

Pour la Science

Janvier 2000



POUR LA

# SCIENCE

édition française de

SCIENTIFIC  
AMERICAN

La science en 2050



## BLOC-NOTES

de Didier Nozon

## TRIBUNE DES LECTEURS

## JEU-CONCOURS

### Rapporteurs exotiques

par Pierre Tougne



## POINT DE VUE

### Y a-t-il des thésards heureux?

par Nicolas Chevassus-au-Louis



## PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

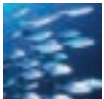
### Cardenas et les tubercules des Andes

par Alain Corbin et Raphaëlle Tasso



### Les saveurs du fromage

par Hervé This



## PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

- L'eau douce du fond de la mer
- Sardines et anchois
- Autocontrôle dans le ciel
- L'eau potable des singes
- L'électricité de la peau de chat
- Transport de cholestérol



## VISIONS MATHÉMATIQUES

### L'Empire de la constante un

par Ian Stewart



## IPRES DE PHYSIQUE

### Des tunnels dans l'espace-temps

par Roland Lehoucq et Jean-Philippe Uzan



## L'HISTOIRE ET L'ARCHÉOLOGIE

### L'cryptographie romaine 2000 ans après

par Jean-Paul Delanaye



## ANALYSES DE LIVRES

- Guide de l'amateur de cactus, de Pierre-Louis Fröling
- Les Français et leurs animaux, de Jean-Pierre Digard
- L'homme et l'animal : un débat de société, sous la direction de A. Ouedrago et P. Le Neindre
- L'art rupestre dans le monde. L'imaginaire de la préhistoire, d'Emmanuel Ancelet
- Le rendez-vous de Vénus, de Jean-Pierre Luminet



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

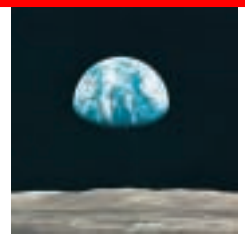
[www.pourlascience.com](http://www.pourlascience.com)

## La science au XXI<sup>e</sup> siècle

26

par John Maddox

Si le futur est aussi riche que le passé, la recherche scientifique procurera dans les 50 prochaines années, de développements inattendus et exaltants.



## Vers l'unification de la physique

32

par Steven Weinberg

Les expériences en cours au CERN et dans d'autres laboratoires de physique des particules devraient confirmer le Modèle standard de la physique des particules.

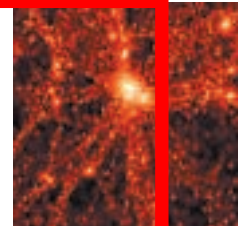


## L'exploration de l'Univers

40

par Martin Rees

Au XXI<sup>e</sup> siècle, les cosmologistes dévoileront le mystère de la naissance de l'Univers. Prouveront-ils aussi l'existence d'autres univers?

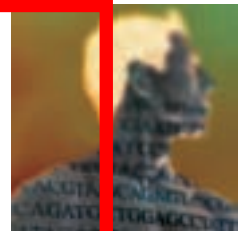


## Le code de la vie déchiffré

46

par Francis Collins et Martin J. Gaitanaris

L'étude de tous les gènes de divers organismes renseignera sur l'origine de la vie.

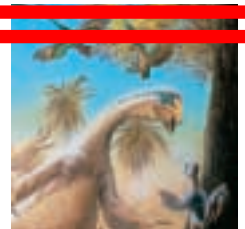


## Que nous apprendront les fossiles?

52

par Eric Buffetaut

Les prochaines avancées en paléontologie dépendront de la découverte de nouveaux fossiles. Ces découvertes seront plus clairement interprétées dans le cadre des grands événements qui ont marqué l'histoire de la Terre.



## Inné contre acquis : la fin de l'opposition

par Frans de Waal

Le comportement humain est déterminé à la fois par la génétique et par l'expérience acquise.



58

## Modifions-nous le climat?

par Thomas Karl  
et Kevin Trenberth

On ne le saura vers 2050 que si tous les pays s'engagent dès aujourd'hui dans une surveillance météorologique régulière et rigoureuse.



64

## Le vieillissement est-il inéluctable?

par Michael Rose

On retardera peut-être le vieillissement, mais pas à l'aide d'un élixir de jeunesse.



70

## Le cerveau et l'esprit

par Antonio Damasio

D'où vient la conscience? Une meilleure connaissance du fonctionnement du cerveau apporte des éléments de réponse à cette question.



76

## Une vie extraterrestre?

par Jill Tarter  
et Christopher Chyba

La recherche de vie extraterrestre commence seulement : on découvre des planètes autour d'autres étoiles que le Soleil.

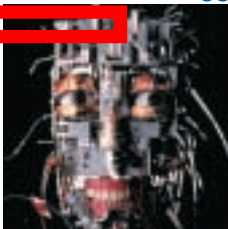


82

## L'ère des robots

par Hans Moravec

En 2050, les robots rivaliseront d'intelligence avec les hommes : les ordinateurs de leurs «cerveaux» artificiels exécuteront 100 000 milliards d'instructions par seconde.



88

## Nous sommes des nains...

... sur les épaules de géants, ont annoncé de nombreux auteurs, après Saint Augustin. Truisme s'il en veut, mais vérité historique : la connaissance scientifique progresse ainsi, à plus ou moins grandes enjambées.

Dans ce numéro, nous avons demandé à des scientifiques de diverses disciplines, renommés, de nous dire comment ils voient le futur de leur art à l'horizon 2050. Leur vision est à la fois passionnante et modeste : s'ils ne sont pas assez présumptueux pour prétendre percer les ombres de l'avenir, ils pressentent comment les sciences de demain seront différentes des sciences présentes.

Le siècle passé nous a enseigné deux écueils : le triomphalisme (« nous savons à peu près tout, il suffit de prolonger les recherches dans les voies actuelles ») et le pessimisme (« nous ne pourrions jamais résoudre telle ou telle question »).

Le triomphalisme a ses perversions. Les économistes pensent trop souvent que les hommes et la science sont des singes dressés à monter et à dévaliser des pyramides de fruits qui feront la fortune de leurs industries – il suffit de « vouloir » et de « gérer », disent-ils. Les chemins du progrès sont plus tortueux, plus malaisés. Les percées conceptuelles sont fondées sur la récolte de données, ingrates parce qu'longues et sans débouché prévisible. La patience économique est de règle.

Le pessimisme est tout aussi fallacieux, car la confrontation avec l'impossible est le moteur de la créativité. Le scientifique suscite ou exploite les avancées de la science pour surmonter l'impossible. Un autre pessimisme porte sur le bénéfice social de la science. Le scientifique, « apprenti sorcier », est, comme tout autre, préoccupé. Cependant, la créativité scientifique se distingue de la science-fiction qui élabore les conséquences sociales des progrès scientifiques (le genre semble imposer qu'elles soient toujours néfastes). La science-fiction, qui se nourrit de l'imagination alimentée et traduit nos angoisses. Mais ne nous méprenons pas sur sa valeur prédictive.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

## Allez à l'ouars...

Il est désormais banal de se présenter au dernier moment dans une agence de voyages, et d'y acheter des billets d'avion invendus. Peu importe la destination, la seule exigence est que le prix soit bas. Ainsi, vous vous retrouvez en partance pour Marrakech ou pour Prague, pour le Groenland ou pour la Martinique.

Pourquoi les organisateurs de congrès scientifiques ne s'inspirent-ils pas de ce modernisme ? L'individu désireux de participer à un congrès se présenterait dans une agence, laquelle se renseignerait sur les moyens (intellectuels) du candidat. Vous n'êtes qu'à bac plus 3 ? Alors, nous vous proposons un petit congrès provincial de biologie élémentaire à Copacabana. Très satisfait ? Alors, nous vous proposons des moyens. Vous êtes à bac plus 172 ? Nous vous suggérons le Congrès international des mathématiciens. Sur l'île de Djerba. Dépêchez-vous de vous inscrire, il reste très peu de places. Bon congrès.

## Aspirine et astrologie...que

La chute d'une pomme et les marées – ça n'a rien à voir. Avoir mal à la tête et sucer un bout d'écorce de saule blanc – ça n'a rien à voir. Être né sous la conjonction de Saturne avec Jupiter sous ascendant Gémeaux et avoir de la chance dans la vie – ça n'a rien à voir.

Évidemment. Dans les deux premiers cas, si étonnant que soit-il, ça a à voir. La gravitation explique des phénomènes aussi disparates que le mouvement de la pomme et celui de la mer. L'aspirine concentre des principes actifs présents dans certaines plantes. La relation mise en relation, toutefois, n'est plus si simple. En apparence que les autres, sera-elle accentuée par un astrologue, mais pas par un scientifique. En effet, affirmer que deux phénomènes sont liés est plus facile que de démontrer qu'aucun rapport ne peut ni ne pourra jamais exister entre eux. Or les

découvertes les plus excitantes pour l'esprit sont celles qui prennent deux phénomènes apparemment très éloignés, et réussissent à les mettre en relation.

Simultanément, les deux à savoir l'astrologie et les phénomènes qui, *a priori*, semblaient étrangers, la science et l'astrologie, aujourd'hui sœurs, s'efforcent d'être des amies (jusqu'à s'embrasser, comme les personnes de Newton), sont, quoi qu'elles en aient, destinées à rester longtemps encore inséparables.

## Ar dimal de mécontents

Impression désagréable que d'aller voir «le film dont tout le monde parle» : ce subordonné qu'on est en train de se faire voir par une habile campagne de promotion. Désagréable que redouble – au cas où l'on a détesté le film – la colère de contribuer à son succès. Car, de même que l'argent attire l'argent, la foule attire la foule : gonfler les statistiques de ceux qui ont vu le film contribue à entretenir le battage médiatique et, par conséquent, le succès.

Il faut donc changer d'instrument de mesure et compter non pas le nombre de spectateurs, mais le pourcentage de satisfaits. Un film qui a 5 000 spectateurs dont 90 % sont contents connaît incontestablement plus de succès qu'un film qui a 50 000 spectateurs dont 50 % sont contents. Si vous voulez faire fuir l'État, il faut voir un film à la mode mais nul, vous serez heureux, en augmentant le pourcentage de mécontents, de diminuer son succès.

## Paro sur les recettes

«Hé oui, je n'ai pas de recette toute faite», répondent volontiers les penseurs quand on ose leur demander comment il faut utiliser leurs théories pour agencer tel ou tel cas particulier. Étonnant mépris attaché à l'égard de la notion de recette, alors même que cuisiner est considéré aujourd'hui comme un art noble. Utiliser une recette permet au maître cuisinier de réussir même mal, et n'empêche pas le bon de réussir encore mieux, grâce à son talent personnel. Il n'y a aucune honte ni à se servir d'une recette ni à en proposer.

Le penseur qui nous envoie à la figure son mépris pour les recettes utiles dans nombre de situations concrètes, ne fait que dissimuler son incapacité à appliquer lui-même ses théories.

## Un fort en anathèmes

Pour avoir critiqué les philosophes trop peu scrupuleux dans l'emploi d'images scientifiques, A. Sokal et J. Bricmont ont été taxés de scientisme. Accusation bizarre : «Qui sont les scientifiques ? Sont-ce les gens comme Sokal et Bricmont ou, au contraire, ceux qui, comme Régis Debray, semblent croire qu'une vérité importante ne peut devenir respectable que lorsqu'elle a été formulée dans un langage scientifique ou, mieux encore, présentée comme une généralisation d'un résultat scientifique révolutionnaire et prestigieux ?» (Jacques Bouveresse, *Prodiges et vertiges de l'analogie*, Éditions Raisons d'agir, 1999.) Donnant à Sokal la caution d'un philosophe, le livre de Bouveresse interdit l'argument (facile et démagogique, donc souvent utilisé) qui prétend assimiler l'entreprise de Sokal à une expression de haine contre la philosophie.

