvragées. Il enterrait certains morts dans des sépultures élaborées, avec des objets qui témoignent d'une croyance en la vie après la mort et d'une hiérarchie sociale (toutes les tombes n'étaient pas aussi riches). Son habitat était organisé en zones dédiées à des activités différentes, ses techniques de chasse et de pêche perfectionnées. La période des innovations techniques rares et espacées était terminée, remplacée par un perfectionnement continu. Manifestement, cet *Homo sapiens*, c'était nous.

Par toutes ses pratiques, l'homme moderne du Paléolithique supérieur différait nettement des Néandertaliens. En Europe, ces derniers semblent avoir acquis de nouveaux savoir-faire après son arrivée, mais on ignore quelles relations entretenaient ces deux espèces. Comme les Néandertaliens disparurent rapidement, on suppose que les interactions étaient rarement à leur avantage. En Europe enfin, on n'a aucune preuve d'un métissage entre ces deux espèces.

Au Proche-Orient, il y a 40 000 ans (60 000 ans après son arrivée), *Homo sapiens* a remplacé *Homo neandertalensis*, comme il l'a fait ensuite en Europe. C'est bien à cette époque que correspond l'apparition des premiers outils attribuables au Paléolithique supérieur. On pense qu'*Homo sapiens* était alors doté d'une riche culture.

Pourquoi l'histoire évolutive des hominidés a-t-elle différé en Europe (remplacement rapide) et au Proche-Orient (longue coexistence)? Probablement parce que l'apparition de la cognition moderne, c'est-à-dire de la pensée symbolique, s'est accompagnée de l'acquisition des comportements modernes : *Homo sapiens* a rapidement supplanté les Néandertaliens.

Pour comprendre comment ce changement des processus cognitifs s'est produit, revenons au mécanisme général de l'évolution. Tout d'abord, seules des espèces qui existent déjà peuvent évoluer. D'autre part, les nouvelles particularités d'une espèce préexistaient et



Le rôle du climat dans la coexistence des derniers hominidés

La coexistence d'*Homo neandertalensis* et d'*Homo sapiens* est une de celles qui posent le plus de questions, tant ces deux groupes sont proches par les niches écologiques qu'ils occupent, par leurs comportements et par leur traits culturels. Ces hommes ont-ils cohabité dans les mêmes paysages pendant de longues périodes, tels les Australopitèques et des premiers *Homo*? Le contraste entre le Proche Orient et l'Europe, établi par Ian Tattersall, mérite d'être discuté.

Au Proche-Orient, des hommes anatomiquement modernes sont connus 100 000 ans avant notre ère, dans deux sites israéliens (Qafzeh et Skhul). De 80 000 à 40 000 ans avant notre ère, seuls les Néandertaliens sont connus dans cette région. Le premier groupe est associé à une faune en partie d'origine africaine, le second à une faune plus septentrionale. Au gré de fluctuations climatiques, la limite entre ces deux domaines fauniques et entre les hommes qui leur étaient associés s'est déplacée parallèlement à la direction Nord-Sud, dans un couloir reliant l'Afrique de l'Est à l'Eurasie. Cette région a donc vu une succession plutôt qu'une cohabitation de groupes humains.

L'équilibre se rompt au début du Paléolithique supérieur. Au cours d'un réchauffement climatique, des hommes modernes, désormais porteurs de techniques et d'organisations sociales nouvelles, se répandent d'Est en Ouest en Europe. Leurs proportions corporelles révèlent leurs origines tropicales. Leur adaptation biologique à leur nouveau milieu mettra plus de 15 000 ans. Le remplacement des Néandertaliens locaux n'a pas été «rapide». Dans un contexte d'occupation humaine discontinue et de très faible densité démographique, les Néandertaliens se maintiennent dans certaines zones géographiques pendant presque 10 000 ans après le début de l'invasion des hommes modernes. La supériorité de ces derniers n'était donc pas écrasante. C'est sans doute le début de la dernière glaciation, il y a 30 000 à 25 000 ans avant notre ère, qui a précipité l'extinction des Néandertaliens, en réduisant les territoires habitables et en exacerbant la compétition entre les deux groupes humains.

Jean-Jacques HUBLIN,
Directeur de recherche au CNRS

se sont généralisées parce que l'environnement a changé. Par exemple, les hominidés ont sans doute possédé un appareil vocal moderne pendant des centaines de milliers d'années avant d'utiliser un langage articulé, structuré de façon complexe. Enfin, l'apparition des caractères est parfois aléatoire, et complètement imprévisible (les propriétés de l'eau ne sont pas déductibles de celles de l'hydrogène et de l'oxygène). L'apparition de la pensée symbolique n'a donc rien d'exceptionnel, même si ses conséquences furent capitales. Aujourd'hui encore, nous ne savons pas comment le cerveau humain nous fait prendre conscience de ce qui se passe dans notre environnement, à partir des décharges électriques et chimiques dans les neurones. En revanche, nous savons qu'avant d'arriver à la pensée symbolique, notre espèce est passée par un état sans symbolique.

À l'arrivée d'*Homo sapiens*, à l'anatomie moderne, des caractères existants se sont peut-être combinés, par l'intermédiaire d'une mutation génétique mineure due au hasard, pour créer un potentiel sans précédent. Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il alors continué longtemps d'avoir un comportement archaïque? Peut-être parce qu'il a acquis un comportement moderne grâce à l'apparition d'une innovation biologique qui n'a pas modifié son squelette (c'est-à-dire invisible sur les fossiles). Cependant, cette

espèce d'hominidés aurait alors remplacé toutes les populations de l'Ancien Monde en très peu de temps, ce qui n'est par corroboré par l'archéologie.

Je suppose plutôt que les capacités de l'homme moderne sont apparues avec l'espèce *Homo sapiens*, ou peu après, à l'état latent. Un stimulus culturel les aurait ensuite activées, ce qui se serait traduit par une innovation comportementale. Grâce aux avantages importants qu'elle conférerait, cette innovation se serait rapidement répandue, par simple contact entre les populations qui avaient déjà le potentiel de l'acquérir.

De quelle innovation s'agissait-il? Probablement du langage : grâce à lui, les individus se sont communiqué des idées et des expériences. De surcroît, il

est indispensable au processus même de la pensée. Il impose de classer les objets et les sensations en groupes que l'on nomme et il permet d'associer les symboles mentaux. Aujourd'hui, nous ne pouvons pas concevoir la pensée sans langage. La capacité à former des symboles mentaux est la source de notre créativité : c'est en combinant ces symboles qu'on en vient à se poser des questions du type : «Que se passerait-il si...?»

Malgré les spéculations des linguistes, on ne sait pas comment le langage est apparu. En quel endroit? Au sein de quelle population? Néanmoins, une fois armé de facultés symboliques, *Homo sapiens* est devenu un adversaire redoutable, pas forcément rationnel, comme *Homo neandertalensis* l'a découvert à ses dépens.

Ian TATTERSALL est conservateur au Département d'anthropologie du Muséum d'histoire naturelle de New York. Jay MATTERNES est peintre et sculpteur.

Randall WHITE, *Dark Caves, Bright Visions: Life in Ice Age Europe*, W.W. Norton / American Museum of Natural History, 1986.
Derek BICKERTON, *Language and Species*, University of Chicago Press, 1990.

Ian TATTERSALL, *The Fossil Trail: How We Know What We Think We Know about Human Evolution*, Oxford University Press, 1995.

Christopher STRINGER et Robin MCKIE, *African Exodus: The Origins of Modern Humanity*, Henry Holt, 1997.

William HOWELLS, *Getting Here: The Story of Human Evolution*, Compass Press, 1997.

Ian TATTERSALL, *The Last Neanderthal: The Rise, Success and Mysterious Extinction of Our Closest Human Relatives*, Macmillan, 1995 ; deuxième édition : Westview Press, décembre 1999.

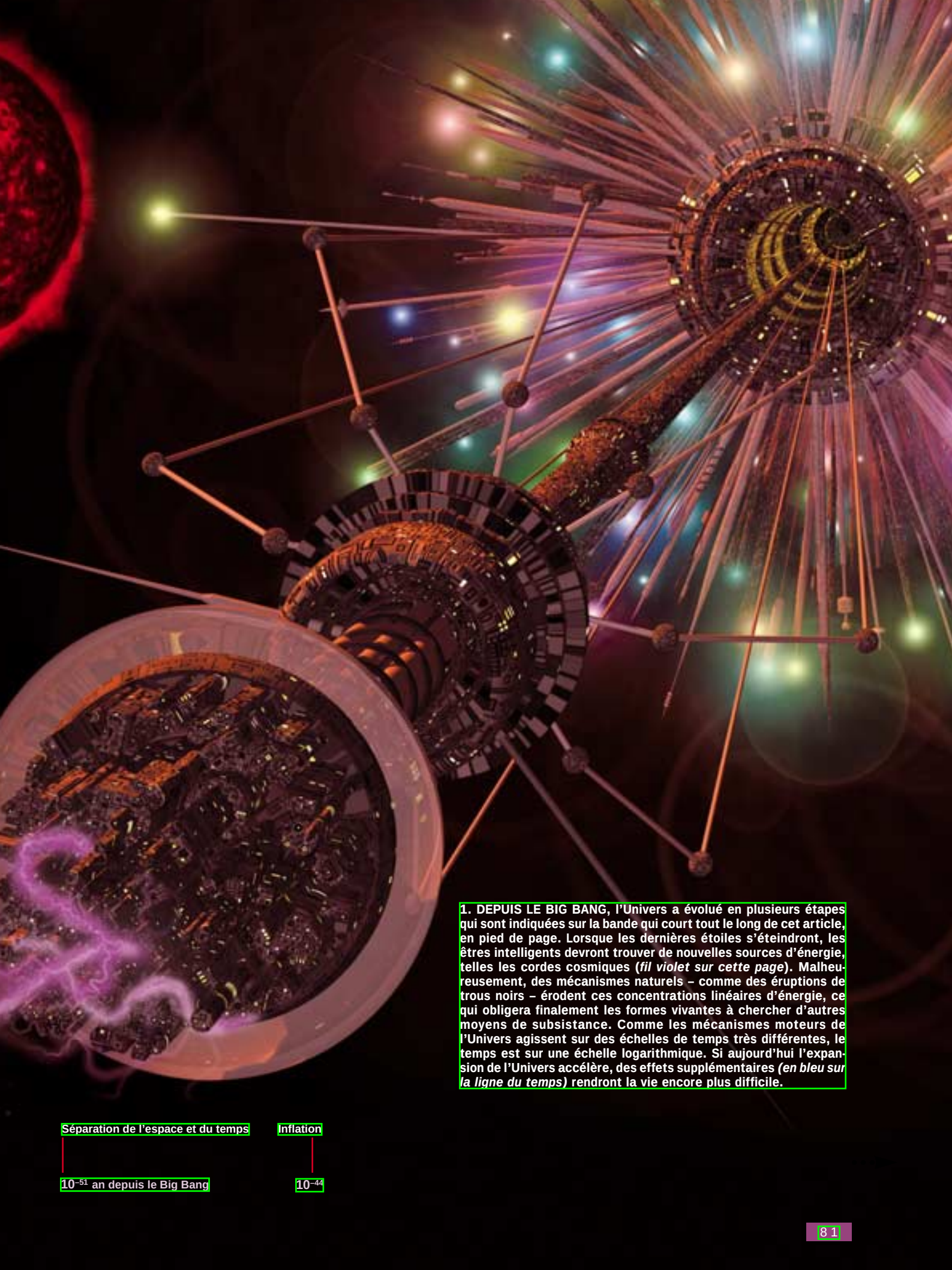
The Origin and Diversification of Language, sous la direction de Nina G. Jablonski et Leslie C. Aiello, University of California Press, 1998.

Le destin ultime de la vie

LAWRENCE KRAUSS • GLENN STARKMAN

Des milliards d'années durant, l'Univers était trop chaud pour que la vie apparaisse. Dans un avenir très lointain, il deviendra si froid et si vide que la vie, aussi ingénieuse soit-elle, sera oblitérée.

La croyance en la vie éternelle est au cœur de nombreuses religions. On imagine un paradis spirituel, une existence dépourvue de douleur, de mort ou de mal. Dans le royaume temporel, nous aspirons à une autre sorte de vie éternelle, évoquée par Charles Darwin dans la conclusion de *l'Origine des espèces* : «Comme toutes les formes actuelles de la vie descendent en ligne directe de celles qui vivaient longtemps avant l'époque cumbrienne, nous pouvons être certains que la succession régulière des générations n'a jamais été interrompue [...]. Dès lors, nous pouvons compter avec quelque confiance sur un avenir d'une incalculable longueur.» Nombre d'auteurs de science-fiction ont repris l'idée de Darwin. Ils ont reconnu que, lorsque le Soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, la vie que nous connaissons sur notre planète s'éteindra. Cependant, l'espèce humaine est résistante, et nos descendants chercheront de nouveaux havres, se disséminant dans chaque recoin de l'Univers, à l'instar des organismes qui ont colonisé toutes les niches possibles de la Terre. Le mal, la douleur et la mort ne disparaîtront peut-être jamais, mais nous espérons que, quelque part dans l'Univers, certains de nos descendants survivront.



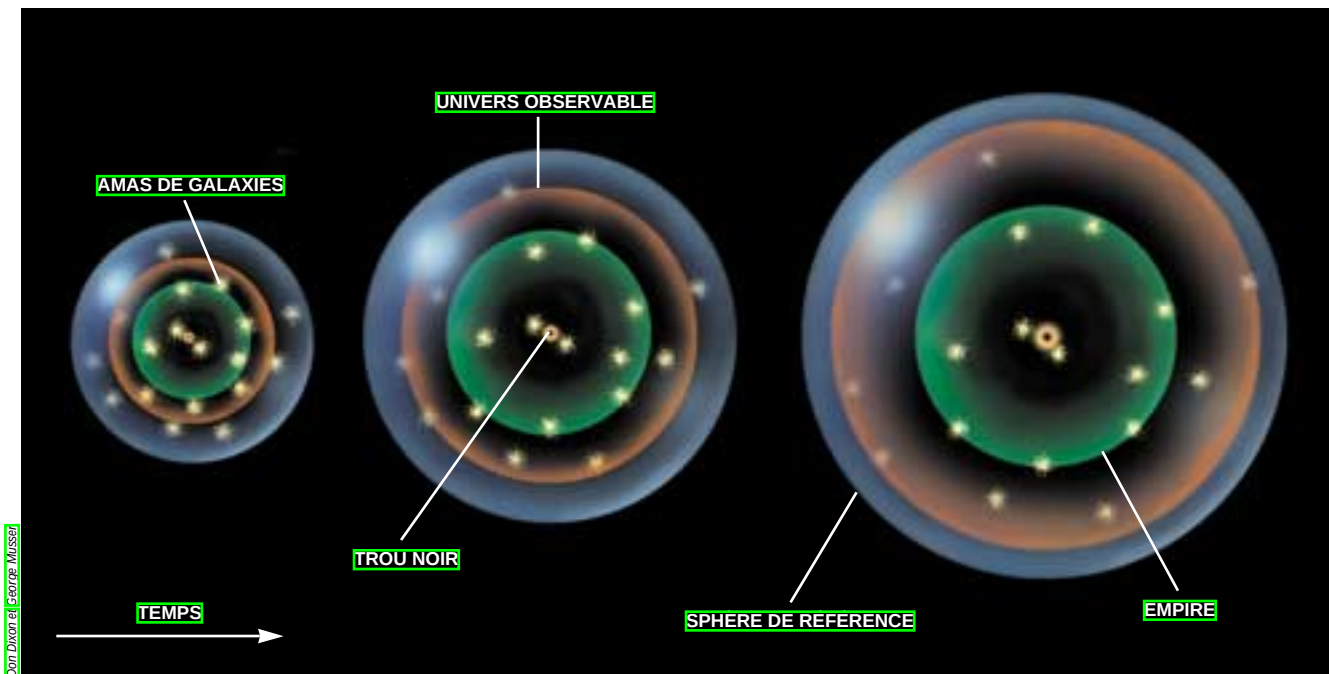
1. DEPUIS LE BIG BANG, l'Univers a évolué en plusieurs étapes qui sont indiquées sur la bande qui court tout le long de cet article, en pied de page. Lorsque les dernières étoiles s'éteindront, les êtres intelligents devront trouver de nouvelles sources d'énergie, telles les cordes cosmiques (*fil violet sur cette page*). Malheureusement, des mécanismes naturels – comme des éruptions de trous noirs – érodent ces concentrations linéaires d'énergie, ce qui obligera finalement les formes vivantes à chercher d'autres moyens de subsistance. Comme les mécanismes moteurs de l'Univers agissent sur des échelles de temps très différentes, le temps est sur une échelle logarithmique. Si aujourd'hui l'expansion de l'Univers accélère, des effets supplémentaires (*en bleu sur la ligne du temps*) rendront la vie encore plus difficile.

Séparation de l'espace et du temps

Inflation

10^{-51} an depuis le Big Bang

10^{-44}



Jean Duvon et George Musser

2. EN ANALYSANT LA STRATEGIE de récupération d'énergie élaborée par le physicien Steven Frautschi, de l'Institut de technologie de Californie, on comprend pourquoi l'humanité survivra difficilement dans le futur très lointain, de l'ordre de 10^{100} ans. Dans de nombreuses théories cosmologiques, les ressources se multiplient quand l'Univers – et tout volume arbitraire qu'il contient (sphère bleue) – se dilate et qu'une fraction de plus en plus grande devient observable

(sphère rouge). Une civilisation pourrait utiliser un trou noir pour transformer en énergie de la matière, captée dans l'«empire» du trou noir (sphère verte). Toutefois, à mesure que cet empire grossit, la conquête de nouveaux territoires est de plus en plus coûteuse ; la dilution de la matière l'emporte finalement. En effet, la matière deviendra si diluée que l'humanité ne pourra plus construire un trou noir suffisamment grand pour la récupérer.

Est-ce bien sûr? La science ne connaît encore ni les fondements physiques de la vie ni ceux de l'expansion de l'Univers, mais le destin ultime de la vie n'est pas imprévisible. Les observations cosmologiques récentes indiquent notamment que l'Univers ne se recontractera pas, après avoir atteint une taille maximale : son expansion se poursuivra indéfiniment. Ainsi, la vie n'est pas menacée d'un «grand écrasement» flamboyant au cours duquel toute civilisation serait effacée. La nouvelle semble bonne : pourquoi une civilisation intelligente n'utiliserait-elle pas les inépuisables ressources de l'Univers pour survivre perpétuellement?

Néanmoins, la vie se nourrit d'énergie et d'information, qui, selon des arguments scientifiques très généraux, ne peuvent être récupérées qu'en quantités finies, même en un temps infini. Pour persister, la vie devra s'accommoder de ressources décroissantes et d'une connaissance limitée. Dans ces conditions, aucune forme significative de conscience ne pourra subsister indéfiniment.

Les déserts d'une vaste éternité

Depuis un siècle, l'eschatologie scientifique (l'étude du sort ultime de l'homme et de l'Univers) a oscillé entre optimisme et pessimisme. Peu après la prédiction confiante de Darwin, les scientifiques se sont inquiétés de la «mort thermique», une époque lointaine où le cosmos, stabilisé à une température uniforme, n'évoluerait plus. Puis, dans les années 1920, la découverte de l'expansion de l'Univers a dissipé cette crainte : l'expansion indéfinie préviendrait la stabilisation thermodynamique. Toutefois, peu de cosmologistes ont envisagé les autres conséquences sur la vie d'un Univers en expansion perpétuelle, jusqu'à la parution, en 1979, d'un article du physicien Freeman Dyson, de l'Institut d'études avancées de Princeton. F. Dyson se fondait sur des résultats de Jamal Islam, de l'Université de Chittagong, au Bangladesh ; plusieurs physiciens et astronomes ont poursuivi son travail en l'actualisant. L'an dernier,

nous avons décidé de réexaminer la question quand ont été publiées de nouvelles observations qui conduisent à imaginer une évolution de l'Univers bien différente de celle que l'on prévoyait jusqu'alors.