Philosophe, Jacques Bouveresse respecte rigoureusement la règle de savoir-vivre qui fait le charme immortel de sa profession : la volée de bois vert distribuée aux chers collègues. En l'occurrence, les antisokaliens. Voici quelques échantillons. Ayant montré l'inanité du prétendu «principe d'incomplétude de Gödel-Debray», Bouveresse compare la pensée de Régis Debray et celle du baron de Münchhausen, qui voulait se sortir d'une mare en se tirant par ses propres cheveux ! Comme Jacques Derrida, Debray pratique «l'aller et retour du ridicule du trivial». Alain Badiou, lui, fait penser au lièvre à huit pattes du même Münchhausen, lièvre qu'aucun chien ne pouvait jamais rattraper : Badiou est capable de «courir plus vite que n'importe qui d'autre sur les pattes de la théorie pseudo-scientifique et [de] se retourner, le moment venu, pour repartir de plus belle sur celles de la métaphore et de la fiction poétique». Alain Finkielkraut devrait écrire une étude sur le copinage dans le milieu intellectuel, car «il dispose sûrement d'une expérience de tout premier ordre dans ce domaine»... Bruno Latour, Dominique Lecourt, Isabelle Stengers, Bernard-Henri Lévy, entre autres, reçoivent des coups de patte brésils, mais bien ajustés. Le physicien J.-M. Lévy-Leblond, qui a pris parti contre Sokal, est traité à l'égard des philosophes : rudement.

Bouveresse fait souvent mouche, par exemple lorsqu'il fustige l'attitude des «défenseurs de la liberté d'expression, tellement inconditionnels qu'ils en arrivent à contester aux autres le droit de critiquer». Son livre aurait été plus fort s'il était resté plus serein face à ceux qui accaparent les positions médiatiques dominantes. Mais, tel qu'il est, il a la qualité de son défaut : il est réjouissant à lire.

## Pluies acides

À propos de la brève intitulée *La fin de l'acide* (voir *Pour la Science*, novembre 1999), je peux confirmer, en tant que représentant français du programme international d'étude des lacs de haute montagne auquel il est fait référence, que l'analyse de la physico-chimie de ces eaux montre bien sans ambiguïté, mais dans un certain nombre de sites seulement, que les efforts de réduction des rejets d'oxygène et d'azote et de soufre émis lors du brûlage des combustibles fossiles n'ont pas été du tout utiles. La tendance à l'acidification qu'on y observait jusqu'à présent a été en effet clairement modifiée. Cependant, nous n'avons pas intérêt à nous réjouir prématurément, car les dégâts sont loin d'être réparés. En fait, on peut simplement dire que la situation paraît aujourd'hui avoir arrêté de s'aggraver dans ces lacs d'Europe et d'Amérique du Nord. Il est aussi clair que nous devons absolument rester très vigilants vis-à-vis des événements futurs, en particulier en ce qui concerne le développement incontrôlé des pays en développement. Les moyens financiers associés à des préoccupations environnementalistes sont surtout l'appanage des pays riches et, à moyen terme, les prévisions de rejets dans ces pays en développement sont très inquiétantes. La fin des pluies acides est donc malheureusement loin d'être une victoire mondiale, et on aurait tort de crier victoire trop vite pour oublier le problème.

Dr Jean-Charles MASSABUAU, Arcachon

## Mathématiques et sciences

L'article sur l'enseignement des sciences illustre à merveille le statut paradoxal des mathématiques. Il nous confirme que les lycéens français sont bons en mathématiques et mauvais en sciences. Le fait même qu'on puisse faire cette séparation nette entre sciences et mathématiques est préoccupant. Dans le même numéro, un autre article (*Pourquoi les objets se cassent-ils ?*) nous montre l'imbrication entre les mathématiques les plus abstraites (la topologie) et les domaines les plus appliqués (la métallurgie). L'enseignement français qui, semble-t-il, ne reflète pas cette profonde union entre les sciences de la nature (en particulier la physique) et les mathématiques transmet-il pour autant une bonne culture mathématique ? Rien n'est moins sûr. En effet, les seuls théorèmes contemporains qui soient à peu près connus du grand public sont ceux de Gödel et de Fermat-Wiles, ce dont l'article de

Jean-Paul Duhay est une parfaite illustration. Or, la logique et l'arithmétique, qui ne sont que deux branches des mathématiques parmi d'autres, ne sont pas enseignées au lycée. Leur popularité (relative) vient de ce qu'elles sont les seules qui soient un peu vulgarisées (y compris dans *Pour la Science*, exception faite de la rubrique de la Steward). Ainsi, ce n'est pas seulement l'enseignement des sciences qui doit être revu, mais l'enseignement du socle des sciences mathématiques, dont le but doit être de former l'esprit critique et rationnel, et de donner une culture scientifique minimale.

Fabien BESNARD, Paris

## Programme idéal

Si mon titre d'avis contraire à la réponse de Jacques Treiner (voir *Pour la Science*, octobre 1999), je suis en bonne partie d'accord avec les commentaires de Pierre Provost (voir *Pour la Science*, novembre 1999). Plus précisément, les tables à coussin d'air des programmes La Harrigue étaient une approche expérimentale digne d'intérêt, et il n'est pas sûr que les nouvelles propositions soient meilleures. En effet, ce programme se heurte forcément à des difficultés, car le plus difficile est justement d'intéresser les jeunes à se confronter à des simulations. Et pourtant il ne faut pas les sous-estimer, dès qu'il s'agit de regarder leur émission favorite ils savent utiliser la programmation d'un magnétoscope souvent plus vite que leurs parents. La seule chose nécessaire est de provoquer leur intérêt en y dénichant une motivation venant d'eux-mêmes. Hélas, les tables à coussin d'air sont mises dans la vitrine courante mais les planètes ne font guère mieux. Qui plus est, les magnétoscopes en question sont de peu d'intérêt en tant que boîtes noires fermées, le seul aspect qui motive pour enregistrer une émission) et trop compliqués en tant que boîtes noires ouvertes. La tâche est donc bien d'essayer de concevoir de nouveaux programmes, mais il ne faut pas se faire trop d'illusions : il n'existe pas de programme idéal.

Jean-Michel LAFAILLE, Angers

## Comédie

Une lettre parue sous le titre *Outrage!* (voir *Pour la Science*, novembre 1999) a provoqué ma perplexité. La *Tribune des lecteurs* ne nous avait habitués, jusqu'ici, qu'à des propos parfois vigoureux, mais toujours scientifiquement argumentés, de lecteurs raisonnablement compétents. Et voici soudain qu'éclate cette incongruité ! Cette lettre est-elle parue par

distraktion ? C'est invraisemblable. Comme je ne peux pas croire que, sous couleur de liberté d'expression, on en vienne à donner la parole à l'obscurantisme et à l'ineptie – mais à mon sens la sottise et l'ignorance ne constituent pas une opinion –, je dois en conclure qu'il s'est agi d'une erreur de place à l'impression, peu ou pas est bon de rire de temps en temps. Allons, continuons donc qu'il en est ainsi. Mais gardons-nous, à l'avenir, d'un abus, surtout d'un humour de cet habit dont on sait ce qu'il recèle et où peut mener ce qu'il sous-entend ! Allez savoir pourquoi les noms de Sauter, Gerdau, Branc, Voltaire et D... n'ont pas été mentionnés. Et grâce soient rendues à l'Abbé Breuil, mais pas pour ses talents de peintre !

Bernard PETIT, Brest

## Cumul

Peut-on se prévaloir de limitations budgétaires quand on parle de santé publique (voir *Pour la Science*, septembre 1999) ? Certes, les risques majeurs actuels sont l'alcool, le tabac et l'automobile ; ce ne sont pas pour autant de bons éléments de comparaison avec le risque lié à la pollution des denrées alimentaires, car c'est faire abstraction de la notion d'accoutumance (l'alcool et le tabac sont des drogues qui limitent le raisonnement rationnel de ceux qui s'y adonnent. L'automobile, elle, est liée aux notions de plaisir et de statut social (savamment entretenues par les constructeurs et autres acteurs du sport automobile, à grands frais de publicité). Retire-t-on du plaisir à consommer des produits plus ou moins pollués, en devient-on dépendant ? Philippe Hartermann n'a abordé pas non plus le problème des associations de risques, et cet oubli est regrettable. On excède de risque de cancer un million de fois, certes ; mais qu'en est-il si les risques sont cumulés ? À quels dangers s'expose-t-on quand on combine une surcharge de nitrate et de pesticides, mangerais-je des œufs ou du poulet à la dioxine, accompagnés de carottes contenant du plomb, ajouterait à cela du poisson au mercure, respirerait de l'air aux vapeurs soufrees et irait travailler au volant de sa voiture en fumant une cigarette ?

Des millions de citoyens européens pourraient bien pourtant ressembler à ce portrait.

Dominique ROS Montpeller

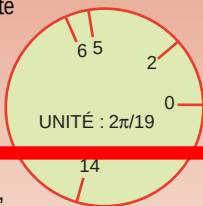
Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : [tribune@pourlascience.fr](mailto:tribune@pourlascience.fr). Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web [www.pourlascience.com](http://www.pourlascience.com).

# JEU-CONCOURS N° 67

PIERRE TOLLON

## Rapporteurs exotiques

Le rapporteur de gauche permet de mesurer tous les angles multiples de  $2\pi/19$ , tandis que celui de droite permet de mesurer tous les angles multiples de  $2\pi/21$ , et cela avec seulement cinq graduations chacun. En effet, si l'on veut mesurer un angle de  $3 \times 2\pi/19$ , il suffit de prendre l'angle entre les graduations 2 et 5 sur le rapporteur de gauche. De même, pour mesurer un angle  $7 \times 2\pi/19$ , il faut prendre l'angle entre les graduations 14 et 2, etc. Le rapporteur de droite permet aussi de mesurer tous les angles multiples de  $2\pi/21$ .



Peut-on construire un tel rapporteur pour mesurer tous les angles multiples de  $\pi/20 = 18^\circ$ ?

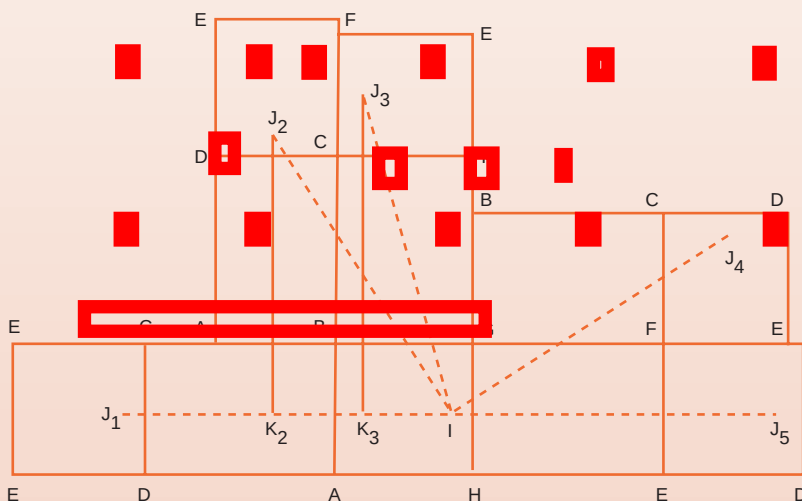
Plus précisément, pouvez-vous démontrer que cinq graduations sont insuffisantes et trouver un rapporteur avec six graduations toutes situées entre 0 et 180 degrés (extrémités comprises)?

Envoyez vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Perdu, 75017 Paris Cedex 06. Donnez les réponses avant le 15 janvier 2000, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 65

Si l'on déplie le parallélépipède en coupant certaines arêtes de façon à l'étaler sur un plan, les chemins des rayons lumineux deviendront des droites sur ce plan. La figure ci-dessous montre cinq «dépliegés» où les trajets des rayons lumineux sont représentés en pointillés (par symétrie autour de  $IJ_1$ , on obtient les trois autres chemins). Les distances  $IJ_1, IJ_2, IJ_3, IJ_4$  et  $IJ_5$  sont égales à la distance parcourue par la lumière, soit  $65 \times 300\,000 = 19,5 \times 10^5$  kilomètres. Si l'on pose  $AD = x, AB = y, AH = z$  et que l'on exprime les distances avec pour unité 100 000 kilomètres, nous avons  $IJ_1 = x + z = 195$  (1) et le théorème de Pythagore appliqué aux triangles rectangles  $IJK_2$  et  $IJK_3$  donne :

et  $IJ_3 = \sqrt{48^2 + x^2 + y^2} = 195$ , soit  $x + y = 189$  (3). Les relations (1) et (3) donnent  $x + (y + z) = 192$  qui, reporté dans (2), conduit à  $y + z = 150$  (4). Le système des trois équations linéaires (1) (3) et (4) se résout facilement et donne  $x = 117, y = 72$  et  $z = 78$ . Par conséquent les dimensions de cet univers sont : 11,7, 7,2 et 7,8 millions de kilomètres. N.B. : Comme me l'ont fait remarquer certains lecteurs, dans cet univers, rien n'interdit à cette étoile de rayonner dans toutes les directions et, par conséquent, d'atteindre notre observateur après plusieurs tours sur les faces du parallélépipède, et cela d'une infinité de manières donnant ainsi des images apparentes de la même étoile, mais de magnitude de plus en plus faible.



## OFFRE D'EMPLOI

### PROFESSEUR DE BIOLOGIE VÉGÉTALE (67-68)

Phylogénie moléculaire et ressources génétiques végétales

Université Lyon I

Intégration dans l'UMR CNRS 5558 Biométrie – Biologie Évolutive pour développer une équipe de recherche et des collaborations au sein de la EP 41 «Sciences et Méthodes de l'Écologie et de l'Évolution» sur l'une des thématiques suivantes :

biologie des populations, ou écologie évolutive, ou approches physiologiques, génétiques et évolutives des relations plante-pollinisateur ou plantes insectes.

Enseignement : Biologie végétale dans les universités

Contacts :

UMR 5558

Bâtiment 41

43, boulevard du 11 novembre 1918

69622 VILLEURBANNE CEDEX

misou@biomserv.univ-lyon1.fr

Tél. 04 72 44 81 42

Fax 04 78 89 27 19

UFR de Biologie

même adresse

ufrbio@biomserv.univ-lyon1.fr

Tél. 04 72 44 81 37

Fax 04 72 44 84 66



# Y a-t-il des thésards heureux?

NICOLAS CHEVASSUS-AU-LOUIS

*Les thésards ont raison de se plaindre, mais ils ont tout de redouter la vie professionnelle.*

Avez-vous déjà entendu un concert de dérémiades? Les thésards en donnent tous les midis dans les carlines des laboratoires et tous les soirs dans leurs cafétérias : «Machin attaque sa cinquième année de thèse et il n'a toujours pas publié». «Truc vient d'arriver en postdoc où son ex-patron l'a envoyé, et y a deux Chinois sur le même sujet que lui...» «J'ai été boulé au concours de Pétaouchnok, ils ont pris un candidat local qui avait moins de papiers que moi». À les entendre, la thèse et les années qui suivent seraient de nouvelles classes préparatoires, harassante course d'obstacles où beaucoup laisseront des plumes, mais où les heureux lauréats pourront enfin ne rien plus faire et se reposer.

Ils n'ont pas entièrement tort, et ils se sont fait entendre des députés M. Cohen et M. Le Déaut, qui sont devenus leurs véhéments porte-parole dans leur récent rapport sur la recherche française. La situation faite aux jeunes chercheurs en France est un épouvantable gâchis, il est donc maintenant permis de le dire. Le plus regrettable, à mon sens, est que cette situation tue presque inévitablement le plaisir de la recherche. Chercher nécessite du temps : pour se plonger dans les travaux des confrères, avant d'engager ses propres expériences, pour projeter des plans d'expériences sur plusieurs années ou pour se hasarder à explorer des directions incertaines.

Or le quotidien du jeune chercheur est souvent fait de bourses de quelques mois qui lui interdisent de voir à long terme. On conviendra volontiers que les jeunes chercheurs ne sont ni les seules ni les pires victimes du chômage et de la précarité, mais leur métier est de ceux qu'il est presque impossible d'exercer lorsque l'on ignore ce qui demain sera fait. Imagine-t-on un paysan, embauché au semestre, incertain de son activité quand viendra la récolte?

Qu'une carrière de chercheur débute par plusieurs années où l'on ne goûtera pas aux charmes du métier, voilà qui est assurément regrettable. Tout s'ar-

rangerait-t-il si un ministre éclairé décidait que chaque postulant au CNRS n'a le droit qu'à une seule candidature, l'année d'obtention de sa thèse, et dans un laboratoire différent de celui où il l'a préparée? Personne n'y trouverait à redire, sinon quelques peu recommandables mandarins rajeunissant de se voir privés de main-d'œuvre sur leur marché. Le CNRS se rajeunirait, la mobilité imposée enrichirait la formation des jeunes chercheurs, et l'on pourrait enfin appliquer l'excellent précepte du neuroanatomiste espagnol Santiago Ramón y Cajal, qui écrivait en 1916 : «C'est une obligation sacrée pour l'État de ne l'épargner aux jeunes chercheurs des sacrifices douloureux en créant les conditions matérielles qui rendent compatibles le travail scientifique et la vie familiale.»

Les thésards seraient-ils alors heureux? Je dirais que non, car beaucoup d'entre eux souffrent d'une idéalisation caractéristique du métier de chercheur. De ce fait, même le système précédemment décrit, qui recruterait au mieux dix pour cent des nouveaux docteurs, écarterait encore 90 pour cent des candidats, les laissant malheureux, déçus, aigris.

Pourquoi diable veulent-ils tous être chercheurs? «Parce que je ne sais rien faire d'autre», s'entendrait-on sans doute répondre. Passée la stupéfaction de voir le peu de qualifications prétendument conférées par le plus haut diplôme délivré par l'Université, on se prend à se demander si ces gens-là savent que 8 se décompose en 5 + 3 : plutôt que de contempler tristement leur Bac + 8, que ne considéreraient-ils pas qu'après cinq années d'études, ils ont été confrontés, pendant au moins trois ans, aux mêmes problèmes que n'importe quel débutant dans la vie active : se faire une place auprès des collègues, organiser sa journée, valoriser son travail aux yeux de ses supérieurs... Hautement diplômés, riches de trois années d'expérience professionnelle, les jeunes docteurs ne sont assurément pas démunis d'atouts pour

affronter le marché du travail. Il ne leur manque que la volonté. Les doctoriales, sortes de boîtes aux lettres destinées à favoriser leur insertion professionnelle, me font irrésistiblement penser à ces bals où les seules filles à marier, gentiment alignées sur leur banc, attendent les prétendants qu'elles n'osent pas même regarder. Elles ne se décideront qu'en ultime recours, la quarantaine approchant, usés par les stages postdoctoraux et par les sacrifices exigés de voir leurs anciens condisciples ayant choisi d'autres voies s'installer dans l'opulence et parler résidence secondaire ou berline familiale.

S'ils reportent sans cesse la confrontation au marché du travail, c'est que leur idéalisation du métier de chercheur (public, s'entend) est d'une solidité à toute épreuve. C'est cette idéalisation qui les fait s'indigner du poids «du copinage» lors des recrutements dans les organismes de recherche ou à l'université. Ils rêvent d'une utopie où seul le mérite serait récompensé, d'un monde idéal où la recherche serait protégée de toute pollution par la société et ses enjeux de pouvoir. Comme le dit Pierre Bourdieu, «ils se racontent des histoires», en attribuant par exemple leurs difficiles débuts de carrière à un manque de relations. D'où leur vient cette foi de charbonnier? Je risque une hypothèse : une bonne partie des jeunes diplômés éprouve une franche répugnance à l'égard du monde de l'entreprise, répugnance dont je ne m'aventurerai pas à juger le bien fondé. J'en veux pour preuve, par exemple, la proportion croissante de jeunes ingénieurs, par excellence formés pour aller en entreprise, qui entament une thèse après leurs années d'école. Fuyant la carrière de cadre, bien des doctorants idéalisent ce métier de chercheur qu'ils croient capable de les protéger de l'horreur économique. La recherche est-elle l'opium des thésards?

**Nicolas CHEVASSUS-au-LOUIS est journaliste scientifique.**

# ■ POUR LA SCIENCE

**VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE**

**1 an au prix de 48 €**

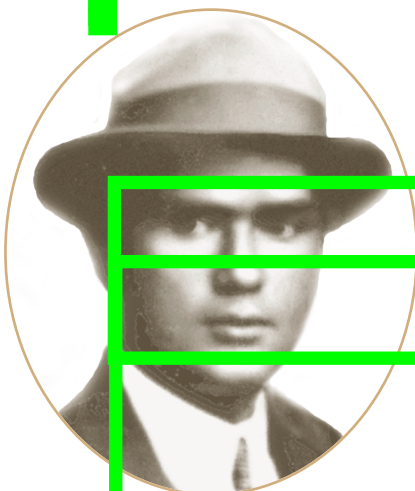
~~soit 4 € seulement par numéro au lieu de 5,20 €~~

Pour consulter et télécharger  
en toute liberté sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)  
les 12 prochains numéros  
dès leur parution.



**Oui, je m'abonne**  
**à Pour la Science 100% numérique**  
**1 an (12 numéros) pour 48 €**

Je préfère découvrir toutes  
les offres d'abonnement disponibles  
**en cliquant ici.**



# Cardenas et les tubercules des Andes

ALAIN GIODA • KATIA HUMALA-TASSO

*Martin Cardenas fut le premier écologiste Sud-américain à promouvoir d'autres types de pommes de terre : les tubercules andins traditionnels.*

Aujourd'hui, la pomme de terre, diffusée en France, à la fin du <sup>xv</sup><sup>e</sup> siècle, par Parmentier, est un légume universel. Les Andes, leur berceau, abritent plusieurs autres espèces de pommes de terre et de plantes à tubercules ou à racines comestibles qui pourraient être domestiquées, cultivées et exportées. Le botaniste et agronome bolivien Martin Cardenas (1899-1977) (ci-dessus) s'est battu toute sa vie pour revaloriser l'agriculture des Andes, bien au-delà de ses montagnes natales, et pour promouvoir les tubercules andins autres que la pomme de terre.