Depuis 12 milliards d'années, l'Univers a beaucoup évolué. Extraordinairement chaud et dense, il s'est dilaté et refroidi. Des centaines de milliers d'années durant, le rayonnement a dominé ; le «fond diffus cosmologique» qui a été mesuré par le satellite COBE en 1992, est considéré comme un vestige de cette ère. Ce rayonnement correspond à celui d'un corps à une température de 3 kelvins, soit environ -270°C . Puis la matière s'est imposée, et des structures de plus en plus grandes se sont condensées. Aujourd'hui, si les observations cosmologiques récentes sont correctes, la dilatation de l'Univers s'accélère, signe probable qu'un nouveau type d'énergie, émanant peut-être de l'espace lui-même, prend le relais.

La vie que nous connaissons n'existe que si des planètes tournent autour

Apparition de l'électromagnétisme

10^{-18} an depuis le Big Bang

Synthèse des noyaux atomiques

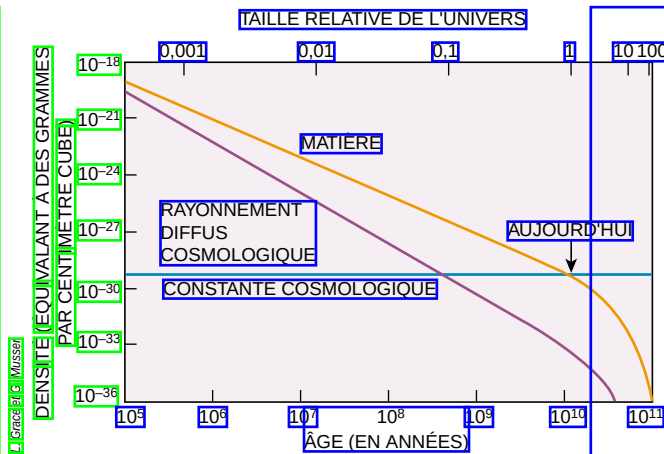
10^{-5}

d'étoiles. Or, la mort des étoiles est inéluctable, et la fréquence de leur naissance a chuté depuis le pic initial, qui s'est produit il y a environ dix milliards d'années. Dans 100 000 milliards d'années, les dernières étoiles formées par les processus classiques s'éteindront, et une nouvelle ère commencera. Des mécanismes aujourd'hui trop lents pour être remarqués prédomineront : les systèmes planétaires seront dispersés par les passages d'étoiles proches, la matière, ordinaire ou exotique, se désintégrera, et les trous noirs s'évaporeront lentement.

À quelles limites radicales se heurtera une vie intelligente ? Une civilisation suffisamment évoluée, dans un univers éternel, au volume potentiellement infini, pourrait-elle collecter des quantités infinies de matière, d'énergie et d'information ? Curieusement, non. Même après une éternité de dur labeur bien planifié, les êtres vivants n'accumuleront qu'un nombre fini de particules, une quantité finie d'énergie et un nombre fini de bits d'information. Cet échec est d'autant plus frustrant que le nombre de particules, de joules et de bits disponibles peut croître sans limites. Le problème ne réside pas dans le manque de ressources, mais dans la difficulté de les collecter.

La cause en est l'expansion de l'Univers, qui diminue la densité de ressources disponibles. Quand le rayon de l'Univers double, la densité d'énergie des atomes est divisée par huit. Pour les ondes lumineuses, la décroissance est encore plus rapide : leur densité d'énergie est divisée par 16, parce que la dilatation les disperse tout en allongeant les longueurs d'onde, affaiblissant ainsi leur énergie.

En raison de cette dilution, il faut de plus en plus de temps pour collecter une quantité fixée de ressources.



3. L'EXPANSION DE L'ESPACE agit de différentes façons sur les diverses formes d'énergie. La matière ordinaire (en orange) se raréfie proportionnellement au volume. Le rayonnement cosmologique diffus (en violet) est également dilué, mais, de surcroît, les longueurs d'onde sont allongées (et l'énergie est alors réduite). La densité d'énergie, représentée par la constante cosmologique (en bleu), ne varie pas, du moins selon les théories actuelles.

Deux stratégies s'offrent aux êtres intelligents : laisser la matière venir à eux ou aller la chercher. Dans le premier cas, la meilleure approche à long terme consiste à laisser la gravité opérer. De toutes les forces de la nature, seuls la gravité et l'électromagnétisme attirent les objets à des distances arbitrairement grandes. Toutefois, les forces électromagnétiques sont « écrantées » : des particules de charges opposées se neutralisent, de sorte que les objets sont généralement neutres et, dès lors, insensibles aux forces électriques et magnétiques. En revanche, aucun écrantage de la gravité n'est possible, car les particules ne font que s'attirer.

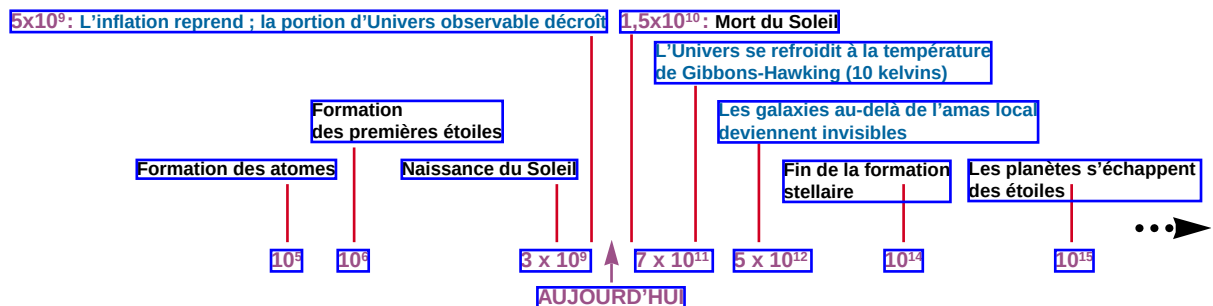
Abdiquer face au vide

Toutefois, l'expansion de l'Univers écarte les objets et affaiblit ainsi leur attraction mutuelle. Dans tous les modèles d'Univers, excepté un, la gravité ne suffit finalement plus à regrouper des quantités plus grandes de matière. L'Univers aurait déjà atteint ce stade : les amas de galaxies constituent peut-être les structures les plus vastes qui soient liées par la gravité (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick

Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999). La seule exception concerne un univers en équilibre entre expansion et contraction, où la gravité continue indéfiniment à assembler des quantités toujours plus grandes de matière. Ce scénario semble aujourd'hui contredit par les observations et, de toute manière, il n'offre pas de perspectives très optimistes : dans 10^{33} ans environ, la matière accessible sera si concentrée que la majeure partie s'effondrera en trous noirs, anéantissant toute forme de vie. Sur Terre, tous les chemins mènent peut-être à Rome, mais, dans un trou noir, ils conduisent en un temps fini au centre du trou, où le démembrement et la mort sont inéluctables.

La stratégie de recherche active des ressources n'est, hélas, pas plus efficace que l'approche passive. L'expansion de l'Univers réduit l'énergie cinétique, de sorte que les prospecteurs devraient dilapider leur butin afin de maintenir leur vitesse. Même dans le scénario le plus optimiste – où l'énergie vient au prospecteur à la vitesse de la lumière et est collectée sans pertes –, une civilisation ne pourrait engranger une énergie illimitée que dans un trou noir auprès de celui-ci. En 1982, à l'Institut de technologie de Californie, Steven Frautschi a ainsi calculé que l'énergie tirée des trous noirs s'amenuiserait même plus vite que les coûts de prospection (voir la figure 2). Nous avons récemment réexaminé cette idée et nous avons découvert qu'un trou noir n'amasserait l'énergie indéfiniment que s'il était plus gros que l'Univers visible.

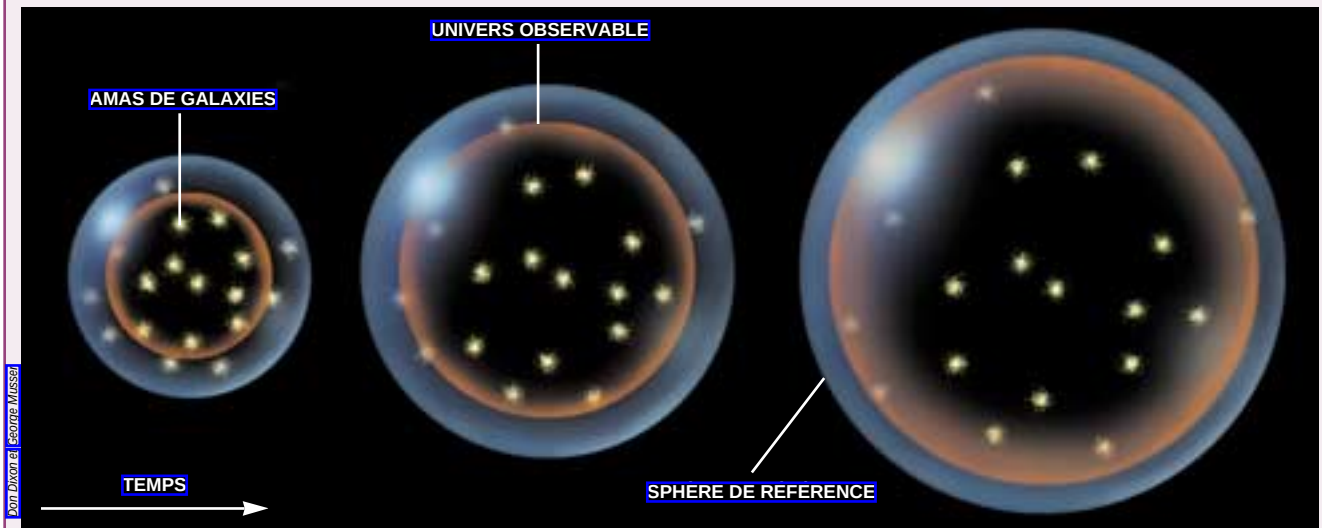
La dilution cosmique de l'énergie serait un handicap considérable si l'Univers se dilatait à vitesse croissante : tous les objets lointains que nous voyons aujourd'hui finiraient par s'éloigner plus vite que la lumière et



Le pire de tous les univers possibles

De tous les modèles d'univers en expansion perpétuelle, celui qui suppose l'existence d'une « constante cosmologique » est le moins engageant. D'une part, la vie ne peut y durer éternellement et, d'autre part, la qualité de la vie s'y détériore rapidement. Si les observations récentes d'une expansion accélérée (voir *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, *Pour la Science*, mars 1999) se confirment, notre avenir s'annonce sinistre. L'expansion cosmique écarte les objets les uns des autres, à moins qu'ils ne soient liés par la gravité ou par une autre

force. Ainsi, la Voie lactée fait partie d'un amas de galaxies plus grand. Cet amas, d'un diamètre de dix millions d'années-lumière environ, demeure agrégé, tandis que les galaxies hors de l'amas sont emportées à toute vitesse par l'expansion de l'espace intergalactique. La vitesse relative de ces galaxies lointaines est proportionnelle à leur distance. Au-delà d'une distance nommée horizon, la vitesse est supérieure à la vitesse de la lumière (ce que permet la relativité générale, car la vitesse est imprimée par l'expansion de l'espace lui-même). Nous ne pouvons voir plus loin.



L'Univers apparaît très différent aux yeux d'un observateur, selon que son expansion est ralentie (séquence ci-dessus) ou accélérée (séquence de la page ci-contre). Dans les deux cas, l'Uni-

vers est infini, et n'importe quelle portion de l'espace – représentée ici par une sphère de référence, qui englobe les galaxies en jaune vif – grandit. L'observateur ne voit qu'un volume limité,

deviendraient invisibles. Les ressources totales à notre disposition sont donc limitées par ce que nous voyons aujourd'hui (voir l'encadré ci-dessus).

Les diverses formes d'énergie ne se dilueront pas toutes de la même façon. Par exemple, l'Univers pourrait contenir un réseau de cordes cosmiques, des concentrations minces et infiniment longues d'énergie, qui se seraient formées lors du refroidissement de l'Univers primordial. L'expansion ne réduit pas l'énergie par unité de longueur de ces cordes cosmiques (voir *Les cordes cosmiques*, par Alexander Vilenkin, *Pour la Science*, février 1988). Comment profiter de cette manne ? Des êtres intelligents pourraient-ils couper une corde, se rassembler aux extrémités et consommer son énergie ? Si le réseau de cordes est infini, leur appétit pourrait être

satisfait. Cette stratégie a un grave défaut : si une civilisation trouve le moyen couper des cordes cosmiques, des phénomènes naturels pourraient faire la même chose spontanément. Des trous noirs pourraient naître sur des cordes et les dévorer. Ainsi, les êtres vivants n'absorbent qu'une portion finie de corde avant d'atteindre l'extrémité. Tout le réseau de cordes finirait par disparaître, laissant la civilisation dans la misère.

Peut-on puiser dans le vide quantique ? Après tout, l'accélération cosmique résulte peut-être de l'existence de la constante cosmologique, une forme d'énergie qui ne se dilue pas quand l'Univers se dilate (voir *L'anti-gravité*, par Lawrence Krauss, *Pour la Science*, mars 1999). Dans ce cas, l'espace vide est baigné d'un rayonnement étrange, nommé rayonnement de Gib-

bons-Hawking ou de De Sitter. Hélas, l'extraction d'énergie de ce rayonnement à des fins pratiques est utopique : si le vide fournissait de l'énergie, il tomberait dans un état d'énergie inférieur ; or le vide est déjà l'état d'énergie minimale. Quelles que soient notre ingéniosité et la « coopération » de l'Univers, nous devons un jour faire face à la finitude des ressources.

Cette finitude est-elle rédhibitoire pour la vie éternelle ? L'humanité pourrait-elle réduire sa consommation énergétique, par exemple en réduisant sa température corporelle ? Des humains génétiquement modifiés pourraient probablement vivre à des températures un peu inférieures à 37 °C. Toutefois, la température de congélation du sang est une limite à ces tentatives. Viendra un moment où nos descendants devront abandonner leur enveloppe corporelle.

Les trous noirs avalent les galaxies

Au rythme actuel, le combustible galactique s'épuise

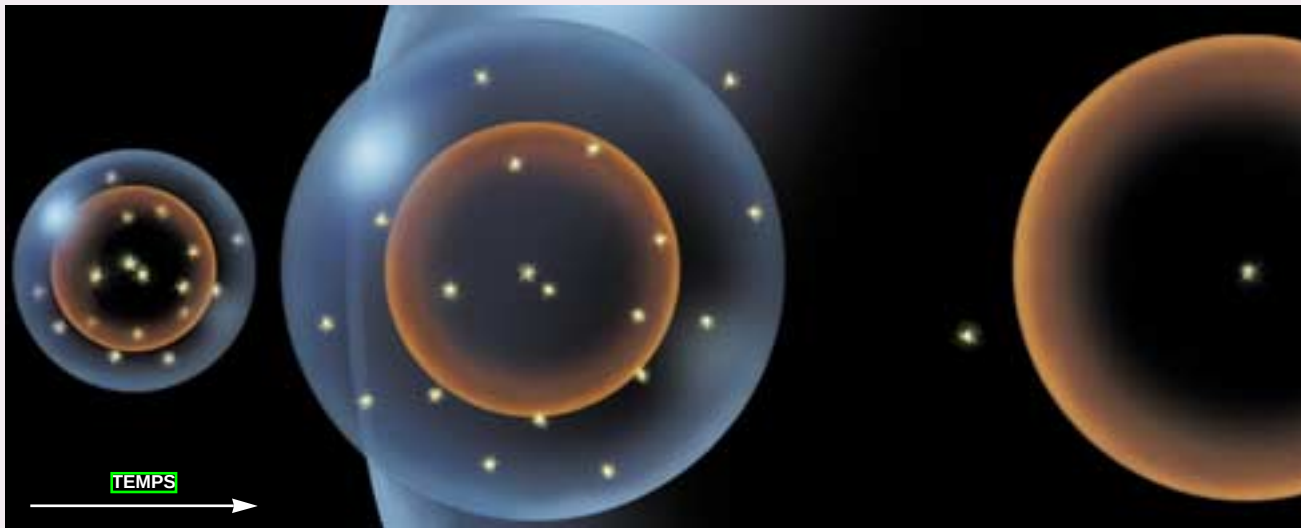
10³⁰

10³⁷ ans après le Big Bang

Si, comme semblent le montrer les observations, l'Univers possède une constante cosmologique positive, l'expansion accélère et les galaxies s'écartent de plus en plus rapidement. Leur vitesse est toujours proportionnelle à leur distance, mais la constante de proportionnalité ne varie pas, au lieu de diminuer avec le temps comme dans un univers dont l'expansion ralentit. Par conséquent, les galaxies qui sont aujourd'hui au-delà de notre horizon resteront toujours hors de vue. Même les galaxies que nous observons aujourd'hui – excepté celles de l'amas local – atteindront la vitesse de la lumière et disparaîtront à nos yeux. L'accélération, qui ressemble à l'inflation de l'Univers primordial, a commencé

quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui, il y a plus de cinq milliards d'années.

La disparition des galaxies lointaines sera progressive. La longueur d'onde de leurs rayonnements s'allongera jusqu'à devenir indétectable. Simultanément, la quantité de matière observable diminuera, et le nombre de mondes accessibles à nos vaisseaux spatiaux décroîtra. Dans 2 000 milliards d'années, bien avant l'extinction des dernières étoiles de l'Univers, tous les objets hors de notre propre amas de galaxies ne seront plus observables ou accessibles. Il n'y aura plus aucun nouveau monde à conquérir. Nous serons alors vraiment seuls dans notre coin d'Univers.



qui gonfle parce que les signaux lumineux se propagent (*sphère rouge*). Si l'expansion ralentit, l'observateur aperçoit une partie de plus en plus grande de l'Univers ; de plus en plus de galaxies

remplissent le ciel. En revanche, si l'expansion accélère, la fraction observable de l'Univers diminue ; l'espace semble alors se vider de toute galaxie.

Cette idée futuriste ne présente pas de difficultés fondamentales. Elle suppose simplement que la conscience n'est pas liée à un ensemble particulier de molécules organiques, mais qu'elle peut être incarnée dans une multitude de formes différentes, des robots aux nuages interstellaires sensibles (voir *Laisserons-nous la Terre à des robots ?* par Marvin Minsky, *Pour la Science*, décembre 1994). Nombre de philosophes modernes et de cogniticiens considèrent la pensée consciente comme un processus réalisable par un ordinateur. Nous ne discuterons pas cette thèse ici (ce qui est commode, car nous ne sommes pas compétents pour le faire), mais nous nous contenterons de signaler que l'humanité aura plusieurs milliards d'années pour concevoir des incarnations physiques où elle transfèrera un jour les consciences.

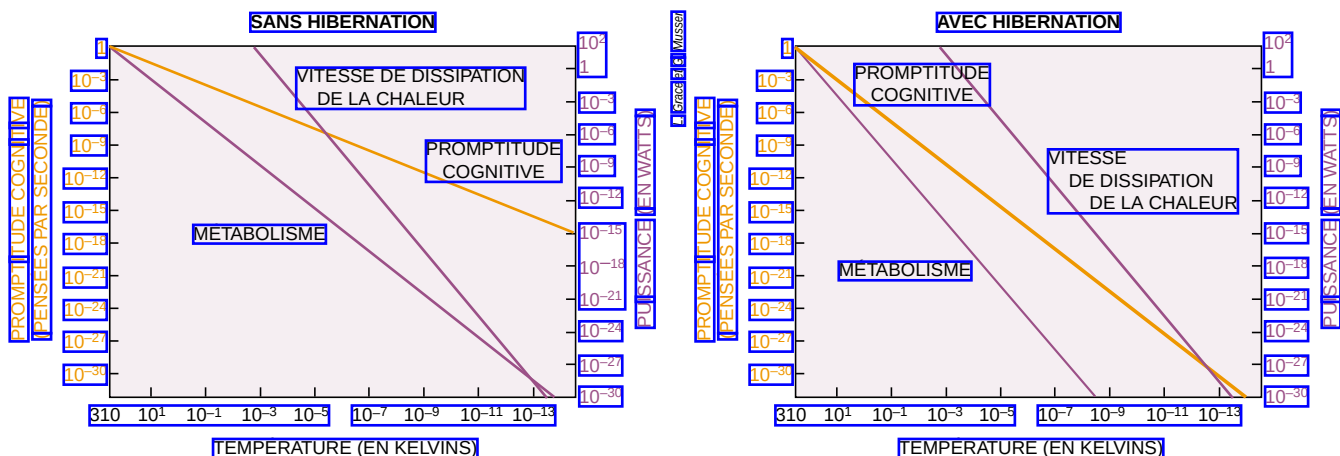
Afin de réduire la consommation énergétique, ces «corps» nouveaux devront fonctionner à des températures très basses et avoir des métabolismes plus lents que nos corps d'aujourd'hui.