Rien ne prédispose Cardenas à une carrière scientifique : issu d'un milieu très modeste, il naît en 1899 d'une mère indienne quechua, dans un pays où la population compte plus de 80 pour cent d'illettrés (les principaux peuples indiens de Bolivie sont les Aymaras et les Quechuas). Isolée, car elle a perdu l'accès à la mer en 1879, après une guerre contre le Chili, la Bolivie est pauvre : la richesse issue des mines d'étain et d'argent est concentrée dans les mains d'une infime minorité de la population. Le pays compte alors moins de trois millions d'habitants. Quand Cardenas aura une trentaine d'années, c'est-à-dire au début de sa carrière, son pays perdra la guerre contre le Paraguay soutenu par l'Argentine. Durant cette guerre (1932-1935), 60 000 hommes tomberont et 200 000 seront blessés. Cardenas participera en tant que scientifique du contingent à ce conflit désastreux.

Ce cadre familial, économique et politique ne semble guère favorable à l'éclosion d'un scientifique et, pourtant, Cardenas écrira et publiera plus de 150 articles et livres ;

découvrira presque 200 cactées, une vingtaine de pommes de terre sauvages et une douzaine d'amaryllis ; dirigera des formes modèles ; sera recteur d'université ; créera un jardin botanique ; stimulera l'intérêt pour la médecine traditionnelle indienne et les plantes d'intérêt pharmacologique ; donnera des conférences dans le monde entier ; sera le correspondant de très nombreuses sociétés savantes et d'institutions dont le Muséum national d'histoire naturelle de Paris...

Cardenas entreprend des études de professeur de collège, cursus obligé pour un jeune homme pauvre, mais méritant, qui passe d'abord par l'École normale bolivienne des instituteurs. Sa vocation naît sans doute vers 1921, lorsqu'il achève sa période de formation comme enseignant et qu'il est recruté comme assistant de l'exploration botanique de l'Amazonie bolivienne, animée par Henry Rusby, alors directeur du jardin botanique de New York. En 1932, dans le premier livret qu'il publie, *Plantae potosinae*, il écrit que son ambition est d'être un grand botaniste à l'égale

de ses illustres prédécesseurs européens et nord-américains.

Rien ne le fera dévier de son objectif : ni un salaire médiocre, ni les moyens dérisoires dont il disposera, ni les lourdes tâches d'enseignement et d'administration, ni l'indifférence générale. Cardenas se consacrera à la science (son mariage célébré en 1930 ne sera que de courte durée) ; apprendra la plupart des langues européennes, transformera sa maison en laboratoire et en bibliothèque, espérant faire évoluer les mentalités locales et en diffusant sans relâche des informations scientifiques en espagnol, notamment dans la presse de son pays.

Mobilisé sur le front paraguayen entre 1932 et 1934, année où il sera rapatrié sanitaire, Cardenas fait partie de « la génération de la guerre du Chaco » (1932-35). Les soldats boliviens sont envoyés contre ceux du Paraguay sur le front du Chaco, un vaste désert semi-aride infesté par le paludisme, très différent de leurs montagnes natales. L'approvisionnement en vivres et en médicaments fait défaut et, dans les tranchées, ils réalisent que leur gouverne-

ment, fondé sur l'oligarchie minière de l'étain, les a condamnés à une mort certaine en les envoyant au front. Après la défaite, une partie des officiers subalternes (souvent des métis comme Cardenas) conspire pour prendre le pouvoir. Cette génération, qui apprit l'autonomie intellectuelle au

combat et dont fait partie Cardenas, changera la

société bolivienne dans les années 1940 et 1950. Cardenas a un maître spirituel : Simon Bolivar. Le libérateur du continent Sud-américain avait mis fin à la colonisation espagnole en 1825, et avait



Fête de la fécondité à Cochabamba.

tenté, au début du XIX<sup>e</sup> siècle de fédérer l'Amérique latine sur le modèle des États-Unis et de lui transmettre l'esprit des Lumières par la diffusion du savoir dans les couches populaires. Cette volonté culturelle reste prégnante chez les intellectuels Sud-américains nationalistes et progressistes. L'assemblée constituyente de 1825 dédie la Bolivie au libérateur Bolivar. L'un de ses lieutenants, le général Sucre donne son nom à la nouvelle capitale, et est, durant son court mandat présidentiel (1826-1829), un représentant de ce courant progressiste qui perdure sous le gouvernement du maréchal Santa Cruz (1829-1839). Malheureusement, la diffusion du savoir dans les couches populaires ne devient une priorité au-delà des discours, que durant les premières années de la république. Symbolisé par la révolution mexicaine de 1910, un courant indigéniste se développe dans les sociétés métisses de la plupart des pays d'Amérique latine et réhabilite l'héritage culturel des civilisations précolombiennes. Cardenas y adhère en se battant pour revaloriser les plantes domestiquées par les Indiens.

### LA DIVERSITÉ DES CULTURES ANDINES

Les tubercules sont méconnus en Europe. Hormis la pomme de terre, les autres tubercules andins ne sont guère connus hors de leur zone d'origine et de culture (à l'exception de l'un d'eux en Nouvelle-Zélande) ; c'est pourquoi Cardenas les qualifiait de «mineurs». En fait la conquête espagnole de l'Amérique au XVI<sup>e</sup> siècle s'est accompagnée d'un racisme envers les indigènes, et d'une dévalorisation systématique de leur environnement culturel, notamment de leur alimentation : les produits alimentaires traditionnels ont été écartés. Or, les Incas, dans leur vaste empire, qui s'étendait de l'Équateur au Nord de l'Argentine et du Chili actuels, cultivaient un nombre d'espèces (200 à 300) bien supérieur à celui que l'on connaissait alors en Asie et en Afrique.

Depuis l'époque préincasique (avant le XV<sup>e</sup> siècle), les populations des Andes vénèrent le dieu Soleil (*Inti*) et la déesse Terre (*Pachamama*), ainsi que les produits qu'elle donne grâce au travail des agriculteurs. Pourtant les immenses steppes de l'Altiplano sont désolées, le froid nocturne y est intense au-dessus de 3 700 mètres d'altitude et les habitants contraints à la frugalité. La terre, en apparence stérile, donne pourtant des tubercules comestibles, considérés comme un don des dieux. La domestication et la culture des tubercules, telles que la papalisa, l'oca et l'isaño, sont

l'œuvre des peuples aymara et quechua, qui ont joué un rôle prépondérant dans l'agriculture andine.

Plus encore que la chute des Incas, survenue vers 1533-1534 face à moins de 200 Espagnols, les nouveaux modes de vie imposés par les conquérants, l'exploitation d'animaux et de plantes inconnues jusqu'alors bouleversent les habitudes (sans compter l'introduction involontaire de maladies agressives qui déciment les ethnies indiennes). L'une des premières actions des Espagnols consistait à fonder des villes qu'ils équipent d'un four pour cuire le pain. Pour préparer le pain, il faut du blé. Or, sur l'Altiplano, à plus de 3 700 mètres d'alti-

tude, il ne pousse pas : on l'importe des régions côtières du Pérou (autour d'Arequipa), où il a été introduit par les colons. De même, la vigne est une culture étrangère au monde andin, mais elle s'acclimata rapidement dans les vallées chaudes et sèches des montagnes. Pain et vin sont les symboles de la présence du dieu imposé par le clergé catholique, qui travailla toujours «main dans la main» avec le pouvoir espagnol sous un régime conjoint, connu sous le nom du patronat. Au premier, revenait le spirituel, au second, le temporel.

Selon la chronique de l'Inca Garcilaso de la Vega, métis de sang royal indien du XVI<sup>e</sup> siècle, «les Rois Catholiques et



En Bolivie, près de Potosi, à 3 500 mètres d'altitude (à l'arrière plan), les Indiens cultivent diverses sortes de tubercules (au premier plan) avec des rendements parfois équivalents à celui de la pomme de terre. La préservation de ces cultures traditionnelles est un atout pour les populations locales et Martin Cardenas a tenté de les préserver.

Alain Giorda

L'empereur Charles Quint avaient donné l'ordre d'offrir sur le trésor royal un joyau au premier qui, dans n'importe quelle ville [d'Amérique fondée par les colons européens], obtiendrait un produit nouveau d'Espagne, tel que blé, orge, vin, huile, en certaine quantité.

L'introduction des animaux domestiques européens est aussi rapide. Les premiers bœufs labourent une parcelle, en 1550, dans la vallée de Cuzco. En juin 1551, moins de trois années après la fondation de la cité de La Paz, on mentionne, dans les actes municipaux, la gêne causée par le bétail. Vaches, moutons, chèvres, porcs, chevaux, ânes et mulets prennent la plus grande place, et les

camélicés andins domestiques – le lama et l'alpaga – sont délaissés. La commercialisation des mulets est encouragée : l'élevage de ces animaux de bât était aux mains des Espagnols, contrairement à celui des lamas détenu par les Indiens (le mulet porte des charges supérieures à celles du lama).

Les conséquences de la mainmise des Espagnols sur l'agriculture s'est également reflétée sur les plantes originaires des Andes continuant d'être ignorées, affublées d'une connotation péjorative. Par exemple, la quinoa (*Chenopodium quinoa*) qui jouait le rôle de céréale sur l'Altiplano avant l'arrivée des Espagnols a longtemps souffert de l'introduction du blé et de l'orge dans les vallées andines sèches.

Même après l'indépendance des États Sud-américains, dans les années 1810 et 1820, le modèle dominant reste celui de l'Europe. Aujourd'hui encore chez les Méridiens et chez les Indiens, la chicha, la bière de maïs qui est la boisson alcoolisée traditionnelle, est délaissée au profit de la bière à base d'orge d'origine européenne et des boissons gazeuses non alcoolisées (la bière d'origine européenne est fabriquée localement depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle).

Ce n'est qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, que la composante indienne d'une société essentiellement métisse commence à

## Papalisa ou ulluco

Nommée papalisa en espagnol et ulluco en quechua et en aymara, *Ullucus tuberosus* est une plante herbacée annuelle, rampante ou semi-érigée (elle atteint parfois 50 centimètres de hauteur). Les tiges portent des feuilles charnues en forme de cœur, de quelques centimètres de longueur. À l'extrémité des racines, grossissent des tubercules qui tirent leur nom de leur aspect (littéralement, pommes de terre lisses). Ces tubercules ont une forme variable, ronde à cylindrique, mesurant de 2 à 15 centimètres et dont la couleur va du blanc au jaune et, même, au pourpre tacheté.

Des formes sauvages poussent au Pérou et en Bolivie, mais la plante est cultivée dans toutes les Andes, du Venezuela au Nord, à l'Argentine au Sud. Au Pérou, le principal producteur, les superficies cultivées étaient de l'ordre de 200 hectares, au début des années 1990. La papalisa est une culture de complément souvent associée à la pomme de terre, à l'oca et à la papa, au-dessus de 3 000 m d'altitude, ou bien au maïs, au Venezuela.

Elle est cultivée dans les Andes entre 2 500 et 4 000 mètres d'altitude mais elle s'acclimate au niveau de la mer. Elle tolère une grande diversité de sols, mais préfère les terres argileuses.

Les tubercules sont amers ; on les fait bouillir avant de les consommer frites, en purée ou en ragoût. On peut les conserver frais. Toutefois, comme les autres tubercules andins, ils sont souvent exposés au gel nocturne et à la chaudière : lorsque l'eau s'est évaporée, il se conservent pendant des mois. Avant de les manger, on les plonge dans l'eau de cuisson. Les tubercules frais contiennent environ 85 pour cent d'eau, 14 pour cent d'amidon et de sucre et 1 pour cent de protéines. Les rendements des cultures sont faibles en raison des pertes causées par les virus et de la pourriture durant le stockage.



P.-O. Combelles, A. Giorda

## Oca, papa roja ou okka

Encore nommée okka, en quechua, ou truffette acide, en français, *Oxalis tuberosa* est une plante annuelle de 30 à 40 centimètres de hauteur. Les tiges et les feuilles sont vertes ou pourpres. Quatre mois après la plantation de tubercules entiers, des rejets se forment sur les tiges et de nouveaux tubercules apparaissent ; ils atteignent leur maturité au bout de deux à trois mois. Les tubercules ont des formes ovoïdes à cylindriques, des couleurs variées (blanche, jaune ou pourpre, ce qui leur a valu leur nom de papa roja, ou pomme de terre rouge en espagnol) ; ils atteignent parfois une vingtaine de centimètres.

Vraisemblablement originaire de l'Altiplano du Pérou et de la Bolivie, l'oca est le tubercule le plus cultivé après la pomme de terre, du Venezuela à l'Argentine, et surtout au Pérou et en

Bolivie au-dessus de 2 500 mètres.

Introduite au Mexique au XVIII<sup>e</sup> siècle, cette espèce est aussi cultivée de façon intensive en Nouvelle-Zélande.

Elle pousse en zones tropicales et subtropicales et résiste mal à la sécheresse. Les rendements sont meilleurs sur les terrains légèrement acides.

L'oca se consomme comme la pomme de terre, mais également crue et marinée dans le vinaigre. Comme la pomme de terre et la papalisa, elles peuvent aussi être alternativement séchées et congelées : ce mode de conservation traditionnel est nommé le chuño. La valeur nutritive de l'oca est comparable à celle de la pomme de terre.



P.-O. Combelles, A. Giorda

être revalorisée et que les milieux intellectuels s'y intéressent. Cardenas s'inscrit dans ce courant de pensée. Toutefois, il ne verse pas dans le travers de l'indigénisme ; il se refuse à peindre sous les couleurs de l'enfer l'héritage Espagnol et sous celles du paradis perdu celui des Indiens. Plus technicien qu'idéologue, il s'attache surtout à l'amélioration de la pomme de terre et du maïs et à la revalorisation de trois tubercules andins négligés : la papalisa, l'oca et l'isaño.

Sa bonne santé psychique et physique, nécessaire dans un pays où sévissent le mal des montagnes au-dessus de 3 500 mètres, le paludisme, la maladie de Chagas et la leishmaniose (à moindre altitude) aide Cardenas à conserver son enthousiasme tout au long de sa carrière. Vers 1970, des traitements à base de morphine lui seront nécessaires pour supporter un cancer de la prostate.

Il travaille avec les forces armées qui joueront un rôle essentiel dans la vie publique du xx<sup>e</sup> siècle, en Amérique latine, et jusqu'en 1982, en Bolivie. Ainsi, il enseigne dans les collèges militaires de La Paz au début de sa carrière professionnelle ; il collabore à un projet d'usine de quinine dans les années 1930 pour lutter contre le paludisme des troupes ; il étudie les plantes médicinales durant la guerre du Chaco et il dispense des cours de chimie aux élèves des écoles des armées, dans les années 1940. Toutefois, jamais Cardenas n'apporte son soutien aux régimes militaires dictatoriaux : la politique ne l'attire pas.

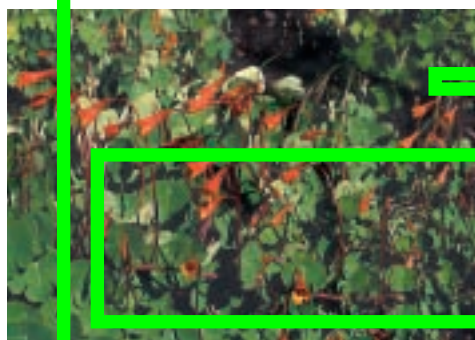
Grâce à ses publications, et bien qu'il soit autodidacte, Cardenas devient, en 1936, recteur de l'Université San Simon de Cochabamba. Ainsi, à 37 ans, il revient dans sa ville natale, où il enseignera pendant plus de 30 ans.

Il sillonne la brousse et les marécages particulièrement malsains de l'Est bolivien, et organise des stages de terrain pour ses étudiants, sur l'Altiplano. Jamais, il ne reniera ses origines : il parle parfaitement les deux principales langues indiennes du pays, le quechua (la langue de l'empire Inca) et l'aymara.

Il appartient à plusieurs réseaux internationaux de savants qui facilitent ses publications, et à des groupes de collecteurs de plantes des Andes. D'un naturel généreux, il envoie gracieusement plantes et graines à ses correspondants scientifiques étrangers. Il dédommage ses collecteurs en leur faisant dédier de nombreuses espèces nouvelles. Cardenas ne bénéficie que d'un seul don de la Fondation Rockefeller : un véhicule tout-terrain qui lui servira à la fin de sa carrière pour les missions en brousse.

## L'isaño ou la mashua

L'isaño, en aymara, la mashua, en Équateur et au Pérou, ou encore le cubio en Colombie, se nomme le *Tropaeolum tuberosum*. De la même famille que la capucine, l'isaño lui ressemble par son port, ses feuilles et ses fleurs. C'est une plante herbacée pérenne semi-érigée, rampante ou parfois grimpante de plusieurs dizaines de centimètres de longueur. Les tubercules apparaissent vers trois mois.



P.-O. Combelles, A. Gioda

À maturité, ils sont coniques, du blanc au rouge, parfois tachetés, et leur chair est jaune.

Des types sauvages de cette plante poussent au Pérou et en Bolivie au-delà de 3 000 mètres et en Équateur et en Colombie entre 1 500 et 2 000 mètres. C'est le tubercule le moins consommé des Andes et on ne cultive nulle part ailleurs. L'isaño réclame beaucoup d'eau et, tolérant aux sols alcalins, il prospère dans les milieux fertiles riches en matière organique.

Les tubercules ont un goût amer, qui disparaît à la cuisson. On les consomme frites ou en soupe. Congelés et séchés, ils perdent aussi leur amertume et ils peuvent se conserver de longs mois comme les autres tubercules andins. Ils sont riches en vitamine C.

Il paie sur ses fonds propres sa bibliothèque et son laboratoire photographique, notamment. Pendant de nombreuses années, il représente son pays dans les instances agronomiques et botaniques internationales.

## CARDENAS ÉCOLOGISTE

Martin Cardenas ne participe pas directement à la vie politique de son pays. Il n'adhère ni aux idées fascistes en vogue, en Amérique latine jusqu'aux années 1950, ni aux idées communistes répandues jusque dans les années 1970. C'est un positiviste. Pour changer les mentalités, Cardenas croit à la diffusion du savoir scientifique et technique dans les différentes couches sociales, y compris chez les Indiens.

Toutefois, en Amérique latine, la tâche est ardue, car l'héritage colonial espagnol a diffusé, parmi l'élite, le goût des études de droit. Le mépris des travaux manuels et de la technique dans une civilisation essentiellement urbaine est ancré dans la noblesse d'Espagne installée aux Amériques. Dans ces conditions, la culture scientifique et, notamment, l'agronomie ont des difficultés à se répandre. Selon Cardenas, aucune révolution nationale ou internationale ne sera un remède à l'ignorance des paysans. Il est le premier écologiste andin, se battant pour

la conservation et la protection de la montagne, alors que la plupart des progressistes prônaient alors une industrialisation massive pour sortir le continent Sud-américain du sous-développement. Durant les dernières années de sa vie, il écrit de nombreux articles, mais sa voix n'a guère d'écho hors du cercle de ses amis.

Cardenas ne fut ni prisonnier de son époque ni de son milieu d'origine, mais il ne fut pas en phase avec les aspirations de la société de son époque, urbaine et fascinée par le miracle industriel. Plus de 25 années après sa disparition, son message reste d'actualité : les forêts naturelles d'Amérique du Sud, abattues à un rythme accéléré, doivent être préservées ; les produits de l'agriculture traditionnelle andine, notamment la papalisa, l'oca et l'isaño, doivent être davantage exploités.

**Alain GIODA reconstruit l'histoire du climat andin dans le programme Neiges et Glaciers Tropicaux de l'Institut de recherche pour le développement, IRD, en association avec le Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie, SENAMHI, à Cochabamba. Katia HUMALA-TASSO, chercheur en ethnobotanique, étudie les plantes natives cultivées à l'Institut Français des études andines, IFEA, à La Paz.**



# Les saveurs du fromage

HERVÉ THIS

*L'acide lactique et les sels minéraux sont les principales molécules qui composent de la saveur au fromage de chèvre.*

Les arômes ont le beau rôle dans l'industrie alimentaire : de nombreuses sociétés se préoccupent d'en produire et d'en vendre aux industriels qui fabriquent les yaourts, les soupes, les sauces... Toutefois les aliments qui n'ont que de l'arôme ne sont flatteurs qu'au nez ; il leur manque de la saveur, notamment. D'où l'intérêt pour les molécules sapides (qui ont de la saveur), encore trop mal connues. Ces molécules exercent-elles le même effet quand elles sont dans les aliments et quand elles sont en solution dans l'eau, où leurs propriétés sont étudiées depuis longtemps ? Au Laboratoire INRA de recherches sur les arômes, à Dijon, Christian Salles, Erwan Engel et Sophie Nikolaus ont étudié cette question en analysant des fromages de chèvre, les « boutons de culotte ».

Après mastication de l'aliment, les molécules sapides sont véhiculées par la salive jusqu'aux récepteurs gustatifs des papilles. Aussi les physico-chimistes cherchent essentiellement ces molécules parmi les composés solubles dans l'eau, c'est-à-dire dans la partie aqueuse des aliments. Pour le fromage, cette dernière contient notamment du lactose (un sucre), de l'acide lactique (formé par les micro-organismes, à partir du lactose, au cours de la fabrication), des sels minéraux, des acides aminés, des peptides (de courts enchaînements d'acides aminés). Si la saveur de la plupart de ces composés est connue, on ignorait leur effet en mélange : parmi les composés de la fraction aqueuse des fromages, certains masquent l'effet d'autres molécules sapides, d'autres en augmentent l'effet (exhausteurs).

Pour identifier ces effets, les physico-chimistes ont testé des solutions qui ne comprenaient que certains des composés, dont la présence avait été déterminée dans la fraction aqueuse de boutons de culotte.

Les peptides ne pouvant être identifiés simplement, les chercheurs de Dijon les ont isolés de la fraction hydrosoluble récupérée à partir de 20 kilogrammes de fromage : après des centrifugations,

ils ont fractionné le jus par des ultrafiltrations successives, sur des membranes qui ne faisaient successivement passer que des molécules de masse moléculaire inférieure à 10 000, puis à 1 000 et enfin à 400 ; les membranes retenaient les peptides.

Pour évaluer l'effet des divers composés sur chacune des saveurs, un jury de dégustation de 16 personnes a comparé la fraction aqueuse reconstituée à une solution de même composition, à l'exception d'un ou plusieurs composants qui avaient été volontairement omis. Évidemment ces « tests d'omission » étaient faits dans des conditions rigoureuses : produits anonymes, cabines individuelles, lumière rouge pour éviter les effets de couleur. Chaque dégustateur était muni d'un pinceau, qui supprimait la perception des arômes.

Lors des séances de mesure qui ont suivi un entraînement, les dégustateurs devaient noter sur une échelle chacune des saveurs par rapport à une solution de référence spécifique pour chaque saveur, pour chaque échantillon présenté.