F. Dyson a calculé que, si les organismes ralentissaient leur métabolisme alors que l'Univers se refroidit, ils pourraient consommer une quantité d'énergie totale finie sur toute l'éternité. Les consciences seraient également ralenties (mesurées, par exemple, par le nombre de pensées par seconde), mais le nombre total de pensées pourrait rester illimité. En bref, les êtres intelligents survivraient éternellement, pas seulement en temps absolu, mais aussi en temps subjectif : tant que les organismes seront assurés d'avoir des pensées en nombre infini, ils ne se formaliseront pas d'une vie ralentie. Le marché – ralentissement du métabolisme contre vie

éternelle – semble avantageux, mais l'infini n'est pas intuitif. Un organisme ne maintient le même degré de complexité que si la vitesse de traitement de l'information est proportionnelle à la température du corps, tandis que la vitesse de consommation d'énergie est proportionnelle au carré de la température (le facteur additionnel de température provient de lois thermodynamiques fondamentales). Ainsi, les besoins de puissance diminuent plus vite que la promptitude cognitive (voir la figure 4, à gauche). À 37 °C, le corps humain dépense environ 100 watts. À -118 °C, un organisme de complexité équivalente penserait deux fois moins vite, mais consommerait un quart de la puissance. Le compromis est acceptable, parce que les mécanismes physiques dans l'environnement ralentissent au même rythme.

L'effet tunnel liquéfie la matière

10⁶s



4. LA VIE sera-t-elle éternelle si la réserve d'énergie est finie ? Si l'humanité réduisait sa température corporelle à moins de 37°C , elle consommerait moins de puissance, au prix d'une activité cérébrale ralentie (graphique de gauche). Comme le métabolisme déclinerait plus vite que la vitesse de pensée, cette forme de vie pourrait s'arranger pour avoir un nombre infini de pensées à l'aide de ressources limitées. Toutefois, elle dissiperait moins bien la chaleur perdue, de sorte qu'elle ne parviendrait pas aux températures inférieures à

10^{-13} kelvin environ. L'hibernation partielle (graphique de droite) résoudrait le problème de la dissipation de la chaleur. En se refroidissant, la forme de vie passerait une fraction croissante de son temps en léthargie, réduisant encore son métabolisme moyen et sa vitesse de pensée. Ainsi, la puissance consommée demeurerait toujours inférieure à la puissance dissipée sous la forme de chaleur, tout en autorisant un nombre infini de pensées. Toutefois, un scénario de ce genre pourrait buter sur d'autres écueils, telles des limites quantiques.

Dormir, c'est mourir un peu

Malheureusement, une difficulté subsiste. Un corps s'échauffe s'il ne dissipe pas en chaleur l'essentiel de la puissance qu'il consomme. Par exemple, le corps humain est refroidi par l'émission d'un rayonnement infrarouge, émis par la peau. À très basse température, le radiateur le plus efficace est un gaz dilué d'électrons. Or, le rendement de ce radiateur optimal, proportionnel au cube de la température, décroît plus vite que le ralentissement du métabolisme. À partir d'une limite, les organismes ne peuvent plus abaisser leur température, à moins de réduire leur complexité, de s'abêtir.

Ces conclusions n'ont pas découragé F. Dyson, qui a élaboré une stratégie d'hibernation qui compenserait l'inefficacité des radiateurs : les organismes ne passeraient qu'une petite partie du temps en état d'éveil ; en dormant, leur métabolisme diminuerait tout en continuant à dissiper de la chaleur. De cette manière, ils atteindraient des températures corporelles moyennes bien inférieures (voir la figure 4, à droite). En dormant une proportion croissante de leur temps, ils consommeraient une quantité finie

d'énergie, mais existeraient éternellement et entretiendraient une infinité de pensées. Selon cette analyse, la vie éternelle est possible.

Depuis la publication des calculs de F. Dyson, plusieurs difficultés sont apparues. D'abord, F. Dyson supposait que la température moyenne de l'espace profond – aujourd'hui, les 2,7 kelvins du rayonnement diffus cosmologique – continuerait à diminuer avec l'expansion, de sorte que les organismes pourraient toujours abaisser leur température. Toutefois, si l'Univers possède une constante cosmologique, la température a un plancher absolu, fixé par le rayonnement de Gibbons-Hawking. Selon les estimations actuelles de la valeur de la constante cosmologique, ce rayonnement a une température effective de 10^{-29} kelvin. Quand les organismes auront atteint cette température, ils ne pourront plus se refroidir.

D'autre part, F. Dyson a oublié que les organismes devraient disposer d'horloges afin de se réveiller périodiquement. Ces horloges devraient comptabiliser des durées de plus en plus longues avec de moins en moins d'énergie. Or, la mécanique quantique montre que de telles horloges sont impossibles. Considérons par exemple une horloge composée de deux petites

billes très éloignées et lancées l'une vers l'autre ; une sonnerie retentit lorsqu'elles se heurtent. Pour allonger la durée entre les sonneries, les organismes lanceraient les billes à des vitesses inférieures. Toutefois, ils seraient limités par le principe d'incertitude d'Heisenberg : aux vitesses trop faibles, la position des billes deviendrait imprécise ; à la limite, les horloges ne sonneraient plus et l'hibernation se transformerait en repos éternel.

Le disque rayé

Le troisième doute, et le plus général, sur la viabilité à long terme d'une vie intelligente résulte de limitations fondamentales sur le calcul. Longtemps, les informaticiens ont pensé que tout calcul nécessitait une quantité minimale d'énergie par opération, quantité proportionnelle à la température de l'ordinateur. Puis, au début des années 1980, les physiciens ont compris que certains mécanismes physiques, tels les effets quantiques ou le mouvement brownien de particules dans un fluide, pouvaient servir de base à un ordinateur sans pertes (voir *Les limites physiques du calcul*, par Charles Bennett et Rolf Landauer, *Pour la Science*, septembre

Les électrons et les positons se lient en une nouvelle forme de matière

Les trous noirs galactiques s'évaporent

10^{85} ans après le Big Bang

10^{98}

1985). De tels ordinateurs fonctionneraient avec une quantité arbitrairement petite d'énergie : pour utiliser moins d'énergie, ils ralentiraient, tout comme les organismes éternels. Ce fonctionnement à basse énergie nécessite deux conditions : ces ordinateurs doivent rester en équilibre thermodynamique avec leur environnement, et ils ne doivent jamais jeter de l'information, sous peine de rendre le calcul irréversible (un processus irréversible dissipe de l'énergie).

Ces conditions ne sont pas vérifiées dans un univers en expansion. Comme l'expansion dilue les rayonnements en allongeant leur longueur d'onde, les organismes n'émettent ou n'absorbent progressivement plus assez d'énergie, sous forme de rayonnement, pour rester en équilibre thermique avec leur environnement. Avec une quantité finie de matière à leur disposition, et donc une mémoire finie, ils devraient finalement oublier une ancienne idée pour en avoir une nouvelle. Quel genre d'existence perpétuelle ces organismes mèneraient-ils ? Ils ne pourraient collecter qu'un nombre fini de particules et une quantité finie d'information. Comme les pensées sont des réorganisations de l'information, une information finie implique un nombre fini de pensées. Les organismes seraient piégés dans le passé, ayant indéfiniment les mêmes idées. L'éternité deviendrait une prison au lieu d'un horizon de créativité et d'exploration. Est-ce vivre ?

Notons que F. Dyson n'a pas renoncé. Dans la correspondance que nous avons échangée, il a proposé que la vie évite les contraintes quantiques sur l'énergie et sur l'information grâce à une augmentation de taille, par exemple, ou en utilisant d'autres

types de mémoire. Selon ses termes, la question est de savoir si la vie est «analogique» ou «numérique», c'est-à-dire si c'est la physique classique ou la physique quantique qui impose les limites. Nous pensons qu'à long terme la vie est numérique.

Y a-t-il un autre espoir de vie éternelle ? Alors que la mécanique quantique telle que nous la connaissons semble imposer des contraintes rédhibitoires à la poursuite indéfinie de la vie, certains de ses développements pourraient, au contraire, nous tirer de ce mauvais pas. Par exemple, si une utilisation judicieuse de la théorie quantique de la gravitation conduisait à sauter d'un point à un autre de l'espace-temps par des «trous de ver», des formes vivantes pourraient visiter des parties de l'Univers inaccessibles aux êtres limités par la vitesse de la lumière et collecter des quantités infinies d'énergie et d'information. Elles pourraient aussi construire des bébés univers (voir *L'univers inflatoire autoreproducteur*, par Andreï Linde, *Pour la Science*, janvier 1995) et se propulser, ou envoyer un ensemble d'instructions pour se reproduire, dans des bébés univers.

Les limites ultimes sur la vie ne deviendront notables que sur des échelles de temps vraiment cosmiques (si l'on rapporte 10^{100} ans à la durée de vie humaine, l'âge de l'Univers actuel correspondrait à 10^{-90} seconde). Certains sont troublés que la vie, au moins dans son incarnation physique, doive se terminer, mais n'est-il pas remarquable que, malgré notre connaissance limitée, nous puissions tirer des conclusions sur ces questions eschatologiques ? Être conscient de l'évolution de l'Univers et de notre destinée en son sein est sans doute un cadeau bien plus grand que de pouvoir l'habiter éternellement.

PRIX "INTERBREW-BAILLET LATOUR DE LA SANTÉ" 2001



DOMAINE
D'APPLICATION :

LA TUBERCULOSE

MONTANT DU PRIX

Le Prix s'élèvera à six millions de francs belges (6 000 000 BEF – 150 000 EUROS).

Le Prix est décerné à une personnalité dont les activités sont axées sur la recherche scientifique et/ou sur les applications pratiques de celle-ci. Le Prix est destiné à reconnaître les mérites du lauréat et à promouvoir la poursuite de ses travaux.

Les candidats peuvent être de nationalité belge ou étrangère

Les candidatures doivent parvenir à la Secrétaire générale du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B - 1000 Bruxelles (Belgique) avant le 15 septembre 2000. La personnalité qui introduit la candidature doit joindre à celle-ci un mémoire sur les mérites du candidat, mémoire rédigé en anglais et comprenant au moins trois pages.

RÈGLEMENT :

Le règlement est à votre disposition au secrétariat du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B - 1000 Bruxelles, tél. : 02/504.92.11, fax : 02/504.92.92, e-mail : mjsimoen@fnrs.be

Lawrence KRAUSS et Glenn STARKMAN travaillent dans le Département de physique de l'Université Case Western Reserve, à Cleveland.

Freeman J. DYSON, *Time without End : Physics and Biology in an Open Universe*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 51, n° 3, pp. 447-460, juillet 1979.

John D. BARROW et Frank J. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1988.

Paul C.W. DAVIES, *The Last Three*

Minutes : Conjectures about the Ultimate Fate of the Universe, HarperCollins, 1997.

Fred ADAMS et Greg LAUGHLIN, *The Five Ages of the Universe : Inside the Physics of Eternity*, Free Press, 1999.

Lawrence M. KRAUSS, *Quintessence : The Mystery of the Missing Mass*, Basic Books, 1999.

Lawrence M. KRAUSS et Glenn D. STARKMAN, *Life, the Universe and Nothing : Life and Death in an Ever-Expanding Universe*, in *Astrophysical Journal*, à paraître.

Les origines de l'autisme

PATRICIA RODIER

Un gène qui règle le développement du système nerveux est en partie responsable de l'autisme.

En 1943, le pédiatre Léo Kanner analyse le comportement de 11 enfants et définit l'autisme (dérivé du grec *autos*, «soi-même»). Ce trouble comportemental apparaissant avant l'âge de trois ans se caractérise par des symptômes variés : les enfants autistes n'interprètent pas les états émotionnels des autres, ne reconnaissent ni la colère, ni la tristesse, ni les intentions manipulatrices. Leurs capacités linguistiques sont souvent restreintes et ils soutiennent difficilement une conversation. Par ailleurs, ils sont fréquemment préoccupés par un sujet, une activité ou un geste particuliers ; ils répètent les paroles entendues et ils ont la manie de faire tourner des objets. Un handicap mental aggrave parfois leur état.

Ces comportements, qui affectent environ 16 enfants sur 10 000, nuisent évidemment à leur intégration dans la société. Comment suivre un cursus scolaire normal quand on ne peut s'empêcher de se cogner la tête sur la table ? Comment se faire des amis quand on ne s'intéresse qu'aux calendriers ? Malgré un quotient intellectuel quelquefois normal, les thérapies comportementales, même intenses (plusieurs heures par jour), ne suffisent pas à leur donner une vie indépendante.

Aujourd'hui encore, les biologistes et les psychologues cherchent l'origine de l'autisme ou des troubles apparentés. Les tenants du «tout psychologique» admettent souvent les thèses du psychanalyste Bruno Bettelheim, qui voyait dans l'autisme la conséquence d'une grave déficience de la relation mère-enfant. Cependant, de nombreuses études épidémiologiques et physiologiques attestent que l'ori-

gine de ce trouble est, au moins partiellement, génétique et biologique.

L'une d'elles m'a menée à l'étude des causes génétiques de l'autisme et à l'identification d'un gène qui en est parfois responsable. En 1994, les ophtalmologistes pédiatriques Marilyn Miller, de l'Université de Chicago, et Kerstin Strömland, de l'Université de Göteborg, ont décrit les problèmes de mobilité oculaire chez les victimes de la thalidomide, le médicament anti-nauséeux qui a provoqué une épidémie d'anomalies congénitales au cours des années 1960 : environ cinq pour cent des adultes qui avaient été exposés au médicament pendant leur vie intra-utérine étaient autistes, soit 30 fois plus que dans la population générale !

Ces travaux sur la thalidomide confirmaient la part biologique de l'autisme et apportaient des réponses nouvelles sur l'origine du trouble : l'autisme apparaît dans les premières semaines de la grossesse, lorsque le cerveau et le système nerveux de l'embryon se développent. Les résultats constituaient également un pas vers l'identification des facteurs de risque de l'autisme et ainsi, à plus long terme, vers de nouveaux traitements.

Facteurs génétiques et environnementaux

En examinant l'hérédité du trouble, des épidémiologistes ont progressivement démontré la transmission familiale complexe de l'autisme. La probabilité que les frères et les sœurs de personnes autistes souffrent eux-mêmes d'autisme est comprise entre trois et huit pour cent, bien supérieure au 0,16 pour cent de risque de la popula-

tion générale, mais inférieure à la probabilité de 50 pour cent d'une maladie génétique due à une mutation dominante unique (un gène défectueux hérité d'un parent suffit alors à déclencher le trouble), ou à celle de 25 pour cent d'une mutation récessive unique (le caractère ne s'exprime que si les deux gènes, hérités chacun d'un parent, sont défectueux). Cependant, la fréquence de l'autisme s'explique si des formes déficientes de plusieurs gènes contribuent à une maladie.

Les analyses de ce type sont difficiles, parce que certaines personnes apparentées à des autistes, sans l'être elles-mêmes, ont néanmoins certains des symptômes. Certaines de ces personnes ont probablement quelques-unes des variantes de gènes liés à l'autisme, mais celles-ci ne s'expriment pas pleinement chez ces individus.

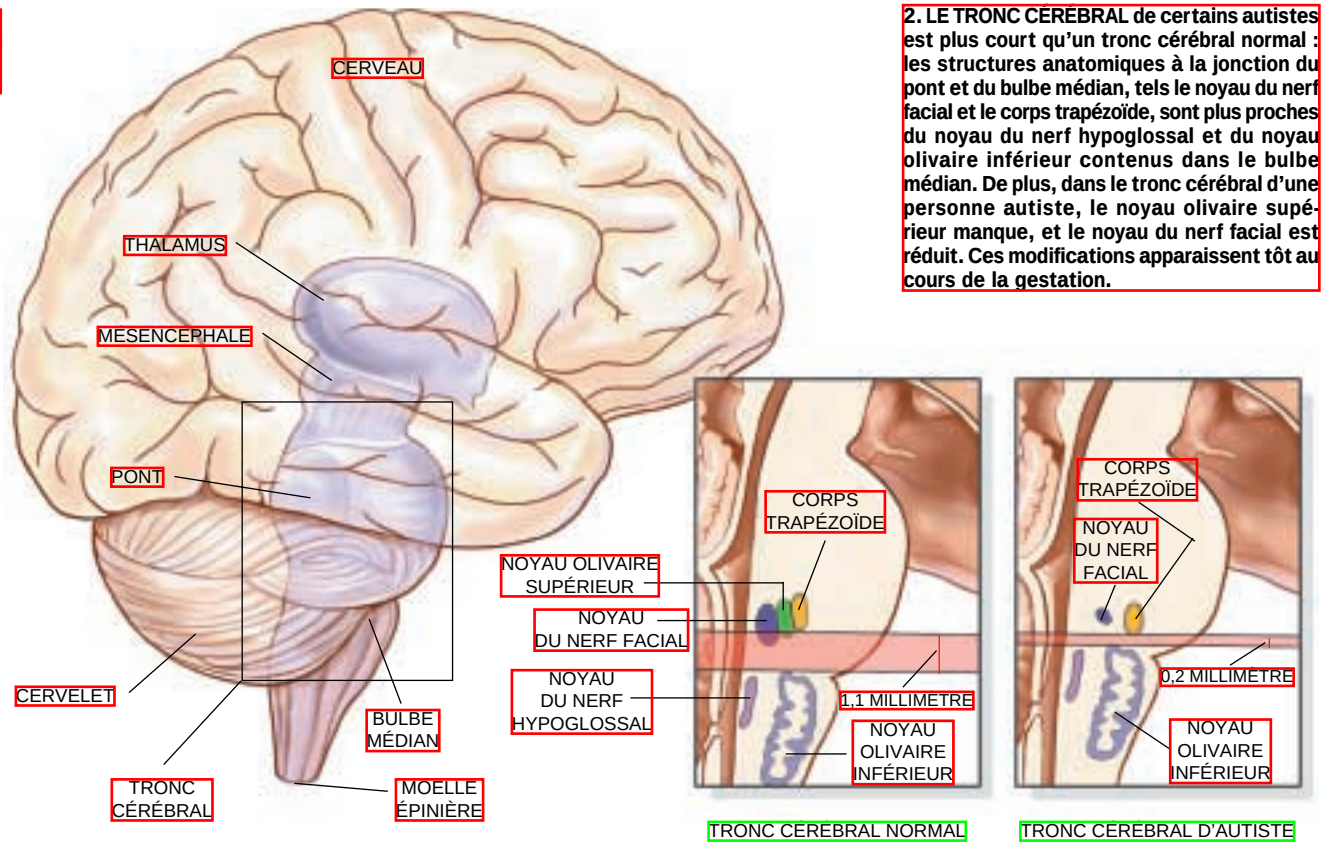
Des études de jumeaux effectuées en Angleterre confirment une composante génétique de l'autisme, mais n'écartent pas l'influence de facteurs environnementaux. Si la maladie était d'origine exclusivement génétique, les jumeaux monozygotes (les vrais jumeaux), qui ont les mêmes gènes, seraient simultanément atteints. Or, pour l'autisme, lorsque l'un des jumeaux est atteint, le deuxième ne l'est que dans 60 pour cent des cas, et il ne présente certains symptômes de la maladie que dans 86 pour cent des cas. Ainsi, la génétique n'explique pas complètement l'autisme.

Les biologistes savent que l'exposition *in utero* au virus de la rubéole ou à des substances, tels l'éthanol ou l'acide valproïque (un anticonvulsivant utilisé



1. UN ENFANT AUTISTE garde un visage sans expression, même lorsqu'il joue, par exemple, avec une bulle de savon. Ses relations avec autrui et sa vie sociale sont réduites.