Les premières analyses sensorielles ont surpris : alors que de nombreuses études faisaient entrevoir des propriétés sapides des peptides, ces derniers n'ont pas d'effet direct ou indirect sur la saveur, quel que soit leur masse moléculaire ! Pourquoi avait-on précédemment trouvé une saveur amère à ces molécules ? Se réservant d'élucider ultérieurement l'effet sapide éventuel de ces composés à partir d'autres fromages, les physico-chimistes ont poursuivi leur étude sans les peptides.

Par comparaison de solutions dont on avait ou non retiré le lactose, les chercheurs ont découvert que ce composé n'avait pas d'effet sur la sapidité des solutions modèles. Les acides aminés, également, sont apparus insipides. En revanche, l'acide lactique et les sels minéraux sont des molécules qui contribuent puissamment à la sapidité. L'acidité était

principalement due aux ions hydrogène libérés par l'acide phosphorique et par l'acide lactique, avec un effet exhausteur du chlorure de sodium : ainsi, en présence de sel, la note acide est supérieure. Pourquoi ? La question est ouverte...

La saveur salée résulte de l'effet des chlorures de sodium, de potassium, de calcium et de magnésium, ainsi que du phosphate de sodium. Une partie de la saveur amère provenait des chlorures de calcium et de magnésium, elle était partiellement réprimée ou masquée par des associations avec le chlorure de sodium et par les phosphates. Quant aux saveurs sucrée et umami (dus notamment au monoglutamate de sodium, largement utilisé dans les soupes ou sauces industrielles), elles étaient si faibles que les chercheurs n'ont pu leur associer des composés hydrosolubles.

Que décèler de telles études, au-delà des contributions précises qu'elles révèlent sur les divers composés de la partie hydrosoluble des fromages ? Tout d'abord, on ne peut pas attribuer une saveur à un seul composé, et, pis encore, les divers composés sapides ont des effets répressifs ou exhausteurs les uns sur les autres. D'autre part, on sait maintenant le type de composés qu'il faudrait ajouter aux fromages pour renforcer certains saveurs ou, au contraire, en masquer d'autres. L'industrie fromagère peut difficilement pratiquer de tels ajouts (pour des raisons législatives, et aussi parce que les molécules dissoutes dans le lait seraient perdues en quantités non maîtrisables, lors de l'égouttage), mais les Gourmands peuvent s'amuser à saupoudrer leurs fromages de divers sels : à vos chlorures, à vos phosphates !

**Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 25 janvier 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.**



## L'eau douce du fond de la mer

*L'eau douce circulant dans les réseaux souterrains jaillit parfois du fond des mers. On peut capter ces sources.*

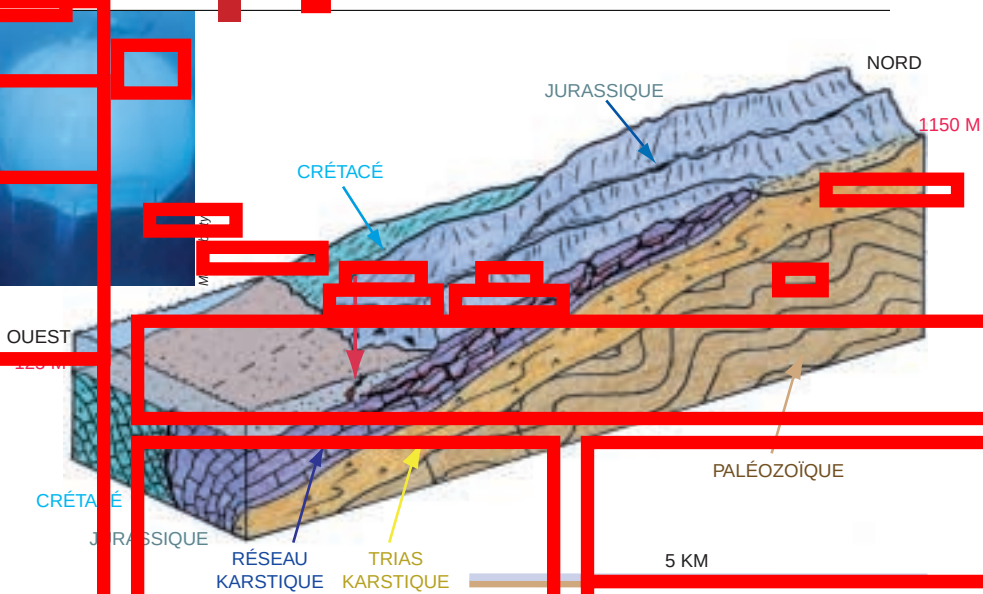
**D**ans l'Antiquité, les marins grecs se ravitaillaient en eau douce sans accoster, en immergeant une amphore retournée lestée qu'ils basculaient au-dessus de la source pour la remonter remplie d'eau potable. En Grèce moderne, près du port d'Itéa, les bergers font boire leurs troupeaux... sur le rivage d'une crique où jaillit, à quelques mètres du bord, l'eau douce d'une source au débit élevé.

Ces sources sous-marines émergent de massifs côtiers carbonatés, où ont été creusées les structures originales, les karsts, résultant de la dissolution du calcaire par les eaux de ruissellement : le gaz carbonique des eaux pluviales élargit les interstices de la roche calcaire et crée un réseau complexe de chenaux, de conduits souterrains et de grottes.

La circulation de l'eau dans ces réseaux s'effectue par gravité, en écoulement libre, ou sous pression dans des «conduites forcées» et des siphons, engendrant parfois des rivières souterraines, comme à Padirac, dans le Lot. Les eaux sont drainées jusqu'à un niveau de base, constitué par une couche imperméable ; elles ressurgissent sous forme de sources dites «vauclusiennes», qui se caractérisent par un débit important et de grandes variations de régime.

Ainsi, le réseau drainant, en bordure de mer, aboutit à des sources qui affleurent et jaillissent à l'air libre ; elles sont souvent en relation directe avec des failles importantes qui jouent un rôle de conduit naturel. Comment ces résurgences peuvent-elles être sous-marines ? Deux phénomènes peuvent alors se produire : soit une subsidence du socle continental, affaiblement lent plus ou moins régulier ; soit une montée du niveau marin résultant d'une fonte des calottes glaciaires.

Dans les deux cas, la partie basse du réseau karstique est recouverte par la mer, et certaines sources sont progressivement submergées. Quand le conduit karstique est étanche et que la charge d'eau douce est supérieure à la pression de la colonne d'eau de mer à la profon-



Coupe géologique de la région au large du cap de Mortola, à proximité de Menton. Une partie du réseau karstique est immergée, et la résurgence d'eau douce est sous-marine. Cette résurgence à une profondeur de 36 mètres est captée à l'endroit désigné par la flèche rouge. En vignette : dispositif de captation de l'eau douce.

deur de l'émergence, l'eau douce continue à jaillir sur le fond marin. C'est le cas des rivières souterraines de Port Miou et de Bestouan (le plus vaste réseau immergé d'Europe) dans le massif des calanques entre Marseille et Cassis.

Nous avons étudié l'émergence sous-marine située à 800 mètres au large du cap Mortola, à l'Est de Menton. La source émerge à 36 mètres de profondeur, au pied d'un dépôt de tuf calcaire. À la fin de l'été 1999, son débit atteignait 500 litres par seconde. Elle est alimentée par un massif datant du Jurassique (il y a quelque 170 millions d'années) formant un vaste ensemble karstifié entre Sospel et la mer. Vers le rivage, ce massif se réduit à une étroite bande que quelques failles relient aux roches du Crétacé supérieur, peu perméables, situées de part et d'autre : l'eau est ainsi canalisée entre ces deux accidents de terrain ; la source du cap Mortola se situe dans le prolongement de la faille orientale.

Quelle est la cause de la submersion de cette source ? La dernière glaciation du Würm, qui a duré 70 000 ans, a atteint son apogée il y a environ 21 000 ans, entraînant une baisse du niveau de la Méditerranée de 125 mètres et une réactivation des karsts, créant des grottes accessibles et habitées : ainsi, la grotte Cosquer s'orne de dessins qui datent de -18 000 à -27 000 ans.

À cette époque, la source de Mortola jaillissait à près de 90 mètres au-dessus du rivage. Lors du réchauffement, l'eau

a recouvert les vallées. On distingue plusieurs gradins d'érosion, dont l'un, à -36 mètres, date de -8500 environ (entre -8400 et -9000). Nos lointains ancêtres devaient s'y abreuver !

Aujourd'hui, on cherche à localiser les sources sous-marines d'eau douce lors de campagnes géophysiques et océanographiques qui précisent les paramètres physico-chimiques de l'eau. Grâce à des photosatellites, à des clichés aériens, et au positionnement fourni par le GPS (le système de positionnement global), et après une série de plongées, on estime le débit et les caractéristiques topographiques et structurales de l'émergence. Cette exploration scientifique permet d'évaluer le «gisement». Quand celui-ci paraît économiquement viable, on met en place un dispositif de récupération de l'eau douce qui respecte l'environnement naturel de la source.

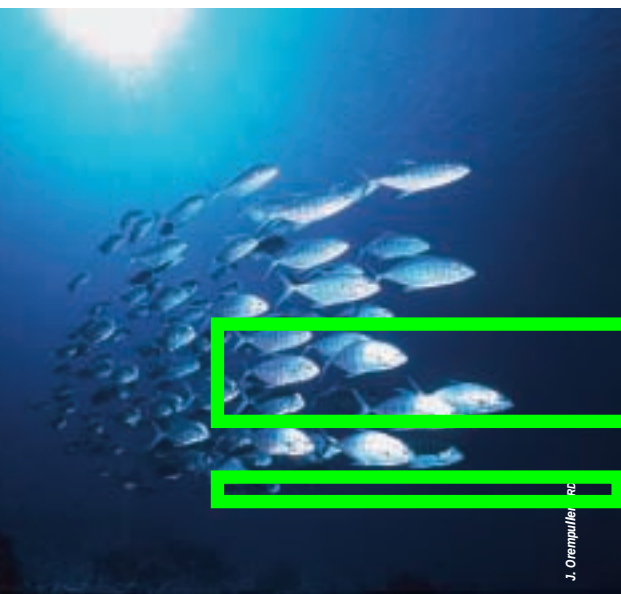
Pour le captage de Mortola, le matériel mis en œuvre comprend une calotte sphérique couplée de huit mètres de diamètre et de trois mètres de hauteur ancrée par des blocons en béton, une cheminée haute de 12 mètres, et une pompe immergée disposée au pôle de la calotte sphérique. La souplesse de l'ensemble assure une excellente résistance à un courant supérieur à trois nœuds. Une filiale «Asie» de notre société vient d'être créée afin de mettre en production des champs aquifères off-shore en Indonésie.

P. BECKER, T. CARLIN et P. LEMPÉRIÈRE  
NYPHÉA-GÉOCCAN SOLMARINE

## Sardines et anchois

**Pour se protéger des prédateurs, certains poissons se regroupent dans des bancs d'autres espèces, mais ils ne résistent pas aux nouvelles conditions de vie.**

Les différentes espèces de poissons de pleine mer (sardines, anchois, maquereaux...) ne coexistent jamais en grand nombre dans une même région océanique. On constate que, lorsque la biomasse des anchois augmente, celle des sardines diminue, parfois pendant plusieurs décennies. Ainsi, le long des côtes californiennes, la population de sardines a diminué à partir des années 1940 : à la fin des années 1960, on n'en trouvait plus que quelques-unes, dans des bancs de maquereaux. Le phénomène inverse existe aussi, les sardines se multipliant au détriment des anchois. Depuis longtemps, les océanographes s'interrogent sur l'origine de telles variations de population. Ces poissons ne sont pas en concurrence pour la nourriture, car ils n'ont pas le même régime alimentaire. D'autre part, ils mangent aussi bien leurs propres œufs que ceux des autres espèces : il n'y a pas de prédation préférentielle de l'une des espèces par l'autre. Philippe Cury et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) ont découvert que les contraintes de la vie en banc sont responsables des variations de population.



Les bancs de poissons de pleine mer contiennent parfois plusieurs espèces. L'espèce minoritaire pâtit alors du mode de vie imposé par l'espèce majoritaire, de sorte que son nombre d'individus décroît.

En analysant les prises au filet au large du Sénégal, de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique du Sud, et les données acoustiques des campagnes de détection par sonar, ils ont montré que, plus les membres d'une espèce sont rares, plus ils s'agglèment aux bancs d'une autre espèce, la proportion de l'espèce minoritaire est un indicateur de son abondance dans une région océanique donnée. Par exemple, en Afrique du Sud, lors de la pêche de sardines, à la fin des années 1930, ces poissons représentaient dix pour cent de la biomasse des bancs où ils étaient pêchés.

N'étant pas assez nombreux pour former des bancs contenant leur seule espèce, ils rejoignent des bancs d'une autre espèce, de taille et de forme voisines. Les prédateurs ne les distinguent pas les uns des autres. En se camouflant dans un banc de poissons de même apparence, ils assurent leur survie. Toutefois, le mode de vie des sardines et celui des anchois diffèrent. Par exemple, les sardines migrent pour se reproduire. Les anchois qui les accompagnent, plus sédentaires, ne nagent pas aussi vite et peinent à les suivre. Les sardines filtrent l'eau pour se nourrir de particules en suspension. Les anchois aussi, mais ils ne récupèrent pas des particules aussi petites, si bien qu'ils ont des difficultés à survivre dans certains endroits où se rendent les sardines.

Similairement, les sardines subsistent mal dans des bancs de maquereaux. Ceux-ci sont des prédateurs : ils chassent des poissons plus petits, dans des zones où il n'y a pas toujours de nourriture en suspension pour les sardines. Enfin, pendant la période de reproduction, les anchois et les sardines mangent eux-mêmes une partie de leurs œufs : quand ils sont minoritaires dans un banc, presque tous leurs œufs sont mangés par l'espèce majoritaire (les périodes de ponte des deux espèces sont décalées). Ainsi, les poissons de l'espèce minoritaire se raréfient, car ils supportent mal les conditions de vie imposées par l'espèce majoritaire ; de plus, ils ne se reproduisent quasiment plus.

On constate que les anchois prolifèrent au détriment des sardines, ou les sardines au détriment des anchois. La vie en banc, qui a un impact négatif sur l'espèce minoritaire, amplifie la perturbation initiale, due soit à un changement de l'environnement, soit à une pêche trop intensive.

## BRÈVES

### Caviar grand cru

Homogénéité, couleur de bronze, présence de taches blanches, grains collants, odeur d'anchois, de vinaigre, de bière... ces critères disparates ont été récemment définis par des biologistes de l'IFREMER pour caractériser le caviar. Grâce à cette «carte d'identité», les œufs d'esturgeons, qu'ils soient sauvages élevés en bassin artificiel, en France, ou en étang, dans les pays d'Europe de l'Est, sont appréciés objectivement. Les premières comparaisons montrent que les propriétés organoleptiques du caviar dépendent principalement de l'alimentation de l'esturgeon, tandis que les conditions d'élevage n'ont guère d'influence. On évalue aujourd'hui le caviar comme un grand vin.



### Observation directe

C'est l'arabesque des chasseurs de planètes. Régulièrement, des astronomes annoncent avoir observé une planète hors du Système solaire. La dernière en date provient d'un groupe britannique qui prétend avoir observé directement la lumière réfléchie par une planète dans le spectre de l'étoile autour de laquelle elle orbite. L'effet statistique est marginal : il a fallu analyser près de 400 spectres de l'étoile Tau de la constellation du Bouvier pour déceler un léger effet. Ainsi la méthode est lourde à mettre en œuvre, mais elle donne des informations nouvelles, notamment l'albédo de la planète, c'est-à-dire la quantité de lumière qu'elle réfléchit.

### Fille ou garçon?

Quel sera le sexe de l'enfant à paraître? Avant l'échographie qui permet de «voir» l'enfant dans le ventre de sa mère, diverses méthodes empiriques étaient utilisées pour cette prévision. Une équipe suédoise a étudié les femmes qui avaient été hospitalisées en raison de la gravité de leurs nausées et vomissements au début de leur grossesse. Plus ces désagréments sont marqués, plus l'enfant a de chances d'être une fille. Ces désagréments résulteraient d'une augmentation de la concentration en hormone HCG. Or, les concentrations maternelles en HCG sont supérieures, à la naissance, lorsqu'il s'agit d'une fille.

## Martini glacé

Un secret d'agent secret a été dévoilé : les *Martini* qui sont vigoureusement agités, mais non remués, comme les préfère James Bond (*shaken, not stirred*) ont des vertus qui expliquent sans doute l'excellente santé de l'espion de Sa

Gracieuse Majesté. Une équipe américaine a étudié les propriétés antioxydantes de la boisson préparée selon l'une ou l'autre façon. Agité, le *Martini* inactive plus efficacement le peroxyde d'oxygène, dont on connaît

les propriétés délétères sur les membranes cellulaires. L'équipe a également montré que, parmi les deux constituants de l'apéritif, le gin et le vermouth, le second a les propriétés antioxydantes les plus marquées. Toutefois James pourrait encore améliorer sa forme en buvant du whisky dont les propriétés anti-oxydantes sont supérieures.

## Du bar au loup

Chez le poissonnier, que vous demandiez un loup ou un bar, vous pensez parler du même poisson que seule la provenance distingue. Le loup est méditerranéen, tandis que le bar fréquente l'océan Atlantique. Pourtant, des études génétiques effectuées au laboratoire Génome, Populations et Interactions, de l'Université de Montpellier, montrent que le génome des deux populations diffère. La mer d'Alboran, située entre Almería en Espagne et Oran, au Maroc, constitue une frontière naturelle qui sépare les deux populations : le poisson pêché à Casablanca est plus proche d'un bar danois que d'un loup marseillais!

## Nouvelles espèces en bouche

On connaissait plus de 500 types de bactéries – presque autant que dans la forêt tropicale – colonisant la bouche. La plupart assurent sécurité et confort ; seules quelques-unes abîment les dents ou donnent mauvaise haleine. David Relman et ses collègues de l'Université Stanford, qui s'intéressent aux bactéries de la plaque dentaire, ont été surpris d'y retrouver, à côté des espèces connues, des ADN inédits : 37 nouvelles espèces ont été identifiées. L'une d'elles est apparentée à des micro-organismes qui oxydent les métaux et que l'on trouve dans les sédiments lacustres. Que fait-elle dans la bouche ? Y séjourne-t-elle ou avait-elle été apportée par l'eau de boisson ? La question reste ouverte.

## Autocollisions dans le ciel

Un système embarqué permettrait aux avions de se croiser sans risque dans le ciel.

Cela n'aurait pas dû arriver. L'été dernier au-dessus de la Chine, deux *Boeing 747* volaient l'un vers l'autre dans le même couloir aérien, séparés verticalement d'environ 700 mètres. Alors que les avions s'approchaient, le système anticollision de l'appareil le plus bas émit un message d'alerte sonore : «Grimpez, grimpez». Le pilote obtempéra et son avion se retrouva à quelques dizaines de mètres seulement sous le ventre de l'autre appareil. Les 422 passagers et membres d'équipage échappèrent de justesse à ce qui aurait été la pire des collisions de l'histoire de l'aviation.

Dans le monde, près de 10 000 systèmes anticollisions sont placés sur les avions de passagers et de fret. Mis au point dans les années 1980, après de nombreuses collisions en vol, ces instruments interrogent le radar d'altitude des avions voisins, puis affichent l'altitude du trafic jusqu'à 25 kilomètres alentour et, le cas échéant, émettent un message d'alerte audio. L'efficacité du système est avérée : après son adoption, le nombre de collisions évitées de justesse est passé de 20 à 4 par an, aux États-Unis. Son déploiement n'est pas terminé. Obligatoires pour les avions de passagers aux États-Unis depuis 1993, les instruments anticollisions le seront en Europe l'an prochain et dans le monde entier, en 2003 (pour les avions de plus de 5 tonnes ou qui transportent plus de 30 passagers).

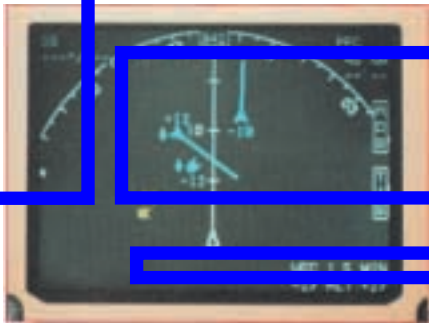
Hormis cet incident en Chine, le système reste très sûr. Cependant, les ingénieurs relâchent à un nouvel instrument dont le rôle ne serait pas l'évitement des collisions. Aujourd'hui, les contrôleurs aériens sont chargés de maintenir l'écart entre deux avions. Ne pourrait-on imaginer transférer une partie de cette responsabilité aux pilotes eux-mêmes ?

Un nouvel instrument, l'ADB-S, cofinancé par l'Association des compagnies aériennes de fret et par la Direction de l'aviation américaine, pourrait faire ce travail. Couplé à un récepteur GPS, il identifie et affiche en temps réel le trafic aérien à des centaines de kilomètres à la ronde. Non seulement il donne la position du trafic par rapport à l'avion hôte, mais il indique

également la vitesse du trafic et extrapole la position future des avions. Contrairement à la surveillance radar classique à bord des appareils de lignes, il n'a pas besoin d'interroger les appareils voisins pour avoir une réponse.

En juillet 1999, un test en vraie grandeur aérien 24 appareils équipés de l'ADB-S. Les pilotes trouvèrent que l'affichage indiquait précisément l'accélération ou le ralentissement de l'avion qui les précédait, ce qui leur permettait d'ajuster facilement leur propre vitesse. Le plus sûr, par souci de sécurité, les pilotes restent plus éloignés des avions voisins que la distance minimale réglementaire, qui est égale à cinq kilomètres et demi lors des manœuvres d'atterrissage. Grâce à ce nouveau équipement, les avions pourront être séparés de cette distance, ce qui améliorera la cadence des atterrissages en toute sécurité. De surcroît, à l'inverse de l'ancien système et des radars embarqués classiques, le nouveau système fonctionne même au sol, ce qui réduira le risque d'accidents sur les pistes et dans les manœuvres d'approche.

Malgré le succès des essais, ces instruments restent très critiqués. Le déploiement des instruments anticollisions n'est pas terminé et chaque appareil coûte près d'un million de francs. Investir dans un nouvel appareillage serait onéreux. Toutefois, le système ADB-S pourrait avoir son utilité, notamment pour les vols océaniques où le positionnement des avions se fait encore par radio HF. L'ADB-S sera-t-il la pierre angulaire du contrôle aérien du futur ?



Les attentes sur les pistes d'aéroports seront réduites grâce au système ADB-S, qui affiche la position et la direction du trafic alentour sur un écran du poste de pilotage. Le triangle blanc est l'appareil-hôte, les autres avions sont en bleu et en jaune.