USHRE PARSIS



2. LE TRONC CÉRÉBRAL de certains autistes est plus court qu'un tronc cérébral normal : les structures anatomiques à la jonction du pont et du bulbe médian, tels le noyau du nerf facial et le corps trapézoïde, sont plus proches du noyau du nerf hypoglossal et du noyau olivaire inférieur contenus dans le bulbe médian. De plus, dans le tronc cérébral d'une personne autiste, le noyau olivaire supérieur manque, et le noyau du nerf facial est réduit. Ces modifications apparaissent tôt au cours de la gestation.

pour traiter l'épilepsie), augmentent le risque d'autisme. Les personnes souffrant de certaines maladies génétiques, telles la phénylcétonurie (la présence d'acide phénylpyruvique dans les urines et dans le cerveau) ou la sclérose tubéreuse (caractérisée, en particulier, par des crises convulsives, des paralysies et des troubles psychiques), risquent également plus d'être autistes. Cependant, aucun de ces facteurs n'explique le grand nombre de cas recensés. De surcroît, l'exposition à des maladies ou à des substances dangereuses devrait affecter les deux membres d'une paire de jumeaux, et non un seul d'entre eux. Les influences environnementales sont probablement plus subtiles que celles qui ont été déjà identifiées. Comment la combinaison des multiples facteurs induit-elle les symptômes chez certaines personnes, tandis que d'autres y échappent ? La réponse est encore inconnue.

L'embryologie de l'autisme

La découverte de M. Miller et de K. Strömlund était passionnante parce qu'elle révélait une cause simple. Elle conduisait à de nouvelles questions : comment l'exposition à la thalidomide influence-t-elle le développement de l'embryon ? Les embryologistes com-

prennent mieux les développements anormaux des embryons lorsqu'ils savent quand les anomalies sont apparues. Tous les adultes étudiés par M. Miller et K. Strömlund, des Suédois nés à la fin des années 1950 et au début des années 1960, avaient certaines des malformations caractéristiques de l'exposition à la thalidomide : des phocomélies (les mains et les pieds sont directement reliés au tronc), des oreilles ou des pouces malformés ou manquants, des dysfonctionnements neurologiques des yeux ou des muscles du visage. Connaissant les organes de l'embryon qui se développent à chaque étape de la gestation, les embryologistes déterminent avec précision le moment où une malformation a été induite : le pouce est affecté dès le 20^e jour après la conception, les oreilles entre les jours 20 et 33, les bras et les jambes entre le 25^e et le 35^e jour. La plupart des victimes de la thalidomide qui étaient autistes avaient des anomalies de la partie externe des oreilles, mais aucune malformation des bras ou des jambes : ils avaient donc été affectés très tôt au cours de la gestation.

Pour l'autisme provoqué par la thalidomide, la période critique est beaucoup plus précoce que ce que la plupart des biologistes pensaient. Peu de neurones se forment dès la quatrième

semaine de gestation, et la plupart sont des neurones moteurs des nerfs crâniens, ceux qui activent les muscles des yeux, du visage, des mâchoires, de la gorge et de la langue. Les corps cellulaires de ces neurones sont localisés dans des structures du tronc cérébral, la région située entre la moelle épinière et le reste du cerveau. Comme ces neurones se développent en même temps que la partie externe des oreilles, les autistes victimes de la thalidomide devraient aussi souffrir de dysfonctionnements des nerfs crâniens. M. Miller et K. Strömlund ont confirmé cette prédiction en montrant que tous les autistes de leur étude avaient des mouvements des yeux anormaux ou des troubles de l'expression faciale.

Les cas d'autisme consécutifs à une exposition à la thalidomide sont-ils similaires aux cas dont la cause est inconnue ? En apparence, les personnes autistes semblent souvent normales. Cependant, les quelques études qui ont évalué les caractéristiques non comportementales des autistes ont conclu à l'existence d'anomalies physiques et neurologiques mineures dans de nombreux cas : ces anomalies sont identiques à celles des cas d'autisme provoqué par la thalidomide. Par exemple, des malformations mineures du pavillon de l'oreille (notamment une

rotation postérieure : le sommet de l'oreille est basculé vers l'arrière de plus de 15 degrés) sont plus fréquentes chez les enfants autistes que chez les enfants normaux ou handicapés mentaux, ou que chez les frères et sœurs d'enfants autistes (voir la figure 4). Des dysfonctions des mouvements oculaires avaient été associés à l'autisme avant la découverte de l'effet de la thalidomide, et l'absence d'expression faciale est l'un des signes comportementaux utilisés dans le diagnostic du trouble.

La neurobiologie de l'autisme

Les symptômes de l'autisme ne proviennent sans doute pas tous de perturbations des nerfs crâniens. Ces anomalies du système nerveux, chez les autistes, attestent plus probablement une lésion cérébrale précoce, qui affecte non seulement les nerfs crâniens, mais entraîne également des effets secondaires sur le développement du cerveau. Autrement dit, les lésions du tronc cérébral perturberaient le développement normal ou la mise en place des circuits d'autres régions cérébrales, notamment celles qui sont responsables des fonctions supérieures, qui conditionnent les symptômes comportementaux de l'autisme, tel le langage. Il existe d'autres possibilités : par exemple, les malformations des oreilles et les dysfonctionnements des nerfs crâniens ne sont peut-être que les effets secondaires d'une lésion que nous ne comprenons pas. Néanmoins, les anomalies des autistes dont les causes de la maladie sont inconnues sont identiques à celles des autistes victimes de la thalidomide, et l'on pense que de nombreux cas d'autisme, sinon tous, sont induits très tôt au cours de la gestation, et particulièrement pendant les premières étapes du développement du système nerveux.

Le tronc cérébral, atteint par la thalidomide, a été rarement étudié dans



4. CET ENFANT AUTISTE semble normal, mais un œil exercé détecte quelques-unes des anomalies physiques caractéristiques du trouble : les coins de la bouche sont abaissés (en haut), les oreilles sont basses et presque carrées (en bas).

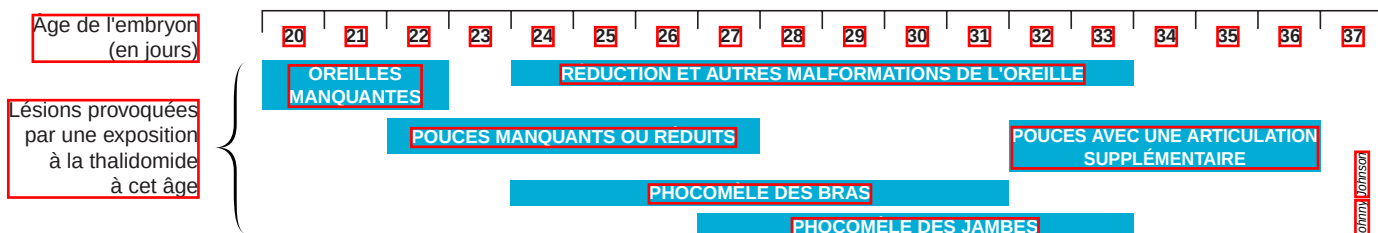


les travaux sur les lésions cérébrales congénitales, et les neurobiologistes ne lui assignent souvent que des fonctions élémentaires, telles la respiration, l'ingestion de nourriture, la coordination motrice... De surcroît, dans l'autisme, les perturbations du langage, de la planification et de l'interprétation des signes sociaux relèvent des régions supérieures du cerveau, tels le cortex cérébral et l'hippocampe, dans le cerveau antérieur.

Cependant, d'autres symptômes – l'absence d'expression faciale, l'hypersensibilité aux contacts et aux sons, et les perturbations du sommeil – ont leur origine dans des régions cérébrales associées à des fonctions primaires. En outre, l'anomalie cérébrale la plus souvent observée chez les personnes autistes n'est pas une modification du cerveau antérieur, mais plutôt une réduction du nombre de neurones du cervelet, un important centre de traitement du cerveau postérieur qui règle l'activité des muscles responsables de la posture et du maintien.

Les incertitudes sur les régions cérébrales responsables de l'autisme sont peut-être dues à la faiblesse des théories actuelles sur la localisation des fonctions. Par exemple, Eric Courchesne et ses collègues de l'Université de San Diego ont montré que des régions du cervelet sont activées lors de certaines tâches qui nécessitent des traitements cognitifs de haut niveau. Toutefois, les symptômes complexes de l'autisme ne facilitent pas l'identification de leur origine dans le système nerveux (voir l'encadré de la page 92).

En 1995, nous avons poursuivi la première étude sur la thalidomide en examinant des échantillons de tronc cérébral provenant d'une jeune femme qui avait souffert d'autisme d'origine inconnue : le noyau du nerf facial, qui contrôle les muscles du visage, et le noyau olivaire supérieur, qui est un relais de l'information auditive, étaient



3. LES MALFORMATIONS CONGÉNITALES dues à la thalidomide varient selon la période à laquelle la mère a été exposée au médicament. En 1994, une étude a montré que des personnes autistes qui avaient été exposées à la thalidomide avaient des

oreilles mal formées, mais des membres normaux : le trouble apparaîtrait donc entre le 20^e et le 24^e jour après la conception, lorsque le système nerveux de l'embryon commence son développement (au-dessus).

quasi absents. Ces deux structures proviennent du même segment du «tube neural» de l'embryon, à l'origine du système nerveux central. Le cerveau de cette femme était de taille normale, mais il ne comptait qu'environ 400 neurones faciaux, contre 9 000 dans un cerveau normal.

J'ai d'abord supposé que seuls les neurones du noyau du nerf facial et du noyau olivaire supérieur manquaient dans le tronc cérébral. Cependant, en

mesurant les distances entre des points de repère neuro-anatomiques, j'ai découvert que les mesures antéro-postérieures (de bas en haut, chez l'être humain debout) du tronc cérébral étaient étonnamment réduites chez cette femme autiste. On aurait pu croire qu'une bande de tissu avait été prélevée (voir la figure 2).

J'avais déjà vu cette image de tronc cérébral raccourci sur des photographies de cerveaux anormaux de sou-

ris qui illustraient un article scientifique! Quand je me reportai à celui-ci, je constatai que les souris décrites avaient un raccourcissement du tronc cérébral, et aussi un noyau du nerf facial réduit et un noyau olivaire supérieur absent. De plus, les souris décrites dans l'article avaient d'autres points communs avec les autistes, notamment des malformations des oreilles et l'absence d'une des structures cérébrales qui commandent les mouvements oculaires.

L'autisme et les maladies apparentées

Le diagnostic de l'autisme est établi lorsque le malade a des anomalies dans trois catégories de comportements et, plus particulièrement, dans les interactions sociales.

La communication : l'autiste ne parvient pas à parler sans gesticuler ; malgré des capacités linguistiques adéquates, il commence et poursuit difficilement une conversation ; parfois, il parle de façon aberrante (par exemple, il répète une question au lieu d'y répondre).

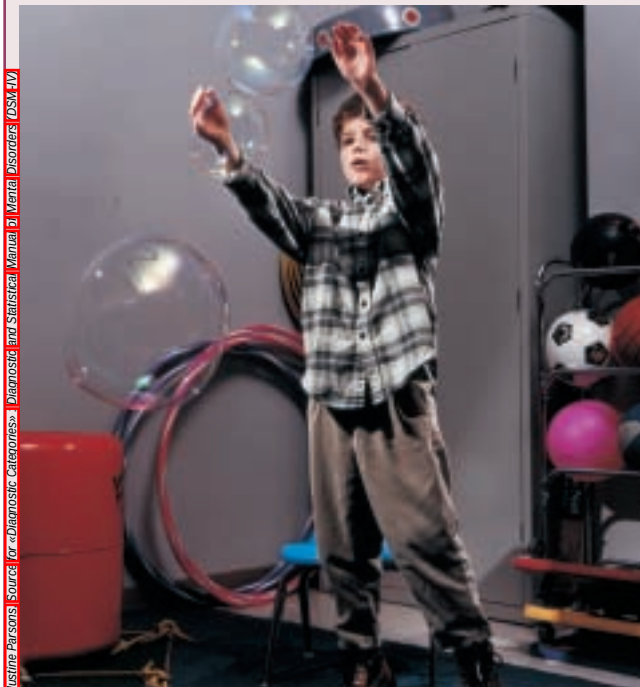
Restriction des comportements et des intérêts : l'autiste se concentre anormalement sur un sujet, un objet ou une activité ; le changement le désempare ; il insiste sans raison sur des routines et des rituels ; ses mouvements sont répétitifs.

Les interactions sociales : l'autiste ne regarde pas son interlocuteur dans les yeux ; il n'utilise pas d'expressions faciales, ni de gestes pour moduler ses interactions sociales ; il ne cherche pas à se mettre à l'aise ; il n'a pas de relations avec autrui.

De plus, les médecins ont identifié plusieurs troubles dont certains symptômes comportementaux sont typiques de l'autisme, mais avec une intensité différente ou associés à des caractéristiques sup-

plémentaires. Par exemple, les malades atteints du *trouble envahissant du développement non spécifié* ne remplissent pas les critères de l'autisme pour l'une des trois catégories ; le quotient intellectuel de ces malades est très variable. Par ailleurs, le syndrome d'Asperger atteint des malades au quotient intellectuel normal et dont le développement n'est pas retardé. Plus rares, le *trouble désintégratif de l'enfance* concerne des personnes qui se développent normalement, puis régressent jusqu'à un handicap grave, tandis que le syndrome de Rett, un trouble neurologique progressif, n'apparaît que chez les filles.

De nombreux biologistes pensent depuis longtemps que l'autisme est une maladie à composante génétique, mais Peter Szatmari et ses collègues de l'Université de l'Ontario ont découvert que seuls différents symptômes sont transmissibles plutôt qu'une maladie unique. Par exemple, un enfant autiste peut avoir un frère atteint du syndrome d'Asperger. Ces travaux montrent que les trois diagnostics les plus fréquents sont dus aux mêmes facteurs transmissibles.



LES THERAPIES COMPORTEMENTALES aident les enfants autistes à vivre plus heureux lorsqu'ils seront adultes. Les moniteurs des instituts spécialisés évaluent précisément les symptômes afin de mettre au point un programme adapté. Par exemple, ils proposent aux enfants des activités ludiques stimulantes (à



gauche). Certains instituts hébergent également des adultes autistes (à droite). L'homme photographié a construit le rideau qui se trouve derrière son lit avec des bobines de vidéocassettes : son vif intérêt pour ce type d'objets est une caractéristique de sa maladie.

Pourquoi ces souris avaient-elles ces étranges cerveaux ? Parce qu'elles étaient transgéniques : des embryologistes avaient bloqué l'expression d'un gène nommé *Hoxa1*, afin d'étudier le rôle de ce gène pendant les premières phases du développement. Était-ce l'un des gènes incriminés dans l'autisme ?

Haro sur *Hoxa1*

Les études des souris transgéniques ont montré que le gène *Hoxa1* joue un rôle essentiel dans le développement du tronc cérébral. Des équipes de Salt Lake City et de Londres ont découvert que le gène est actif dans le tronc cérébral lors de la formation des premiers neurones (la période identifiée par M. Miller et K. Ström-land). Les gènes de la famille d'*Hoxa1* codent des protéines, nommées facteurs de transcription, qui modulent l'activité d'autres gènes. De plus, le gène *Hoxa1* n'est actif qu'au début de l'embryogenèse. Lorsqu'un gène est exprimé en permanence, son fonctionnement anormal provoque des problèmes qui s'aggravent avec l'âge ; un gène qui s'exprime uniquement lors du développement est plus probablement la cause des handicaps congénitaux qui se stabilisent après l'enfance, tel l'autisme.

Le gène *Hoxa1* est un gène bien « conservé » : l'ADN qui le compose a peu changé au cours de l'évolution, et on le retrouve dans de nombreuses espèces animales. Les gènes les plus importants pour la survie sont souvent ainsi : si les mutations sont létales, elles ne sont pas transmises aux générations suivantes. Nombre de gènes existent sous plusieurs formes (par exemple, les gènes qui codent la couleur des yeux ou les groupes sanguins), mais les gènes conservés n'ont généralement qu'une forme. Malgré l'absence de variant connu du gène *Hoxa1* chez les mammifères, nous avons espéré que nous trouverions l'origine de l'autisme en cherchant une forme anormale du gène.

Le gène humain *HOXA1* (le gène humain s'écrit en majuscules) est situé sur le chromosome 7. Il ne contient que deux régions codantes, nommées exons, ainsi que des régions qui commandent la synthèse protéique et des régions apparemment inutiles. N'importe quelle mutation modifie les performances du gène, mais ce sont surtout celles des régions codantes qui

provoquent les maladies. Aussi, à partir d'ADN extrait des cellules sanguines de personnes autistes, nous avons d'abord recherché des gènes *HOXA1* dont les exons étaient différents.

Nous avons alors identifié deux formes du gène. La première était une modification mineure de la séquence de l'un des exons du gène (la protéine codée par le gène variant est donc légèrement différente de la protéine codée par le gène normal), qui est notablement plus fréquente chez les autistes que chez les personnes normales de leur famille ou sans lien de parenté. D'autre part, nous avons identifié un second gène variant qui est toutefois plus difficile à étudier, car l'enroulement de l'ADN de ce gène est modifié.

Hélas, le gène *HOXA1* n'est pas le Graal que nous cherchions : il n'est que l'un des nombreux gènes responsables de l'autisme. De plus, la version que nous avons étudiée en détail est exprimée de façon variable : sa présence n'accompagne pas systématiquement l'autisme. Apparemment, le gène défaillant existe chez 20 pour cent des personnes normales, contre environ 40 pour cent chez des personnes autistes. La présence du gène anormal double le risque d'être atteint par ce trouble. Cependant, comme la forme anormale du gène n'existe pas chez environ 60 pour cent des autistes, d'autres facteurs génétiques contribuent à la maladie.

La plupart des maladies génétiques étant déterminées par plusieurs versions défaillantes d'un gène, nous continuons de chercher d'autres versions d'*HOXA1*. De surcroît, des variations d'autres gènes exprimés au début du développement pourraient prédisposer leurs porteurs à l'autisme. Ainsi, nous avons découvert un variant du gène *HOXB1* (un gène du chromosome 17 dérivé du même ancêtre que le gène *HOXA1*) qui exerce des fonctions similaires dans le développement du tronc cérébral. Sa présence ne semble pas expliquer l'autisme. D'autres biologistes examinent des régions du chromosome 15 et d'une autre partie du chromosome 7, à la recherche de gènes qui augmentent le risque d'autisme, mais on n'a pas assez exploré les gènes qui diminueraient ce risque ; les interférences entre ces deux catégories expliqueraient les multiples manifestations de l'autisme ou des troubles apparentés.

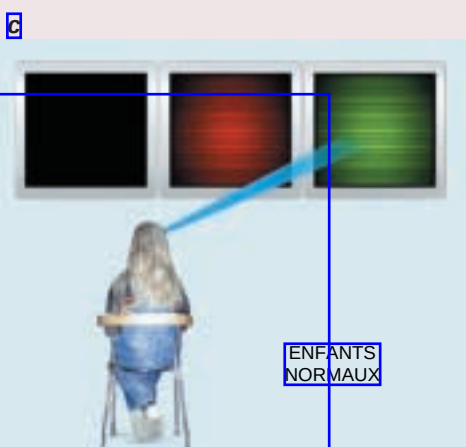
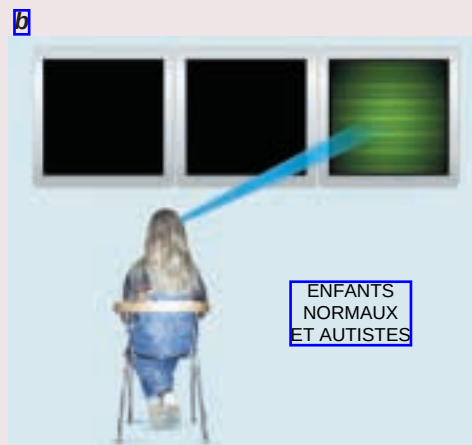
La recherche des bases génétiques de l'autisme est importante : si l'on connaissait mieux les gènes humains

Un dépistage simple de l'autisme

À l'Université de York, Susan Bryson et Reginald Landry ont récemment identifié un comportement autistique plus simple que l'ensemble des comportements habituellement étudiés pour le diagnostic : ils ont découvert que les enfants autistes réagissent anormalement à des stimuli visuels. Cette activité mentale est commandée par une partie primitive du cerveau, probablement le tronc cérébral, le cervelet ou les deux : cette découverte aidera les médecins à diagnostiquer la maladie.

Dans leur étude, deux groupes d'enfants âgés de quatre à sept ans, autistes et non autistes, regardaient des éclairs de lumière sur trois écrans. Dans un premier test, une lumière clignotant sur l'écran du milieu attirait l'attention des enfants à cet endroit (a) ; puis, l'écran du milieu s'éteignait, et une autre lumière clignotante apparaissait sur l'écran de droite ou de gauche. Les deux groupes déplaçaient leur regard vers cet écran (b). Dans une seconde expérience, l'écran du milieu continuait de clignoter pendant que la lumière apparaissait sur l'autre écran. Les enfants normaux bougeaient les yeux et regardaient ce nouveau stimulus (c), tandis que les enfants autistes restaient fixés sur le premier (d).

Des enfants porteurs d'autres types de lésions cérébrales sont capables de passer d'un stimulus à un autre. En revanche, les



enfants autistes n'y parviennent pas, même quand ils sont très intelligents. Les biologistes pensent que cette capacité est une fonction cérébrale primaire, car le nourrisson et les enfants attardés en sont dotés. Comme les animaux s'orientent aussi vers de nouveaux stimuli, des études permettront peut-être d'étudier ce symptôme de l'autisme chez des animaux après des manipulations génétiques ou des expositions à des substances tératogènes.

D'après R. Landry

associés au trouble, on pourrait les transférer à des souris ; puis, en exposant les animaux à des substances soupçonnées d'augmenter le risque d'autisme, on étudierait les interactions des facteurs environnementaux et génétiques, et l'on dresserait la liste des substances à éviter au début de la grossesse. L'étude du développement embryonnaire de ces souris transgéniques révélerait aussi les lésions cérébrales responsables de l'autisme : ayant identifié les dysfonctionnements du cerveau des personnes autistes, on aurait des bases solides pour chercher des traitements afin de minimiser les effets de la lésion.

La mise au point d'un test de dépistage génétique de l'autisme sera difficile, car de nombreux gènes semblent

responsables du trouble : on ne peut pas prédire précisément la probabilité d'avoir un enfant autiste en testant la présence d'un ou de deux gènes anormaux chez les parents. Toutefois, des tests pour les frères et les sœurs de personnes autistes qui craignent pour leurs propres enfants sont possibles : les médecins identifieraient alors les facteurs génétiques du membre autiste de la famille, puis les rechercheraient chez les frères et les sœurs non atteints.

Chaque facteur de risque que nous identifions perce un peu du mystère et constitue un point de départ pour de nouvelles hypothèses. L'étude de la thalidomide a attiré l'attention sur le tronc cérébral et le gène *Hoxa1*. De nouveaux résultats d'embryologie, des études

comportementales, des imageries cérébrales ou d'autres travaux pourront également inspirer ceux qui étudient l'autisme et travaillent à soulager les souffrances terribles de ce trouble.

Patricia RODIER est professeur de gynécologie et d'obstétrique à l'Université Rochester.

G. LELOD, *Autisme et troubles du développement global de l'enfant*, Expansion scientifique, 1989.

B. BETTELHEIM, *La forteresse vide : l'autisme infantile et la naissance du soi*, Gallimard, 1998.

P. FERRARI, *L'autisme infantile*, PUF-Que sais-je?, 1999.



Sculptures réelles et virtuelles

IAN STEWART

Grâce aux mathématiques des surfaces minimales, un artiste crée des sculptures virtuelles et réelles.

Apart les mathématiciens, rares sont ceux qui savent que les mathématiques sont belles. À l'école, ceux qui ont peiné sur les problèmes d'algèbre ou d'arithmétique ont rarement conservé des souvenirs de «beauté». Néanmoins, les mathématiques en ont plusieurs types. Si l'appréciation de l'élégance d'une démonstration mathématique est réservée à une élite, la beauté des formes géométriques est immédiate, tout comme celle des objets que crée la sculpture ; même les non-mathématiciens la perçoivent.

J'ai déjà présenté plusieurs fois des sculptures inspirées par les mathématiques (voir, par exemple, *La sculpture et les nombres*, *Pour la Science*, août 1996). Le courrier qui a suivi cet article m'a révélé la surprenante variété des arts mathématiques. Ici, nous examinerons les relations qu'entretient la mathématique des surfaces minimales avec les sculptures en contreplaqué de Brent Collins, un artiste qui vit à Gower, dans le Missouri. Ce sera l'occasion de poser quelques questions sur les rapports entre art virtuel et art réel.

Dans les années 1980, B. Collins créait des sculptures abstraites, sans aucune intention de leur donner une signification mathématique. Pourtant, il comprit progressivement que, lors de son travail, il cherchait intuitivement à réduire la surface comprise entre les bords de ses sculptures. Sans le savoir, il reproduisait certaines formes élémentaires de la topologie !

En 1995, B. Collins a commencé à travailler avec l'informaticien Carlo Séquin, de l'Université de Berkeley, pour explorer l'aspect mathématique de ses œuvres d'art. Leur collaboration est détaillée dans la revue *Leonardo* (vol. 30, n° 2, 1997), publiée par l'Institut de technologie du Massachusetts.

La forme clef de ces sculptures est la selle, une surface courbée qui ressemble à l'objet qu'utilisent la plupart des

cavaliers. Les selles sont des composants élémentaires des surfaces «minimales», c'est-à-dire les surfaces qui, ayant une courbe donnée pour bord, ont une aire minimale.

On obtient naturellement des surfaces minimales en trempant une boucle de

fil de fer dans de l'eau savonneuse : quelle que soit la forme de la boucle – entrelacs, nœuds, etc. –, le film de savon se tend spontanément et minimise son aire. De surcroît, chacun de ses points est un point selle, c'est-à-dire que, dans des directions perpendiculaires, les courbures sont toujours opposées : l'une est dirigée vers le haut, l'autre vers le bas. Ces points-selles résultent de la minimisation de l'aire qui impose une courbure moyenne nulle en chaque point ; la surface n'est pas plane, mais, autour de chaque point, les courbures opposées de la selle s'annulent.

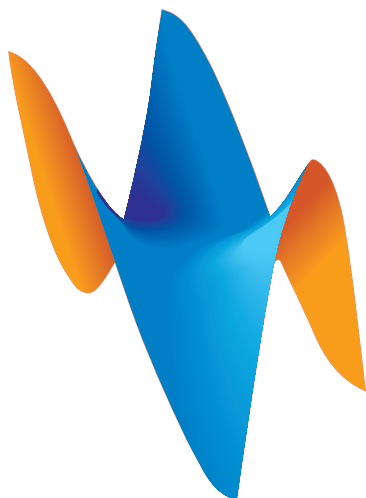
Les premières œuvres de B. Collins étaient inspirées de selles de cheval, mais il s'est rapidement orienté vers des formes plus complexes, notamment vers ce que les mathématiciens nomment une «selle de singe». Cette surface est comme une selle pour un singe muni d'une queue : elle a trois vallées descendantes, deux pour les jambes et une pour la queue, et trois vallées ascendantes (voir la figure 2). Une courbe fermée autour d'une telle selle s'incurve alternativement trois fois vers le bas et trois fois vers le haut, une selle classique s'incurve alternativement deux fois, et des selles «quadrupèdes» ou d'ordres supérieurs sont également possibles.

Pour voir comment B. Collins utilise ces idées dans ses œuvres, examinons l'*Hexagone hyperbolique* réalisé en 1995 (voir la figure 1). Cette sculpture, qui inclut six selles disposées en cercle, est étroitement apparentée à une surface minimale nommée tour de Scherk, du nom d'un mathématicien allemand. La tour de Scherk est composée d'une série de selles qui forment des trous orientés alternativement dans deux directions perpendiculaires (voir la figure 3). On obtient un *Hexagone hyperbolique* quand on tord une tour de Scherk à six trous de façon que son sommet et sa base se rejoignent.



1. Le Trèfle hyperbolique (en haut) et l'Hexagone hyperbolique (en bas) de Brent Collins illustrent ce que les mathématiciens nomment surfaces minimales.

dessins de Brian Chute



2. La selle de singe est une surface minimale avec trois directions de courbures vers le bas séparées par trois directions de courbure vers le haut.

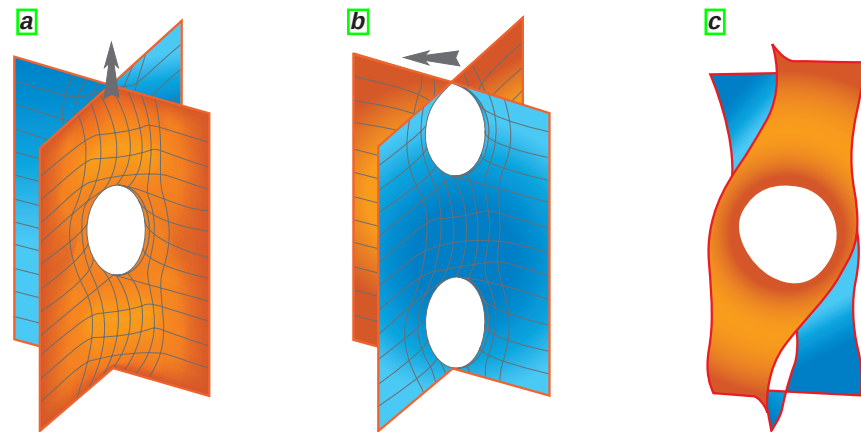
Lors de leurs discussions, B. Collins et C. Séquin ont eu l'idée de tourner l'extrémité d'une tour de Scherk de 90 degrés avant de la joindre à l'autre. Cette manipulation rappelle la construction d'un ruban de Möbius, qui s'obtient en tournant de 180 degrés l'extrémité d'une bande de papier avant de la coller à l'autre extrémité. En raison de la torsion, la surface n'a plus qu'une face : si vous peignez en rouge le ruban de Möbius de proche en proche, à partir d'un point quelconque et en vous arrêtant aux bords, vous verrez que le ruban sera finalement tout rouge ! Le ruban de Möbius est une surface à une seule face.

Une tour de Scherk sans torsion, ainsi qu'un *Hexagone hyperbolique*, a deux faces, que l'on peut peindre de deux couleurs différentes. Toutefois, la surface obtenue en tournant l'extrémité d'une tour de Scherk avant de la joindre à la seconde n'a qu'une seule face.

Le sommet et la base d'une tour de Scherk sont deux croix identiques, perpendiculaires à l'axe de la tour, qui se recollent parfaitement quand la torsion est un multiple de 90 degrés. Cependant, les trous successifs de la tour sont aussi, alternativement, selon deux directions perpendiculaires : cette alternance ne se retrouve sur la forme finale que si l'on tord les tours à un nombre impair de trous d'un multiple impair de 90 degrés et les tours à un nombre pair de trous d'un multiple pair de 90 degrés. Le *Trèfle hyperbolique* (voir la figure 1) est aussi une structure toroïdale obtenue par torsion d'une tour de Scherk à trois trous de $3 \times 90 = 270$ degrés.

C. Séquin crée ainsi une famille de surfaces qu'il nomme «surfaces de Scherk-Collins». En formulant mathématiquement les idées de B. Collins, il a conçu de nouvelles variations de façon systématique ; la réalisation des œuvres d'art en a été simplifiée. Comme les sculptures sont construites en contreplaqué par un travail long et délicat, B. Collins réalisait d'abord des prototypes en plastique et en cire. Cette méthode fournit un modèle précis, mais elle requiert plusieurs jours de travail. Pour accélérer l'opération, C. Séquin et son collègue Houman Meshkin ont mis au point un programme informatique de représentation des surfaces de Scherk-Collins.

Grâce à ce programme, l'artiste peut étirer et déformer la surface, afin d'obtenir un résultat esthétique satisfaisant. Il lui suffit de préciser certains paramètres : les plus simples sont le nombre de trous dans la tour et l'angle de torsion ; d'autres décrivent, par exemple, la taille des trous. Le programme ne se limite pas à la tour de Scherk ; certains paramètres permettent de choisir entre des selles de cheval ou des selles de singe. Une fois la surface affichée sur l'écran, on la réalise



3. Les tours de Scherk sont composées de selles superposées qui délimitent des trous dont les directions alternent. Une tour de Scherk à trois trous est vue de face (a) et après une rotation de 90 degrés (b). Tournée de 90 degrés, l'extrémité de cette tour (c) s'adapte à l'autre extrémité : le «tore» formé quand elles sont jointes est une surface à un seul côté.

Réactions

Dans l'article sur les sphéricônes (voir *Pour la Science*, novembre 1999), je décris des solides construits en coupant des doubles cônes et en pivotant l'une des moitiés de 90 degrés. Certains lecteurs ont confirmé ce que je pensais : cette forme n'était pas inédite. En 1996, David Been, d'Arlington, a trouvé dans un parc un objet rebondissant de la forme d'un sphéricône, probablement abandonné par un chien. Celui-ci devait en apprécier les rebonds imprévisibles.

Bob Whitefield, de Chapell Hill, confirme cette utilisation canine et indique que cette forme est brevetée par un fabricant de jouets. De façon plus sérieuse, plusieurs lecteurs ont remarqué que le sphéricône est un cas particulier de l'oloïde, une forme inventée par l'artiste suisse Paul Schatz.

Enfin, dans les années 1980, la compagnie *Momix*, dirigée par le chorégraphe Moses Pendleton, a utilisé pour l'un de ses spectacles une armature métallique très similaire à un sphéricône.

en s'aidant des outils informatiques graphiques. Par cette méthode, C. Séquin a déjà créé des dizaines de modèles de surfaces de Scherk-Collins.

Toutefois, la modélisation informatique pose des problèmes nouveaux : aujourd'hui, les ordinateurs graphiques sont suffisamment puissants pour que la sculpture virtuelle ne se distingue plus de l'objet réel. Par exemple, les programmes graphiques donnent aux images de surface de Scherk-Collins n'importe quelle texture, tels du bois et ses fibres, du cuivre brillant, de la peau de lézard ou du tissu. Les images imprimées des sculptures virtuelles sont indiscernables de photographies des sculptures réelles. Mieux même, un casque de réalité virtuelle permet de «tourner autour» des sculptures et d'en avoir une impression tridimensionnelle.

Doit-on alors matérialiser les sculptures ? Les sculptures virtuelles ne suffisent-elles pas ? La plupart des artistes traditionnels répondraient sans doute par la négative, mais qu'en diront les générations futures, familiarisées depuis leur naissance avec les systèmes de réalité virtuelle ? B. Collins est catégorique : «En tant qu'espèce ayant évolué pour la fabrication et l'usage des outils, les êtres humains ont une préférence esthétique pour les objets d'art faits à la main, et ils auront toujours besoin d'eux en tant que révélateurs de notre nature.» En d'autres termes, le réel est imbattable !

JOUEUR B	JOUEUR A	
	B coopère et gagne 3	B coopère et gagne 0
	A coopère et gagne 3	A trahit et gagne 8
	B trahit et gagne 8	B trahit et gagne 1
	A coopère et gagne 0	A trahit et gagne 1

Le dilemme du renvoi d'ascenseur

JEAN-PAUL DELAHAYE • PHILIPPE MATHIEU

Doit-on se sacrifier à tour de rôle dans de nombreuses confrontations comme les ventes aux enchères ou les élections ?

Situation ambiguë : je suis face à un inconnu au rez-de-chaussée de cette grande tour, devant ce petit ascenseur à une seule place dont la porte est ouverte. Il n'y a pas de bouton pour le rappel lorsqu'il sera monté, et je n'ai pas du tout, mais alors pas du tout, envie de gravir les huit étages à pied. L'inconnu me dit : « Laissez-moi passer en premier, car, arrivé en haut, je vous renverrai l'ascenseur. »

Dois-je accepter ? Pourquoi devrais-je le croire et accepter qu'il passe devant moi ? D'ailleurs tiendra-t-il sa promesse si je le laisse passer ? C'est le dilemme du renvoi d'ascenseur.

Le problème est-il d'essence uniquement psychologique ? Non, car il peut être aussi mathématisé ! L'étonnant est que son étude mathématique, lorsque nous imaginons que nous devons y jouer à de multiples reprises avec toutes sortes de gens, fasse ressortir de multiples aspects inattendus. Cette variante du dilemme itéré du prisonnier (voir une synthèse à propos de ce dilemme dans le dossier *Pour la science* sur Les mathé-

matiques sociales) possède des propriétés remarquables : la plus étonnante est que certaines stratégies optimales font intervenir un choix au hasard !

Nous verrons aussi que, même dans le cas le plus simple, quand nous voulons jouer contre quelqu'un qui adopte le même comportement que nous, nous sommes conduits à des calculs subtils : les mathématiques sociales ne se réduisent pas toutes à des statistiques et à des règles de trois...

DILEMMES DU PRISONNIER ET DE L'ASCENSEUR

Fixons d'abord les règles du jeu abstrait que nous tirons de ce problème de l'ascenseur. À chaque rencontre, chacun des deux participants, désignés par A et B, doit faire un choix : soit il coopère, ce que nous désignons par c (comme *coopérer*), soit il trahit, ce que nous désignons par t (comme *trahir*). Ce double choix est dénommé une *rencontre*. Il y a ainsi quatre rencontres possibles, que nous notons $[c,c]$, $[c,t]$, $[t,c]$ et $[t,t]$, la première

lettre désignant le choix de A, la seconde celle de B. Une *partie* est constituée d'une succession de rencontres. Les choix faits à chaque rencontre le sont simultanément, et la seule information dont dispose un joueur pour décider de ce qu'il joue à la rencontre numéro n est celle du passé des rencontres (par exemple, après trois rencontres $[c,c]$ $[t,t]$ $[t,c]$). Le nombre de rencontres d'une partie n'est pas fixé à l'avance, mais on supposera qu'il y en a plusieurs (cinq au moins).

• Lorsque l'un des joueurs trahit (t) et que l'autre coopère (c), correspondant à une rencontre $[t,c]$, A, qui a trahi, gagne 8 points et B, qui a coopéré, n'en gagne aucun (ce que l'on désigne par $g(tc) = 8$, $g(ct) = 0$, g étant l'initiale de gain) ; dans notre exemple imagé, l'une des deux personnes est montée dans l'ascenseur en prenant l'autre par surprise. Les huit points gagnés correspondent à la satisfaction du personnage qui, après avoir trahi les règles du savoir-vivre, se fait traquer sans effort jusqu'en haut. Celui qui reste en bas alors qu'il voulait coopérer n'a aucun point, car, non seulement il reste



1a. Rencontre $[t,c]$. 8 points pour celui qui monte, 0 pour celui qui reste en bas : le crime paie.

1b. Rencontre $[t,t]$. 1 point pour chacun des deux vindicatifs : la dispute ne paie pas.

1c. Rencontre $[c,c]$: 3 points pour chacun des deux compères : frustrés, mais amicaux.

sur place, mais il a dû accepter la vexation de s'être fait surprendre par l'autre.

- Lorsque les deux joueurs trahissent (rencontre $[t, t]$), chacun gagne un point ($g(t) = 1$). Dans ce type de rencontre, les deux joueurs se battent pour monter dans l'ascenseur, aucun ne voulant céder, et, après avoir perdu du temps et avoir échangé des coups, ils renoncent et montent à pied.

- Lorsque les deux joueurs coopèrent (rencontre $[c, c]$), chacun gagne 3 points ($g(c) = 3$). C'est le cas où, sans se disputer, ils comprennent rapidement qu'aucun ne cédera et donc renoncent.

Les valeurs des coefficients pourraient être différentes, l'important, pour qu'il y ait dilemme de l'ascenseur, est que : $g(tc) > g(cc) > g(tt) > g(ct)$, ce qui est naturel, et aussi que $\{g(tc) + g(ct)\} / 2 > g(cc)$, ce qui est le cas ici avec : $g(tc) = 8$, $g(cc) = 3$, $g(tt) = 1$, $g(ct) = 0$.

Si l'immeuble, au lieu d'avoir 8 étages, en avait 20, des coefficients mieux choisis seraient sans doute : $g(tc) = 20$, $g(cc) = 3$, $g(tt) = 1$, $g(ct) = 0$. Si la dispute dans le cas d'une partie $[t, t]$ était rapide et peu violente, on choisirait peut-être $g(tc) = 8$, $g(cc) = 2$, $g(tt) = 1$, $g(ct) = 0$.

Le problème classique dénommé *Dilemme du prisonnier* est très proche et correspond au choix $g(tc) = 5$, $g(cc) = 3$, $g(tt) = 1$, $g(ct) = 0$ (le gain qu'on tire en trahissant quelqu'un qui souhaite coopérer est moins important). La première série d'inégalités $g(tc) > g(cc) > g(tt) > g(ct)$ est vérifiée, mais pas la seconde, qui y est inversée : $\{g(tc) + g(ct)\} / 2 < g(cc)$.

Il s'agit, dans les deux cas, d'un dilemme, car l'intérêt individuel de chacun est d'obtenir $g(tc)$ (c'est le plus grand des coefficients). Toutefois, si chaque joueur se laisse tenter et trahit, la rencontre $[t, t]$ ne rapporte qu'un seul point à chaque joueur, ce qui collectivement est le pire des choix.

Cette inversion d'une inégalité entre le dilemme du prisonnier et celui de l'ascenseur change beaucoup le problème. L'inégalité $\{g(tc) + g(ct)\} / 2 > g(cc)$ signifie que, dans une série de parties successives, les deux joueurs ont intérêt à jouer alternativement $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$, etc., car cela leur rapporte en moyenne $\{g(tc) + g(ct)\} / 2$ alors que, s'ils jouent $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$..., ils ne gagneront en moyenne que $g(cc)$ points par rencontre. Avec ce choix alternatif de coefficients, les joueurs gagnent 4 points en moyenne avec des séries $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$... et 3 en moyenne avec des séries $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$...

L'avantage de la première méthode est encore accru dans le cas d'un immeuble à 20 étages. À l'inverse, dans le cas du dilemme du prisonnier, il est opti-

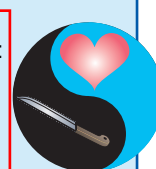
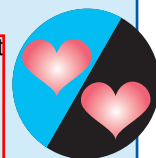
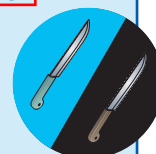
2. DISPUTE, HASARD, COOPÉRATION SIMPLE, MÉTACOOPÉRATION

(i) Une partie où chaque joueur tente de gagner les huit points que rapporte une rencontre $[t, c]$ conduit chacun à de mauvais résultats. Dans une partie composée de dix rencontres : $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$ $[t, t]$, le nombre de points gagnés par le premier est $1+1+1+1+1+1+1+1+1+1 = 10$, et le nombre de points gagnés par le second est $1+1+1+1+1+1+1+1+1+1 = 10$.

(ii) Une partie où chaque joueur «coopère» sagement avec l'autre est déjà plus rémunératrice : $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$. Le nombre de points gagnés par le premier est $3+3+3+3+3+3+3+3+3+3 = 30$, et le nombre de points gagnés par le second est $3+3+3+3+3+3+3+3+3+3 = 30$.

(iii) Une partie où chaque joueur joue au hasard donne, par exemple, $[c, c]$ $[c, t]$ $[t, t]$ $[t, c]$ $[c, c]$ $[t, c]$ $[t, t]$ $[c, c]$ $[t, t]$. Le nombre de points gagnés par le premier est $3+0+1+8+1+3+8+1+3+1 = 29$, et le nombre de points gagnés par le second, $3+8+1+0+1+3+0+1+3+1 = 21$.

(iv) Une partie où les joueurs jouent «en opposition de phase» correspond à une entente de niveau supérieure, la métacoopération : $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$. Le nombre de points gagnés par le premier est $0+8+0+8+0+8+0+8+0+8 = 40$, et le nombre de points gagnés par le second est égal à $8+0+8+0+8+0+8+0+8+0 = 40$.



mal de jouer $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$... : la coopération mutuelle est encouragée par les valeurs des coefficients.

LA MÉTACOOPÉRATION

Dans une longue série de rencontres au dilemme de l'ascenseur, pour gagner beaucoup de points (ce qui, bien sûr, est le but), il faut réussir à organiser une alternance qui peut être à deux temps $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$... ou plus complexe $[c, t]$ $[c, t]$ $[t, c]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$... ou plus compliquée encore. Ce type d'alternances n'est pas optimale dans le dilemme du prisonnier, mais favorable dans le dilemme de l'ascenseur : c'est une sorte de coopération de niveau supérieur, que nous nommerons *métacoopération*. Pour gagner des points au jeu du dilemme de l'ascenseur comme au dilemme du prisonnier, il faut absolument éviter les rencontres $[t, t]$. On peut tenter de se mettre d'accord avec son partenaire pour jouer $[c, c]$ $[c, c]$ $[c, c]$..., c'est la coopération simple qui est idéale au dilemme du prisonnier et assez bonne au dilemme de l'ascenseur. Toutefois le plus rentable au dilemme de l'ascenseur est de mettre en place la métacoopération $[c, t]$ $[t, c]$ $[c, t]$ $[t, c]$... La coopération est vraiment délicate, car il faut que l'un des joueurs accepte de perdre au premier coup, en espérant que son partenaire lui «renverra l'ascenseur».

Ce dilemme est-il fréquent dans la vie courante ? Sans doute bien plus qu'on ne le croit, et nous pensons que c'est faute

d'avoir su précisément le distinguer du dilemme du prisonnier qu'on a été parfois déçu de ne pas retrouver, dans le monde réel, ce qu'on modélisait par des simulations informatiques.

Voici une liste de situations dont la modélisation semble plus satisfaisante par le dilemme du renvoi d'ascenseur que par le dilemme du prisonnier.

Élections avec deux candidats d'un même camp

Deux candidats du parti d'extrême-centre veulent se présenter à la prochaine élection présidentielle. Bien sûr, il y a aussi des candidats d'autres partis. Les divers cas sont :

- $[c, c]$. Les deux candidats se présentent, mais restent corrects, c'est à dire ne cherchent pas à se discréditer mutuellement, ne publient pas de tracts injurieux, etc. On évalue alors que chacun a 30 pour cent de chances d'être élu. Les voix correspondant à l'électorat de leur formation se répartissent équitablement sur les deux candidats.

- $[t, t]$. Les deux candidats se présentent, mais entrent en compétition agressive, ce qui nuit à chacun. Leur campagne fait fuir des électeurs de leur camp, et finalement tous deux sont également pénalisés par cette confrontation publique. On évalue que chacun ne dispose plus que de 10 pour cent de chances d'être élu.

- $[t, c]$. Seul le premier candidat est agressif, alors que l'autre ne l'est pas

3. JOUER CONTRE SOI-MEME EST DIFFICILE

(A) **Donnant-donnant** : je choisis de coopérer (*c*) au premier coup d'une partie, ensuite je choisis, au coup numéro *n*, ce que l'adversaire a joué au coup numéro *n-1*. **Donnant-donnant** ne joue pas très bien contre elle-même, car elle joue des parties : $[c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c] [c,c]$.

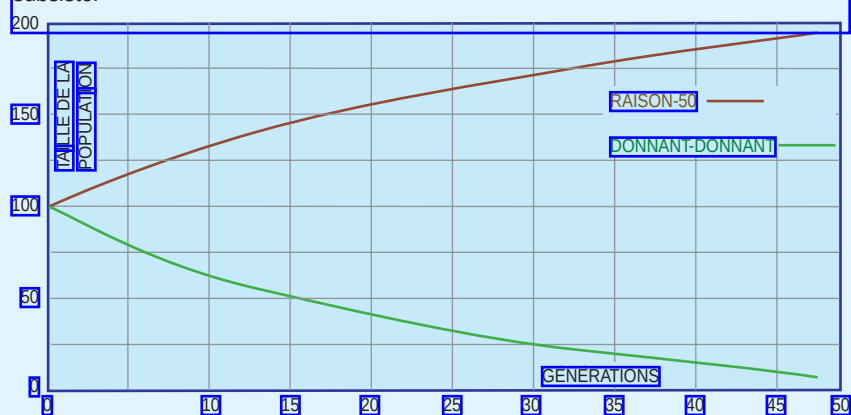
(B) **Raison-50** : tant qu'aucun coup du passé n'a été de type $[c,t]$ ou $[t,c]$, je choisis au hasard *c* ou *t* avec 50 pour cent de chances pour chacun ; ensuite je joue toujours l'inverse de mon coup précédent.

Raison-50 contre elle-même joue des parties du type : $[c,c] [t,t] [t,t] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c]$... Après une période de recherche de déphasage (qui s'étend ici sur trois échanges), les deux exemplaires de **Raison-50** qui se rencontrent jouent en "opposition de phase", ce qui est le mieux possible et correspond à une parfaite métacoopération.

(C) Le simple fait de bien jouer avec elle-même conduit **Raison-50** à battre **Donnant-donnant** en tournois. Si la partie est assez longue, la période de recherche de déphasage peut être négligée et donc, en moyenne par coup, on a le tableau de résultats :

	Donnant-donnant	Raison-50	Total
Donnant-donnant	3	4	7
Raison-50	4	4	8

Ce tableau laisse prévoir ce qui se passe en compétition écologique (100 exemplaires de chaque stratégie sont mis dans une même arène, et chaque exemplaire rencontre chaque autre ; le nombre de points gagnés dans ce combat généralisé détermine les effectifs de la génération suivante ; on s'arrange pour que l'effectif total reste constant). Au bout de 50 générations, plus aucun exemplaire de **Donnant-donnant** ne subsiste.



(ce second candidat fait exprès de mener une mauvaise campagne, voire renonce à se présenter et apporte son soutien au premier). La campagne ne fait pas fuir d'électeurs du parti d'extrême-centre vers les autres partis, et donc celui qui joue *t* a plus de chances de se faire élire que dans le cas $[c,c]$ ou dans le cas $[t,t]$. On évalue à 0 pour cent les chances de celui qui joue *c*, et à 80 pour cent les chances de celui qui joue *t*. Au total, on retrouve donc les coefficients 3, 1, 8, 0 multipliés par 10 pour cent. Bien sûr, une évaluation dans un cas réel donnerait des valeurs différentes, mais elles satisferaient sans doute les inégalités qui caractérisent le dilemme de l'ascenseur.

Dans un tel cas, il est clair que l'entente pour céder le pas à tour de rôle (la métacoopération) est le comportement collectif le plus raisonnable. Bien sûr, dans la réalité, celui qui cède le pas en espérant bénéficier plus tard du renvoi d'ascenseur prend un grand risque :

changement de situation politique, apparition de nouveaux candidats, refus de l'autre. Dans le second exemple, l'existence de nombreuses rencontres est plus vraisemblable.

La commission de spécialistes

Dans les commissions de recrutement des universités ou des centres de recherche, le type de marché suivant, implicite ou explicite, est fréquent : « Cette année, je ne défends pas trop mon candidat et te laisse défendre le tien ; l'année prochaine, tu m'aideras en retour à faire passer un jeune pour mon équipe. » Un coup $[c,c]$ est une commission où chacun défend sans excès son candidat. Un coup $[t,t]$ est une commission où chacun se bat violemment pour faire passer son candidat (avec le risque que ce ne soit un troisième candidat que la commission retienne). Un coup $[t,c]$ est une commission où l'un

s'efface devant l'autre pour assurer la victoire du premier en espérant une situation inversée l'année suivante.

Les enchères dans une salle des ventes

Deux collectionneurs se trouvent dans une salle des ventes où sont proposés divers objets qu'ils convoitent : il vaut mieux qu'ils s'entendent et cèdent à tour de rôle, plutôt que se disputer chaque pièce en provoquant une montée, ruineuse et inutile, des enchères. L'accord est du type : « Je te laisse enchérir sur le premier objet qui nous intéresse, sans faire monter les enchères : au second objet, tu me laisseras seul », etc. Un coup $[c,c]$ est une enchère dans laquelle nous essayons pacifiquement d'acquérir l'objet. Un coup $[t,t]$ est une enchère où, excités l'un par l'autre, nous faisons monter déraisonnablement les enchères. Un coup $[t,c]$ est une enchère où l'un s'abstient de monter pour que l'autre puisse acquérir l'objet à un prix pas trop élevé.

L'accès à un bien insécable périodiquement disponible

Ce cas généralise les précédents. La tactique *c* consiste à tenter de se saisir chacun du bien insécable en respectant des règles de loyauté et d'agressivité contrôlée dans le combat. La tactique *t* est de tenter de se saisir du bien sans retenue, en trahissant les accords (implicites ou explicites) qui fixent les moyens normaux ou loyaux de combat.

Un coup $[t,c]$ correspond alors au cas où l'un des combattants fait allégeance à l'autre, ce qui évite que le combat ne dégénère. Dans le monde animal, il est fréquent que des confrontations peu violentes aient lieu entre animaux d'une même espèce jusqu'à ce que l'un des adversaires se soumette et marque son allégeance par une posture convenue.

Un coup $[c,c]$ correspond à un combat peu violent qui dure, avec le risque que la femelle convoitée ne s'éloigne.

Un coup $[t,t]$ correspond à un combat violent risquant de conduire à des blessures graves ou même à la mort.

Dans le cas des combats animaux, la situation ne conduit pas nécessairement à un état de métacoopération (trop complexe et fragile), mais plus fréquemment à la mise en place d'une hiérarchie qui fait que, dans les rencontres suivantes, celui qui a gagné la première fois par abandon de son adversaire gagnera ensuite systématiquement. Nous verrons plus loin que cette situation correspond à l'adoption de stratégies rationnelles non équitables.

Du rififi chez les phages

Récemment Martin Novak, de l'Institute for Advanced Study à Princeton, et Karl Sigmund, de l'Université de Vienne, à la suite d'expériences menées par Paul Turner et Lin Chao, de l'Université du Maryland, ont décrit le cas des virus $\phi 6$ et $\phi H2$ qui infectent une bactérie et adoptent l'un, une stratégie agressive ; l'autre, une stratégie modérée. En mesurant la virulence de chacun des phages (à l'aide d'un marqueur génétique), ils ont calculé les coefficients du jeu que les deux virus jouent les uns contre les autres au sein d'une bactérie infectée. Les coefficients trouvés satisfont exactement la première série d'inégalités indiquée plus haut, ce qui signifie qu'on est en présence d'un dilemme. Le fait constaté que le virus modéré (coopérant) $\phi 6$ est la forme la plus répandue est conforme aux analyses tirées des simulations informatiques menées avec le dilemme du prisonnier. Bien que la situation soit celle d'un dilemme de l'ascenseur, les virus, trop simples, ne réussissent pas à jouer une stratégie de métacoopération qui leur serait la plus profitable. Seule la coopération simple est atteinte, qui entraîne la multiplication des phages $\phi 6$. Il se peut que des analyses plus fines montrent chez d'autres organismes élémentaires des cas de dilemme de l'ascenseur conduisant à une métacoopération, mais ces mesures prouvent déjà que les inégalités décrivant la situation du dilemme de l'ascenseur se produisent naturellement, même chez les organismes les plus simples.

LA STRATÉGIE
DONNANT-DONNANT

Revenons aux jeux abstraits. Les études sur le dilemme du prisonnier ont montré que la stratégie *Donnant-donnant* obtient d'assez bons résultats face à une grande variété d'adversaires. Cette stratégie consiste à coopérer (c) au premier coup d'une partie, puis à choisir, au coup numéro n , ce que l'adversaire a joué au numéro $n-1$. Cette stratégie incite l'adversaire à coopérer tout en ne prenant jamais vraiment de risque, car on démontre que dans une partie, aussi longue soit-elle, l'écart du total des points de *Donnant-donnant* avec son adversaire n'est jamais supérieur à cinq points. Cette fameuse stratégie joue-t-elle encore bien au dilemme de l'ascenseur ?

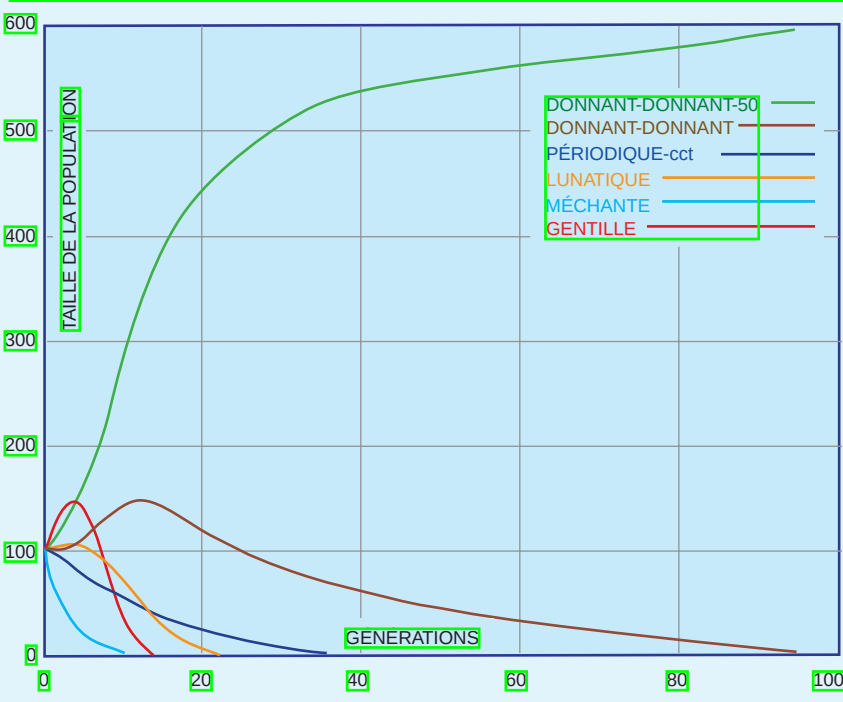
Elle s'en tire correctement. En effet, face à une stratégie où le partenaire coopère tout le temps (c), elle se contentera de ce régime continu de coopération simple ; face à une stratégie agressive (jouant fréquemment t), elle réagira en jouant souvent t, ce qui devrait dissua-

4. UN TOURNOI À 6 : LE DÉTERMINISME N'EST PAS EFFICACE

Voici une compétition écologique avec 6 stratégies.

- 1) **Donnant-donnant** (déjà définie).
- 2) **Donnant-donnant-50** : tant qu'aucun coup du passé n'a été de type $[c,t]$ ou $[t,c]$, je choisis au hasard c ou t, avec 50 pour cent de chances pour chacun ; ensuite, je joue comme donnant-donnant.
- 3) **Périodique-cct** : je joue cycliquement c, c, t, c, c, t...
- 4) **Lunatique** : je joue au hasard c ou t en choisissant avec une pièce de monnaie (50 pour cent de chances pour c et pour t).
- 5) **Méchante** : je joue toujours t.
- 6) **Gentille** : je joue toujours c.

Au bout de 100 générations, seule survit **Donnant-donnant-50**, qui occupe toute l'arène. La stratégie **Donnant-donnant-50**, qui combine à la fois les qualités de **Donnant-donnant** et la recherche efficace d'un déphasage, est l'une des meilleures stratégies connues aujourd'hui pour le jeu du dilemme de l'ascenseur.



der son adversaire de poursuivre, ou en tout cas l'empêcher de marquer beaucoup de points. Enfin, face à une stratégie tentant de mettre en place un régime d'alternance $[c,t]$ $[t,c]$ $[c,t]$ $[t,c]$..., elle acceptera, et chacune profitera des bénéfices procurés par la métacoopération.

Pourtant plusieurs aspects du comportement de *Donnant-donnant* ne sont pas satisfaisants. Face à elle-même, *Donnant-donnant* ne réussit à mettre en place un régime de coopération simple, moins rémunérateur que le régime de métacoopération. En effet, quand une stratégie *Donnant-donnant* joue face à elle-même, la première rencontre est $[c,c]$, ce qui conduit à une nouvelle rencontre $[c,c]$ au second coup, etc. De façon générale, rien dans le comportement de *Donnant-donnant* n'incite son adversaire à alterner les choix c et les choix t, et donc le plus souvent *Donnant-donnant* ne réussira qu'à obtenir une coopération simple.

Il faut être plus subtil pour jouer au dilemme du renvoi d'ascenseur qu'au dilemme du prisonnier. Les deux niveaux de coopérations envisageables et la nécessité d'une bonne coordination compliquent le jeu. Il y a d'ailleurs presque un paradoxe dans le fait que, pour atteindre le niveau de la métacoopération, il faut que l'un des joueurs commence par trahir : en tentant de créer une métacoopération, on risque donc d'effrayer un joueur inquiet, qui craindra qu'on refuse toute coopération. La stratégie *Rancunière* (elle joue toujours c, sauf si l'adversaire a joué t, auquel cas elle se met à jouer t indéfiniment), qui réussit assez bien au dilemme du prisonnier, n'accède jamais au régime de métacoopération. Jouer t peut signifier, soit je refuse de coopérer, soit je tente de mettre en place une métacoopération. Toute stratégie qui ne veut pas se contenter d'un régime de coopération simple doit surmonter cette ambiguïté.

PARTIES OPTIMALES

Le défaut le plus ennuyeux de *Donnant-donnant* est de mal jouer contre elle-même, et c'est réellement un défaut grave. Cela transparaît nettement lorsqu'on utilise, pour comparer les stratégies, ce que l'on appelle les compétitions écologiques : ce sont des compétitions où les stratégies que l'on veut évaluer sont mises dans une arène artificielle ; ensuite, en fonction de leur réussite lors des rencontres qu'elles font deux à deux, leurs effectifs augmentent ou diminuent. Au bout de quelques générations, les mauvaises stratégies ont disparu, et les bonnes occupent tout le terrain. Bien réussir lors d'une telle compétition écologique, c'est envahir l'arène, ce qui signifie qu'on rencontrera souvent des stratégies sœurs (jouant selon les mêmes règles). Bien réussir nécessite donc de bien jouer face à soi-même, et cela *Donnant-donnant* ne sait pas le faire.

Les simulations informatiques (voir les figures 3 et 4) confirment cette faiblesse de *Donnant-donnant* et, mieux encore, un résultat mathématique prouve que *Donnant-donnant* n'est pas bonne et ne peut pas l'être. Pour l'énoncer, nous introduirons certaines notions utiles à la bonne compréhension des dilemmes.

Dénommons *partie optimale* une partie infinie opposant deux stratégies et telle que la limite de la somme des gains moyens ne puisse pas être améliorée. Une partie $[c,c] [c,c] [c,c] [c,c] \dots$ n'est pas optimale, car la limite de la somme des gains moyens est 6. En revanche, une partie $[c,t] [c,t] [c,t] [c,t] \dots$ est optimale, car la limite de la somme des gains moyens est 8. La partie infinie $[c,t] [c,t] [c,t] [c,t] \dots$ n'est toutefois pas équitable, car c'est toujours le premier joueur qui se sacrifie pour que le second marque des points (ce type de parties est le jeu que pratiquent les espèces, où une hiérarchie s'installe entre individus). On introduit donc la notion de *partie optimale équitable* en imposant que le score obtenu soit partagé à parts égales entre les deux joueurs. Les parties selon le schéma de métacoopération $[c,t] [t,c] [c,t] [t,c] [c,t] \dots$ sont optimales équitables. Au dilemme de l'ascenseur, il existe toutes sortes de parties optimales équitables : toutes celles obtenues en répétant périodiquement un schéma quelconque composé du même nombre de $[c,t]$ que de $[t,c]$, et nous en avons déjà cité plusieurs.

Maintenant voici la définition qui va nous intéresser : on dénomme *stratégie rationnelle* une stratégie qui, lorsqu'elle joue contre elle-même, joue toujours des parties optimales. De même, bien sûr, on dénomme *stratégie rationnelle équitable* une stratégie qui, lorsqu'elle joue contre

elle-même, joue toujours des parties optimales équitables. La question est : existe-t-il des stratégies rationnelles et des stratégies rationnelles équitables ?

Au dilemme du prisonnier, toute stratégie qui ne prend jamais l'initiative de trahir (t), et donc en particulier *Donnant-donnant*, est rationnelle équitable (car contre elle-même elle joue la partie optimale équitable $[c,c] [c,c] \dots$). Au dilemme du prisonnier, toute stratégie rationnelle est d'ailleurs automatiquement équitable.

LE HASARD EST INDISPENSABLE

Le dilemme du renvoi d'ascenseur est plus intéressant, car *Donnant-donnant* n'y est plus rationnelle. Ce résultat remarquable prouve la complexité intrinsèque du dilemme de l'ascenseur : pour qu'une stratégie soit rationnelle, il faut qu'elle soit non déterministe (c'est-à-dire qu'elle fasse intervenir le hasard dans ses méthodes de choix de coups).

La démonstration exploite l'idée qu'une stratégie déterministe, quand elle joue contre elle-même, ne joue que des coups $[c,c]$ ou $[t,t]$, lesquels, au dilemme de l'ascenseur, sont moins bons que les coups $[c,t]$ et $[t,c]$. Examinons des exemples de stratégies rationnelles au dilemme de l'ascenseur.

Raison-naïve-50 : tant qu'aucun coup du passé n'a été de type $[c,t]$ ou $[t,c]$, je choisis au hasard c ou t , avec 50 pour cent de chances pour chacun ; ensuite, je joue toujours la même chose. La stratégie *Raison-naïve-50* contre elle-même jouera, par exemple, la partie : $[c,c] [t,t] [t,t] [c,c] [c,t] [c,t] [c,t] [c,t] \dots$

Après une période de recherche de déphasage (qui s'étend sur quatre échanges), les comportements ont été définitivement fixés (ce qui est évidemment désavantageux pour la première, qui se fait exploiter de façon éhontée par la seconde). Quand une *Raison-naïve-50* en rencontre une autre, celle qui perd en premier perd jusqu'à la fin. Si tous les individus d'une espèce animale adoptent une telle stratégie, alors, automatiquement, se mettra en place une hiérarchie stable, ce qui est collectivement intéressant et meilleur même que la coopération simple... même si c'est très injuste.

Raison-naïve-50 est rationnelle, mais n'est pas équitable. Existe-t-il des stratégies à la fois raisonnables et équitables ? Oui, en voici l'exemple le plus simple, que vous avez sans doute deviné.

Raison-50 : tant qu'aucun coup du passé n'a été de type $[c,t]$ ou $[t,c]$, je choisis à pile ou face c ou t ; ensuite, je joue toujours l'inverse de mon coup précédent. *Raison-50* contre elle-même

jouera des parties du type : $[c,c] [t,t] [t,t] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c] [c,t] [t,c] \dots$

Après une période de recherche de déphasage (qui dure ici trois échanges), les comportements sont fixés, mais sans qu'aucun des deux joueurs soit privilégié, car les deux stratégies *Raison-50* alternent leur choix en opposition de phase menant une parfaite métacoopération.

De telles stratégies jouent bien contre elles-mêmes, mais ne jouent pas nécessairement bien contre d'autres qui peuvent exploiter leur comportement trop simple et prévisible. Voici un exemple de stratégie qui mêle l'idée de *Donnant-donnant* et l'idée de la recherche d'un déphasage.

Donnant-donnant-50 : tant qu'aucun coup du passé n'a été de type $[c,t]$ ou $[t,c]$, je choisis à pile ou face (50 pour cent) c ou t ; ensuite j'applique *Donnant-donnant*.

A la place de 50 pour cent, on peut bien sûr utiliser n'importe quelle autre probabilité. C'est ce que nous appellerons les stratégies *Donnant-donnant-X* (où X est la probabilité de jouer c dans la période de recherche de déphasage). La longueur moyenne de la recherche du déphasage est bien sûr la plus courte pour X égal à 50, mais, en choisissant cette valeur, on joue souvent des rencontres $[t,t]$ qui sont coûteuses. Le calcul montre qu'il vaut mieux allonger la période de recherche d'un déphasage pour qu'il soit moins coûteux. Le coût moyen d'une recherche de déphasage est minimum pour la probabilité X égal à 56,69640 pour cent, nombre qu'on obtient en étudiant la fonction «coût du déphasage» et en recherchant la valeur pour laquelle cette fonction atteint son minimum.

Au jeu du dilemme du renvoi d'ascenseur, non seulement pour marquer des points il faut être non déterministe, mais de plus il faut savoir résoudre des problèmes de minimisation. Décidément, prendre l'ascenseur est devenu bien compliqué !

J.-P. DELAHAYE, P. MATHIEU et B. BEAUFILS, *The Iterated Lift Dilemma*, in *Computational Conflicts* (R. Dieng et J. Müller ed.), Springer-Verlag, Berlin, 2000.

M. NOWAK et K. SIGMUND, *Phage-lift for Game Theory*, in *Nature*, pp. 367-368, avril 1999.

P. TURNER et L. CHAO, *Prisonner's Dilemma in RNA virus*, in *Nature*, pp. 441-443, avril 1999.

Sur le dilemme itéré du prisonnier et la théorie des jeux, on consultera le dossier *Pour la Science : Les mathématiques sociales*, juillet 1999.

On trouvera à l'URL www.lifl.fr/IPD/ des logiciels et des articles sur les problèmes de dilemme.



STUDIO VAGABOND

Une affaire de dimensions

ROLAND LEHOUCQ

Existe-t-il des principes physiques permettant de déduire les dimensions de notre monde ?

Dans son *De Caelo* («Du ciel»), Aristote discute le nombre de dimensions de l'espace et propose un argument inspiré des pythagoriciens : ces derniers voyaient dans le nombre trois, le nombre du Tout, car il représentait le commencement, le milieu et la fin. Dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, publié en 1632, Galilée apporte un argument géométrique affirmant qu'il n'y a pas plus de trois dimensions, car par un point ne peuvent concourir plus de trois droites perpendiculaires deux à deux.

La ligne de pensée que je vais suivre est inspirée du philosophe Emmanuel Kant pour lequel la tridimensionnalité de l'espace résultait de la loi de gravitation universelle d'Isaac Newton selon laquelle les corps s'attirent en raison inverse du carré de leur distance. Avec Kant, pour la première fois, le problème de la tridimensionnalité de l'espace est envisagé non pas du point de vue métaphysique ou géométrique, mais par une considération physique qui interprète la forme d'une loi d'interaction.

La proposition de Kant peut être généralisée pour un espace à plus de trois dimensions. Dans un espace à N dimensions, la gravitation est une loi qui varie comme la distance à la puissance un moins la dimension de l'espace (loi en r^{1-N}). Ainsi, la loi de gravitation de Newton est une conséquence directe de la tridimensionnalité de notre espace. Dans un espace à quatre dimensions, la force de gravitation serait proportionnelle au cube de la distance.

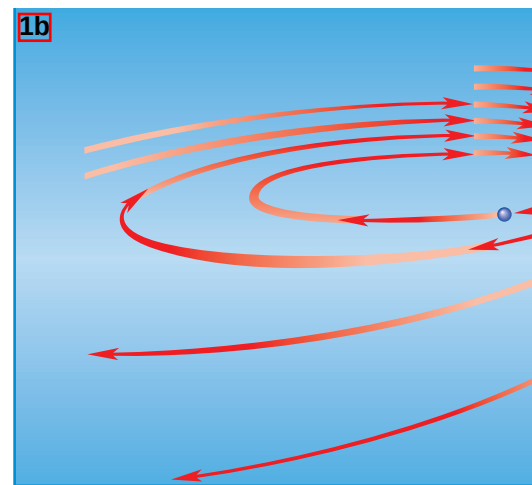
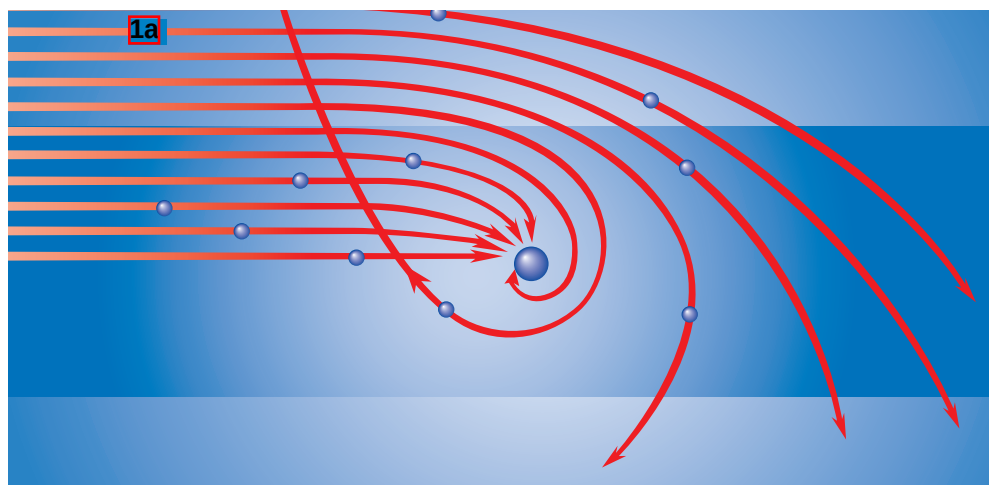
En 1917, le physicien allemand Paul Ehrenfest publie un article fondamental dans lequel il s'intéresse aux effets sur le mouvement des masses d'une loi d'interaction dans un espace à plusieurs dimensions. Il montre que le problème de deux corps en interaction gravitationnelle généralisée à N dimensions ne possède de solutions stables et bornées à la seule condition que la dimension de l'espace soit égale à deux ou trois. De surcroît, si l'on veut exprimer que l'interaction est évanescence à l'infini et que l'on impose une énergie potentielle d'interaction nulle lorsque la

distance entre les corps tend vers l'infini, seul le cas tridimensionnel donne des orbites stables.

L'absence de solutions stables dans un espace à quatre dimensions peut être représentée sur une feuille de papier : c'est une projection bidimensionnelle, mais les quantités physiques, comme les distances, résultent des calculs faits en dimension quatre. Un ensemble de particules tombent sur une masse ponctuelle. Ces particules ont toutes la même masse et la même vitesse initiale, mais leur position initiale diffère. Celles qui sont situées hors de la région ombrée s'échappent à l'infini, tandis que les autres tombent en spirale sur le corps central (voir la figure 1a). Cette situation est nettement différente du cas d'un espace à trois dimensions où nous aurions des orbites ouvertes allant à l'infini (parabole et hyperbole) ou des orbites elliptiques fermées et stables (voir la figure 1b). Si l'on considère que le développement de la vie a nécessité des millions d'années, il est heureux que notre monde ait trois dimensions.

La dimensionnalité de l'espace touche aussi le monde des atomes. Dans l'espace à trois dimensions, la force entre deux charges est en fonction inverse du carré de la distance entre les charges. La matière qui nous entoure est indubitablement

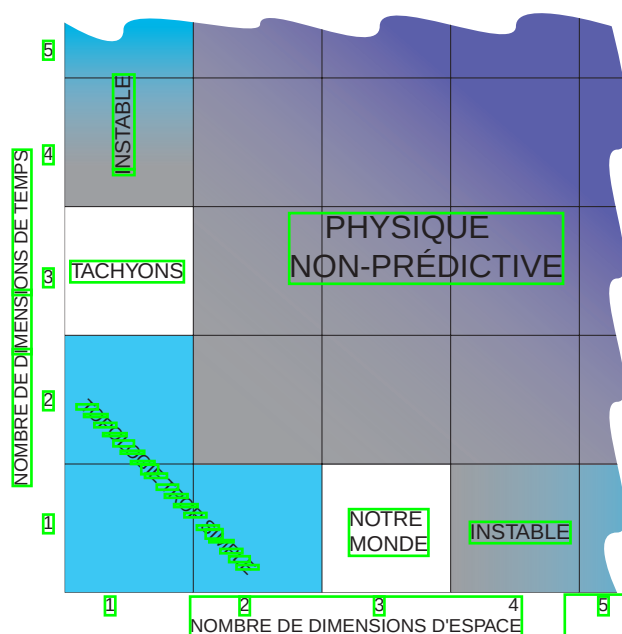
1a. Dans un monde à quatre dimensions, la force de gravité est telle que les objets qui s'approchent à différentes distances d'un astre ont deux options : s'écraser dessus (ceux qui partent de la zone ombrée) ou s'échapper à l'infini. Dans ce monde, les orbites stables n'existent pas. **1b.** Dans notre monde tridimensionnel, les objets qui s'approchent d'un astre peuvent chuter dessus, mais il peuvent aussi s'échapper à l'infini ou rester en orbite autour de l'astre.



stable. Cela signifie physiquement que le niveau fondamental d'un atome a une énergie finie : l'électron ne tombe pas sur le noyau, ni ne s'échappe spontanément à l'infini. En appliquant la théorie atomique de Bohr au cas d'un atome d'hydrogène évoluant dans un espace à plus de cinq dimensions, on montre que le rayon de l'orbite électronique décroît lorsque son énergie augmente : l'électron tombe sur le noyau ! Dans un espace à quatre dimensions, la situation devient ambiguë, car il n'existe plus d'échelle caractéristique de longueur dans le système, comme l'est le rayon de Bohr pour un atome d'hydrogène habituel. Ainsi, on peut affirmer que les atomes stables, et donc la chimie et les chimistes eux-mêmes, ne peuvent exister que si l'espace possède au plus trois dimensions.

Enfin, un espace bidimensionnel, et *a fortiori* unidimensionnel, est sensiblement moins intéressant, car d'éventuels organismes devraient faire face à des problèmes topologiques insurmontables. Par exemple dans notre monde, on peut percer un objet, d'où la possibilité des tubes digestifs. Si l'on tente de faire la même chose dans un espace à deux dimensions, l'objet est coupé en deux, ce qui est gênant. De même, en deux dimensions, deux neurones ne pourraient se croiser (le livre *Flatland*, de E.A. Abott décrit les possibilités de vie dans un tel monde). La Nature aurait-elle conspiré pour imposer trois dimensions spatiales ?

Nous percevons le temps comme unidimensionnel, parce que nos pensées semblent se succéder les unes après les autres dans un ordre bien défini. Cet



3. Selon les dimensions de l'espace et du temps, des problèmes surgissent. Lorsque la dimension spatiale ou temporelle est supérieure à un, la physique n'est plus prédictive. Dans le cas où les dimensions sont supérieures à trois, les atomes sont instables. Enfin dans le cas où les dimensions sont inférieures à trois, on tombe sur des problèmes de complexité : problèmes topologiques et absence de gravitation. Avec trois dimensions de temps et une dimension d'espace, seuls les tachyons, des particules qui vont plus vite que la lumière, existeraient.

argument est subjectif. Le temps pourrait paraître unidimensionnel sans l'être réellement, un peu comme nous perdons la vision en relief en fermant un œil : nous sommes alors entourés d'objets plats et seule l'habitude permet d'apprécier encore les distances.

LA LIGNE DE TEMPS

De nombreux aspects de la physique seraient assez différents avec un temps qui n'est pas unidimensionnel. Par exemple, l'énergie ne serait plus un nombre, mais un vecteur indiquant la direction temporelle du déplacement, au même titre que la quantité de mouvement d'un mobile est un vecteur indiquant dans quelle direction spatiale il se déplace. Comme la quantité de mouvement se conserve lorsque le mobile n'est soumis à aucune force, la direction temporelle suivie serait aussi une constante du mouvement. En d'autres termes, si deux observateurs se déplaçant selon des directions temporelles différentes se rencontrent, ils se sépareraient inéluctablement pour suivre leur trajectoire temporelle respective, incapable de rester ensemble. Du point de vue d'un observateur, l'autre apparaîtrait et disparaîtrait aussitôt...

Autre conséquence importante de la multidimensionnalité temporelle : certaines particules ne seraient plus stables. Dans un monde comme le nôtre, une particule ne peut se désintégrer que si la somme

des masses au repos (la masse lorsque la particule est immobile) des particules produites est inférieure à la masse au repos de la particule initiale. Cette condition, qui confère leur stabilité au proton et à l'électron, disparaît dans un monde à plus d'une dimension temporelle. Par exemple, un proton pourrait se désintégrer en un neutron, un positon et un neutrino ; un électron pourrait se transformer en un neutron, un antiproton et un neutrino. La matière que nous connaissons ne serait plus stable.

LA FIN DE L'INDUCTION

Max Tegmark, de l'Université de Pennsylvanie, a montré récemment que les équations régissant la physique d'un monde ayant plus d'une dimension temporelle ne peuvent pas être utilisées pour prédire l'évolution future d'un système. Autrement dit, la physique ne serait plus prédictive et Newton deviendrait incapable de dire si la pomme qui se détache de l'arbre s'écrasera au sol ou partira dans les étoiles.

Ainsi, les physiciens imaginent un monde à une dimension d'espace et trois dimensions de temps où les déplacements se font toujours à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière (un monde de tachyons) et où la physique n'est pas prédictive. Si, au vu de ces pérégrinations dans ces mondes étranges, nous nous disons que notre monde semble bien le meilleur possible, des êtres de lumière se disent peut-être la même chose ailleurs ou dans un autre temps. À l'instar des pauvres hères, enfermés dans la caverne de Platon, ne serions-nous que des esclaves confinés dans trois dimensions par une volonté supérieure ?

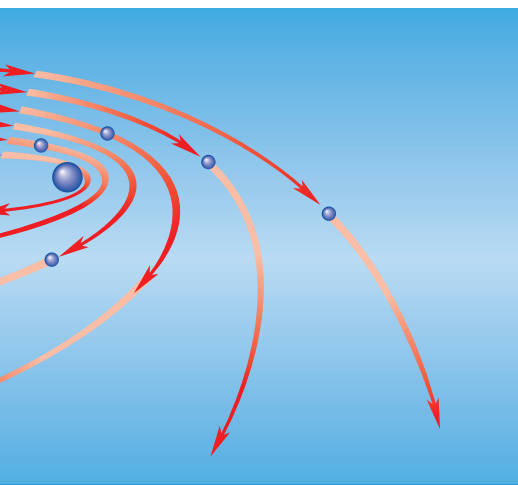
Roland LEHOUQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

M. TEGMARK, On the dimensionality of spacetime, in Classical and Quantum Gravity, vol. 14, p. L69, 1997.

T. BANCHOFF, La quatrième dimension, Pour la Science, 1996.

E.A. ABOTT, Flatland, Denoël, 1984.

P. EHRENFEST, In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?, in Proceedings of the Royal Academy of Amsterdam, vol. 20, p. 200, 1917.



Botanique

De la fécondation croisée des Orchidées par les Insectes et des bons résultats du croisement

Charles Darwin, traduction française de L. Rerolle (1870). Éditions Sens, 1999.

Charles Darwin fit paraître cet ouvrage en 1862, trois ans après l'*Origine des espèces*, œuvre fondatrice de la théorie qui, enrichie et appuyée par les découvertes ultérieures de génétique, de biochimie, de biogéographie, etc., reste sous le nom de néodarwinisme la base essentielle de la pensée évolutionniste. On sait que l'auteur s'est révélé ici non seulement théoricien et philosophe de la Nature, mais aussi minutieux observateur et ingénieux expérimentateur. Fondées sur l'«importance des plus minimes détails de structure», ses descriptions de l'organisation des fleurs de nombreuses orchidées européennes et tropicales, accompagnées de figures précises, et l'analyse des processus de leur pollinisation entomogame, suscitent l'admiration. En se référant éventuellement à l'index thématique et systématique en fin d'ouvrage, on trouvera maints exemples de ces observations et expériences, dont les résultats sont soigneusement confrontés à ceux de ses fils et de nombreux autres botanistes avec qui Darwin correspondait. Les données qu'il rassembla sont définitives ; elles ont d'ailleurs été souvent reprises dans les ouvrages les plus récents.

La pertinente analyse liminaire de Pascal Acot vise à montrer que nombre de biologistes, à l'époque de Darwin ou plus récemment, lui ont fait un mauvais procès en l'accusant de téléologie, ce travers qui prête une intention finaliste à des objets naturels. On doit cependant constater que Darwin, au moins par la façon dont il présente les faits observés, qualifiés presque à chaque page de «merveilleux» ou d'«admirables», ne peut s'empêcher de passer du comment au pourquoi, et reste imprégné des idées finalistes qui régnaient à son époque (idées ou tournures rédactionnelles qui subsistent d'ailleurs aujourd'hui dans nombre de publications naturalistes). Se retrouvent fréquemment des formules comme «la nature ne saurait souffrir une telle prodigalité» ou «cette position de la fleur,

très remarquable, est réalisée dans un but particulier» (à propos de *Malaxis paludosa*, auquel il consacre plus de huit pages).

De même, le «bon résultat» de l'allogamie est considéré par Darwin comme une «loi universelle de la nature» : celle-ci «nous dit de la manière la plus éloquente qu'elle a horreur de la fécondation de soi par soi perpétuelle» : il a fallu attendre les données actuelles de la génétique pour que soient compris les effets défavorables de l'autogamie dans un grand nombre de cas (mais non pour tous), ce qui justifie l'opinion de Darwin, mais non son énoncé. Celui-ci bute cependant sur le fait que des orchidées autogames, dont il cite de nombreux exemples, ne sont pas moins fertiles et abondantes que les autres. En scientifique objectif, il constate par exemple l'efficacité reproductrice de l'autogamie chez *Ophrys apifera*, mais manifeste à cet égard «une telle surprise» qu'il vérifie minutieusement le fait durant plusieurs années et sur des centaines de fleurs. Si «le cas est aussi embarrassant que possible», il ne peut s'empêcher de croire qu'«à de longs intervalles de temps» une fécondation croisée permette à cette espèce d'«harmoniser ses fonctions génératrices» avec



Ophrys apifera fut minutieusement étudiée par Charles Darwin.

celles des autres orchidées, «puisque les espèces autogames ont en général gardé les instruments de ce croisement». Darwin paraît plus satisfait par les résultats de l'étude minutieuse de *Cephalanthera grandiflora*, orchidée également autogame par suite de la germination précoce du pollen dans la fleur encore fermée. L'expérimentation à laquelle il se livre sur les effets comparés des pollinisations précoces et tardives (celle-ci par les insectes, en principe allogame) lui permet d'affirmer que la fécondation directe s'exerce dans cette espèce à «un degré extrêmement imparfait», puisqu'il se forme «sept fois plus de graines mauvaises» dans le premier cas que dans le second.

S'appuyant sur les travaux de Robert Brown, Darwin étudie les homologies dans l'organisation des pièces florales des orchidées. Il montre que, «dans le cours régulier de l'évolution, chaque organe, originellement affecté à la réalisation d'un seul but, s'adapte par changements insensibles à des fonctions très différentes», tout comme un fabricant de machines employant pour sa construction des pièces mécaniques anciennes qu'il modifie en vue de nouvelles fonctions. Cette comparaison illustre le «principe de l'économie d'organisation, rendu si nécessaire par la concurrence vitale qui tend à épargner les organes de chaque être». Cette concurrence, comme chez d'autres espèces, est une évidente nécessité, compte tenu du prodigieux pouvoir de multiplication de la plupart des orchidées.

Pour Darwin, cette concurrence vitale s'exercerait surtout entre les individus dont la réussite dépend de l'apparition de variations héréditaires même minimes. Il évoque cependant, bien que de façon discrète, l'influence sélective des facteurs de l'environnement. Ainsi, si dans une station l'*ophrys* abeille est plus abondant que l'*orchis* pyramidal, «une des principales causes de cette différence est probablement l'exposition de ce lieu, peu favorable aux papillons» (dont le second dépend seul pour sa pollinisation). De même, «en produisant des variations



La *Cephalanthera* à longues feuilles se trouve dans l'ensemble de la France, sauf en Bretagne et dans le Nord.

accidentelles légères qui sont avanta-
geuses à l'organisme dans les conditions
complexes et toujours changeantes où
il peut se trouver, la nature réalise à la
longue des combinaisons admirablement
appropriées» : il y a en germe bien des
idées actuelles sur le rôle des facteurs
écologiques dans l'évolution.

P. Acot montre qu'en publiant cet
ouvrage, Darwin a cherché à faire triom-
pher ses conceptions scientifiques, après
les violentes polémiques suscitées par
l'*Origine des espèces*. L'étude des orch-
idées lui permet d'écrire avec de solides
arguments : «Pouvons-nous être satis-
faits d'admettre que chaque orchidée a
été créée d'après un certain type idéal
et que le tout-puissant Créateur n'a pas
voulu s'en écarter ? N'est-il pas plus
simple et plus intelligible d'admettre
que toutes les orchidées doivent leurs
caractères communs à leur descendance
de quelque plante monocotylédone, et
que la structure présente de leur fleur,
si merveilleusement changée, a été la
suite de lentes modifications, chaque
modification utile ayant été fixée pendant
le cours des changements incessants
auxquels le monde a été exposé ?»

On doit se réjouir de la réédition soi-
gnée (en fac-similé) de cet ouvrage mar-
quant du fondateur de l'évolutionnisme
scientifique. Sur sa couverture figure la
photographie classique, due à Marcel
Lecoufle, du pollinisateur d'*Angraecum
sesquipedale*, papillon découvert long-
temps après que Darwin en ait prévu
l'existence : anecdote souvent reprise,
mais qui ne doit pas faire oublier le
reste de l'œuvre. Regrettons seule-
ment que la technique de brochage de
ce livre en rende le maniement peu aisé ;
mais le lecteur sera amplement récom-
pensé par l'effort à faire : il faut redé-
couvrir Darwin.

Marcel BOURNÉRIAS

de fantasmes et ont été le prétexte à tant
de divagations, parfois plaisantes, par-
fois sinistres, qui ont elles-mêmes
influencé le développement de la science
anthropologique.

En ce domaine, il n'est pas simple
de débrouiller l'écheveau des interac-
tions entre la connaissance scientifique,
les préjugés philosophiques, religieux
ou politiques qui l'influencent, et les
fictions qui en sont issues. Les exemples
étudiés par l'auteur sont variés, des clas-
sifications raciales du XVIII^e siècle à la
paléontologie dans l'œuvre de Flaubert,
en passant par le roman préhistorique
en tant que genre littéraire, et par les
considérations des préhistoriens sur
l'érotisme et la sexualité de nos ancêtres.
Le résultat est une mosaïque, qui montre
à la fois combien l'interprétation scien-
tifique est colorée par des facteurs exté-
rieurs (ce qui, bien sûr, n'est pas à
proprement parler une découverte) et
à quel point ces influences sont variées.
La réciproque est vraie : la science
anthropologique (au sens large) est,
depuis longtemps, une source féconde
d'inspiration pour les poètes et pour
les romanciers. Le chapitre sur le roman
préhistorique, qui nous rappelle que
ce genre ne se limite pas à Rosny aîné
et à sa *Guerre du feu*, l'illustre bien ;
l'étude sur les sources d'inspiration
anthropologique chez Victor Hugo révèle
des influences plus subtiles.

On peut faire quelques petits repro-
ches à ce livre. L'historienne est souvent
fâchée avec la géographie, plaçant dans
l'Ariège les grottes de Bize (qui sont dans
l'Aude), dans la Dordogne celle de Les-
pugue (qui est en Haute-Garonne), et
dans la Haute-Garonne l'abri de Laussel
(qui est en Dordogne). Plus critiquable
est l'affirmation selon laquelle «l'œuvre

de Cuvier apparaît bien à certains égards
comme une tentative pour concilier le
savoir scientifique avec une lecture
plus ou moins littérale du texte de la
Genèse». C'est certes là une interpré-
tation classique des vues de Cuvier, mais
cette image de «géologue bibliste» a été
remise en cause, avec arguments à l'ap-
pui, par les travaux de plusieurs histo-
riens des sciences, dont Dorinda Outram
et Martin Rudwick : Cuvier n'a vraisem-
blablement pas eu les fortes convic-
tions religieuses qu'on lui prête souvent,
et sa conception du Déluge s'appar-
e sans doute plus à une démythifi-
cation qu'à une intrusion de la religion
dans la science.

Dans l'ensemble, toutefois, ce livre
se lit avec plaisir, car il regorge de
remarques justes et souvent originales.
Sans être jamais acerbe, Cl. Cohen se
livre, à l'occasion, à des critiques plutôt
sévères : ainsi lorsqu'elle s'interroge
sur la validité des interprétations psy-
chanalytiques de l'art paléolithique chères
à André Leroi-Gourhan et si en vogue
parmi les préhistoriens entre 1950 et
1975.

Outre des épisodes pittoresques de
l'histoire de l'anthropologie préhistorique,
le lecteur retiendra de ce livre que la
science ne se développe pas dans un
espace étanche et qu'elle est soumise
à toutes sortes d'influences culturelles,
en même temps qu'elle imprime sa propre
marque à la culture ambiante. Les théo-
ries scientifiques sont, dans une certaine
mesure, filles de leur époque et de leur
environnement, et Cl. Cohen a raison de
faire remarquer, par exemple, combien
la théorie de l'«Ève africaine», qui fait
descendre tous les hommes modernes
d'une femme africaine ayant vécu il y a
quelque 200 000 ans, est politiquement

Anthropologie

L'homme des origines

Claudine Cohen, Éditions du Seuil,
1999.

Dans ce recueil d'essais, dont la
plupart sont inédits, Claudine
Cohen explore les liens complexes
entre les idées sur l'origine de
l'homme et l'imaginaire de ceux qui s'y
sont intéressés. Le terrain à parcourir est
vaste, car peu d'autres branches de la
connaissance humaine ont suscité autant



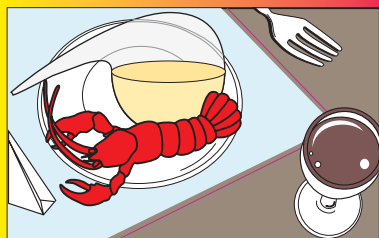
Pourquoi cette peinture de la grotte de Lascaux représente-t-elle un homme à tête d'oiseau ?

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 mars 2000.



correcte dans le contexte actuel. Il est bien difficile de s'affranchir complètement de ces influences plus ou moins subtiles de l'environnement intellectuel. Cl. Cohen y succombe elle-même à l'occasion, comme lorsqu'elle remarque que les thèses «multirégionalistes» de l'origine de l'homme moderne ne sont pas sans risque de «dérives racistes». Peut-être, mais cette observation ne peut constituer un facteur d'évaluation de leur validité. Fût-ce dans un domaine «sensible» comme celui de l'anthropologie, on ne peut pas juger une théorie scientifique à l'aune des exploitations non scientifiques qui peuvent en être faites.

Eric BUFFETAUT

Éthologie

Bonobos, le bonheur d'être singe

Frans de Waal et Frans Lanting.
Éditions Fayard, 1999 (214 pages,
295 francs).

I l y a six millions d'années, à partir d'un ancêtre commun, la lignée des hominidés a divergé, tandis qu'un autre rameau a donné les chimpanzés et les bonobos, séparés depuis trois millions d'années seulement ; nous partageons avec eux 98 pour cent de nos gènes ! Les chimpanzés sont bien connus, notamment grâce à Jane Good-

dall (plus de 40 ans de présence au Parc national de Gombe, en Tanzanie), mais l'histoire des bonobos, selon Frans de Waal, ne fait que commencer.

L'éthologie est la «science des comportements des espèces animales dans leur milieu naturel» : la définition date de 1849, et son auteur est le fondateur de la Société d'acclimatation de France, Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (1805-1861). Aujourd'hui, la discipline a tourné le dos aux approches dogmatiques et monolithiques du «tout génétique» ou du «tout apprentissage», et la vieille querelle entre l'inné et l'acquis est désormais périmée, selon Frans de Waal lui-même. Les recherches sont menées dans le milieu naturel sur des périodes très longues, ainsi qu'en captivité, combinant les approches disciplinaires les plus variées ; les résultats sont analysés, recoupés, et la subjectivité a laissé la place à des bilans plus fiables et plus nuancés.

De réputation sexuelle sulfureuse, les bonobos restent les moins connus des grands singes. *Pan paniscus* est une espèce légèrement plus petite que *Pan troglodytes* (le chimpanzé) ; la tête est petite, le cou fin, les bras, le torse et les jambes sont élancés. Le dimorphisme sexuel est réduit (le poids moyen du mâle est de 41 kilogrammes, celui de la femelle de 37 kilogrammes), et la bipédie est marquée. Ils vivent dans la forêt tropicale du bassin du fleuve Zaïre (République démocratique du Congo), et l'on pense qu'ils n'ont jamais quitté leur pays d'origine.

La population des bonobos est difficile à évaluer, en raison des difficultés



Les bonobos partagent avec l'espèce humaine de nombreux comportements. Ils vivent en sociétés organisées et tolérantes, dans le bassin du fleuve Zaïre.

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lederocq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poullennec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Christian Andres, Catherine Barthélémy, Leïla Bellon, J. Blamont, Jean-Claude Chasteland, Bettina Debù, Paul Decaen, M. Dullac, Évelyne Host-Platret, Jean-Jacques Hublin, Valérie Martin-Roland, Claude Olivier, Guy Paulus, Christophe Pichon, I. Sadourny.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin, jf.guillotin@pourlascience.fr
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 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 de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

d'accès à leurs territoires : on l'estime comprise entre 2 500 et 10 000. Même si l'on ajoute quelques centaines de bonobos captifs dans les zoos européens et américains, l'espèce est fragile et menacée. Sa connaissance est liée à la survie des communautés congolaises et à des conditions d'élevage maintenant bien maîtrisées, qui assurent la longévité des captifs et une descendance appréciable.

Comme les chimpanzés, les bonobos constituent une société dite de «fission-fusion» : ils composent de petits groupes itinérants mixtes, qui changent au gré des jours et, même, des heures. Les associations sont temporaires et fluctuantes, sauf celles qui unissent les mères et leurs jeunes. Les femelles ont un jeune tous les quatre ou cinq ans, et le bébé singe grandit lentement, est allaité durant quatre ans et devient tardivement autonome. Le lien maternel demeure entre la mère et ses fils adultes, puisque les mâles restent dans leur groupe d'origine. En revanche, les jeunes femelles prépubères quittent leur famille et se font accepter dans un groupe étranger, en s'attachant à des femelles plus âgées avec lesquelles elles lient des liens de sororité secondaire. La société des bonobos est tolérante et égalitaire, mais le rôle des femelles est primordial. La hiérarchie existe, sans être stricte ni pesante. Une femelle âgée sera considérée comme «influyente» plus que dominante et, ainsi, elle assurera une certaine présence à ses fils.

Les animaux sont vifs, actifs, bruyants. Leurs ressources alimentaires sont abondantes et disponibles sans effort ; elles se composent essentiellement de fruits mûrs énormes (*Anonidium* et *Treculia*) et d'une végétation herbacée terrestre qui fournit des protéines végétales en grande quantité. Les bonobos consomment seulement un pour cent de protéines animales (insectes, vers, reptiles, musaraignes, petites antilopes...). Il n'existe pas de conflits liés à la recherche de nourriture et à son appropriation, en raison de l'abondance des ressources, mais une compétition et une agressivité liées à la compétition sexuelle pourraient demeurer.

Or ces animaux ont la particularité de désamorcer leurs conflits par une activité sexuelle fréquente, inventive, hétérosexuelle et homosexuelle. En dehors de la particularité de relations sexuelles face à face, *more hominum*, à la manière des humains (alors que les chimpanzés s'accouplent *more canum*, à la manière des chiens), favorisées par la localisation des organes

sexuels de la femelle, plus entre les jambes que chez les chimpanzés, toutes les positions sont possibles.

Les rapports sont si décontractés, si «naturels», si fréquents (et déconnectés de la notion de reproduction, puisqu'ils ont peu de jeunes, et espacés), et les animaux y prennent tant de plaisir que toute interprétation humaine relève davantage de nos fantasmes que d'un comportement pervers de leur part ! Pour rassurer les partisans d'une certaine morale, ils échappent à l'inceste et à l'infanticide. Donc la sexualité n'est pas une source de conflits, puisque les femelles sont nombreuses et réceptives presque en permanence, et la paternité impossible à repérer sans empreinte génétique.

Société idéale ? On peut la qualifier de tolérante, sensible, intelligente. On peut s'étonner de ne pas voir les bonobos utiliser des outils dans leur milieu naturel ; les primatologues disent qu'ils n'en ont pas besoin. Cependant, de nombreux exemples prouvent que ces animaux sont capables d'empathie : ils se mettent parfois à la place de leurs congénères et leur viennent en aide.

Nos «graciles parents», dit F. de Waal, sont menacés comme la plupart des grands singes et pour les mêmes raisons : la déforestation pour les cultures traditionnelles ou pour les coupes de bois, le braconnage ou la prospection diamantaire. La station de Wamba, dirigée par Takayoshi Kano, et celle de Lamako, dirigée par Alison et Noël Badrian, existent depuis 1974, mais les éthologistes perçoivent les menaces qui pèsent sur les singes : le tabou qui empêchait les Africains de manger la chair des bonobos, considérés comme leurs ancêtres, semble fréquemment violé. Les scientifiques espèrent que des habitats impénétrables subsistent, refuges de communautés non recensées.

F. de Waal n'invente pas l'évolution de l'espèce bonobo, qui demeure mystérieuse, mais il nous invite à nous interroger sur nos origines. Le livre réunit les connaissances scientifiques récentes, des enquêtes, des interrogations et des interprétations mesurées.

Parlons enfin du bonheur du lecteur, qui s'émerveille des remarquables photographies de Frans Lanting. Décidément nos cousins sont bien expressifs !

Michèle FEBVRE

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>