## L'eau potable des singes

**Les chimpanzés et les babouins creusent des trous près des flaques d'eau croupie pour y boire de l'eau filtrée.**

**A**u Sénégal, les grands animaux sont encore relativement abondants. À la saison des pluies, ils se dispersent, car l'eau ne manque pas. À la saison sèche (de novembre à mai), ils se concentrent autour des points d'eau.

Toutefois, ces dernières années, il a plu moins que d'habitude. Les modifications de l'environnement, qu'elles aient des causes naturelles (sécheresse, désertification...) ou anthropiques (exploitation des ressources naturelles, extension des cultures...) se répercutent sur le comportement de la faune, notamment des grands singes. L'éthologiste (spécialiste des comportements animaux dans leur milieu naturel) Anh Galat-Luong et l'écologue Gérard Galat, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ont suivi des populations de primates, depuis 1996, et ont découvert deux nouveaux aspects de leur comportement.

Premièrement, ils ont observé qu'en saison sèche, certains chimpanzés et babouins négligent les flaques d'eau croupie au fond des rivières asséchées. Pour boire, ils creusent des trous à la main (les chimpanzés parfois à l'aide d'un bâton de bois) à proximité des flaques, dans du sable fin. L'eau emplie le trou après avoir été filtrée par le sable : elle est limpide. Les analyses bactériologiques montrent qu'elle est dépourvue des germes pathogènes présents dans les flaques d'eau voisines. Les empreintes des chimpanzés et des babouins (identifiables par leurs formes, leurs dimensions, leurs proportions, la répartition des pressions...) sont localisées autour des trous, tandis qu'on ne

**Ce trou (au centre) a été creusé par un chimpanzé à proximité d'une flaque d'eau croupie (en haut gauche). L'eau s'infiltre et emplie le trou. Le singe améliore ainsi la qualité de l'eau qu'il boit.**

distingue aucune trace autour des flaques d'eau croupie. De nombreux mammifères creusent le fond des rivières complètement asséchées, mais les chimpanzés sont les seuls à creuser quand l'eau est encore disponible dans des flaques résiduelles : ils améliorent ainsi la qualité de l'eau qu'ils boivent.

Deuxièmement, A. Galat-Luong et G. Galat ont aussi observé une évolution du comportement du Colobe bai, une espèce de primate qui, il y a 20 ans, était uniquement arboricole et se nourrissait de feuilles. Aujourd'hui, elle se déplace sur le sol de la savane, s'éloigne des rizières de forêts qui longent les rivières et mange des fruits. La déforestation est la principale cause de cette évolution : certaines forêts de l'Ouest du Sénégal sont quatre fois moins denses qu'il y a 20 ans.

Ces travaux montrent les capacités d'adaptation des primates aux changements de l'environnement en Afrique de l'Ouest. Les populations concernées sont de plus en plus divisées en sous-populations isolées les unes des autres ; les groupes les plus petits sont menacés d'extinction. Ces recherches serviront à leur protection, car elles fournissent les fondements scientifiques nécessaires aux personnes en charge de la gestion de la faune du Sénégal.

## Transit de planètes

**Première observation du transit d'une planète extrasolaire.**

**E**n 1753 et en 1764, Guillaume le Gentil de la Galaisière et d'autres astronomes observent le passage de Vénus devant le Soleil. Grâce à cette observation, les astronomes mesurent avec précision le diamètre de Vénus. En 1999, deux équipes internationales ont refait le même type d'observations que leurs illustres prédécesseurs, mais hors du Système solaire ; ils ont observé, de manière indépendante, le transit d'une planète extrasolaire devant HD 209458, une étoile à proximité du Soleil.

Depuis cinq ans, les astronomes ont découvert une trentaine de planètes extrasolaires. Jusqu'à aujourd'hui, les seules informations sur ces objets résultaient de la mesure des vitesses radiales de leur étoile hôte : la présence d'une planète autour d'une étoile modifie l'orbite de cette dernière, qui semble osciller dans le ciel. En analysant les raies du spectre lumineux émis par une étoile, on détecte des oscillations, d'où l'on déduit leur orbite et les caractéristiques d'une éventuelle planète, telles sa masse et sa distance de l'étoile.

Les planètes extrasolaires découvertes jusqu'à présent ont des masses voisines de celle de Jupiter, de sorte que l'on imagine qu'elles sont des géantes gazeuses, mais aucune indication sur la taille de ces objets ne pouvait être déduite. Les astronomes ont imaginé qu'en observant le transit d'une planète devant une étoile, la luminosité de l'étoile serait réduite.

Verrait-on des transits pour toutes les planètes extrasolaires ? En supposant que les plans des orbites sont inclinés aléatoirement par rapport à la ligne de visée et en considérant des planètes de la taille de Jupiter, en orbite à 7,5 millions de kilomètres de leur étoile, on estime les chances d'observer un transit à une sur dix.

Les efforts se sont concentrés sur HD 209458, dont on avait découvert les modifications périodiques de l'orbite en juin 1999. En août et en septembre 1999, une équipe composée d'astronomes suisses et américains, dirigée par David Charbonneau, du Centre d'astrophysique de Harvard, a observé cette étoile pendant une durée cumulée de dix nuits. Durant plusieurs nuits, l'observation ne révéla pas de variation de luminosité, mais, le 9 et le 16 septembre, l'éclat de l'étoile diminua de près de deux pour cent plusieurs heures durant (voir la figure). Cette baisse de luminosité était due au passage de la planète devant l'étoile ; le rapport de luminosité est

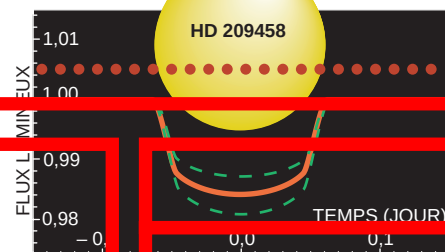


**À la saison sèche, les bandes de singes se rassemblent autour des points d'eau. Ces babouins traversent une mare asséchée.**

TRACE



À gauche, on observe le transit de Mercure qui est passé devant le Soleil en novembre 1999. À droite, la variation de la luminosité en fonction du temps, indique que, de la même façon, une planète (les points rouges) est passée devant l'étoile HD 209458 (en jaune). La courbe qui s'ajuste le mieux aux données (en rouge) indique le rapport entre la



surface du disque de la planète et celle de l'étoile. Connaissant la taille de l'étoile, les astronomes en déduisent la taille de la planète. Les courbes en pointillés verts indiquent la luminosité que l'on aurait mesurée si le diamètre de la planète avait été supérieur (courbe du haut) ou inférieur (courbe du bas) de dix pour cent à la taille calculée.

simplement le rapport entre la surface du disque de la planète et celle de l'étoile.

Pour connaître la surface du disque de la planète, il faut donc connaître la surface du disque stellaire. À l'aide d'observations spectroscopiques et de différents modèles, les astronomes calculèrent que HD 209458 a une masse égale à 1,1 masse solaire et un rayon de 1,3 rayon solaire. Munis de ces éléments et de l'observation du transit, les astronomes estimèrent que la planète décelée a un rayon de 1,5 fois le rayon de Jupiter et une masse de 0,7 fois la masse de Jupiter. C'est la première planète extrasolaire dont on connaît la masse et le rayon, de sorte que de nombreuses informations nouvelles

peuvent être déduites. Sa densité moyenne est de 0,23 gramme par centimètre cube, sensiblement inférieure à la densité moyenne de Saturne, la moins dense des planètes du Système solaire. Les astronomes ont aussi estimé le flux d'énergie reçu par cette planète de la part de son étoile : la planète devrait encore avoir la plus grande partie de son atmosphère.

Cette découverte est une étape majeure dans l'étude des planètes extrasolaires : elle confirme que les variations de vitesses radiales d'étoiles résultent de la présence d'une planète en orbite, notamment pour les orbites de courte période où un doute subsistait. De surcroît, grâce à une bonne estimation du rayon de la pla-

nette et de sa masse, on peut affirmer qu'il s'agit d'une planète analogue aux planètes gazeuses du Système solaire.

La combinaison de la spectrométrie, des mesures de vitesses radiales et des mesures de transit, est un outil particulièrement puissant pour calculer les paramètres orbitaux des planètes extrasolaires et certains paramètres, tel le rayon, lequel est déterminé par la masse de la planète, son âge, son insolation et sa composition. Les données de cette planète sont conformes aux modèles de planète mis au point par Tristan Guillot, de l'Observatoire de Nice. De l'ère de la détection des planètes extrasolaires, nous entrons de plein pied dans l'ère de leur physique.

## L'électricité de la peau de chat

*L'électricité statique explorée à l'échelle atomique.*

« Quand un morceau de verre et un morceau de résine sont frottés l'un contre l'autre, tant que leurs surfaces frottées sont laissées en contact, aucune propriété électrique ne se manifeste ; mais dès qu'on les sépare, ils s'attirent. » Par ces lignes, James Clerk Maxwell commence en 1891 son *Traité de l'électricité et du magnétisme* ; il y décrit les phénomènes triboélectriques, c'est-à-dire d'électrisation par frottements, que nous avons réexplorés à l'échelle submicroscopique, à l'aide des techniques de microscopie à force atomique.

Les Grecs, déjà, avaient constaté que les corps légers sont attirés par des bâtons d'ambre préalablement frottés avec des tissus, mais c'est seulement à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle que les « philosophes naturels » étudièrent systématiquement ces phénomènes et fondèrent alors une nouvelle discipline : l'électricité (en grec, « ambre » se dit « électron »).

La triboélectricité est alors au cœur de toutes les expériences d'électricité, mais au XIX<sup>e</sup> siècle, l'invention de la pile par le chimiste italien Alessandro Volta bouleverse la discipline. Le phénomène triboélectrique devient alors une curiosité, et il faut attendre la mise au point des fibres textiles synthétiques, dans les années 1950, pour qu'il renaisse, les industriels souhaitant éviter les ruptures de chaînes dues aux étincelles électriques, lors du tirage des fils.

La physique moderne décrit alors la triboélectricité par un transfert d'électrons entre des surfaces en contact. Ce transfert est caractérisé par trois paramètres : la charge échangée, l'aire de la surface d'échange, et la différence d'énergie « naturelle » des électrons dans les deux matériaux avant leur mise en contact. Lorsque le contact est établi, les électrons « coulent » comme un « fluide électrique », d'un milieu à un autre, de sorte que tous les électrons aient finalement la même énergie.

En revanche, l'interprétation détaillée du phénomène reste controversée. Plusieurs descriptions théoriques concurrentes proposent des relations différentes entre la densité de charges transférées et la différence d'énergie électronique des deux surfaces. Malheureusement aucune

des expériences ne permettait de tester correctement ces descriptions. Plusieurs questions demeuraient ainsi ouvertes : les électrons transférés proviennent-ils de la surface ou du volume des matériaux ? Les charges transférées sont-elles stables ? Comment évoluent-elles dans le temps ? Comment le frottement détermine-t-il l'échange d'électrons ?

Nous avons analysé la triboélectricité à l'aide d'un microscope à force atomique. Cet instrument, que nous avons adapté au dépôt de charges électriques, permet des échanges sur des surfaces d'aire bien définie et mesure également la quantité de charges déposées et la différence d'énergie électronique entre les matériaux qui participent aux échanges d'électrons.

Le cœur de l'appareil est une pointe fine, métallisée (le sommet s'apparente à une demi-sphère de quelques millièmes de micromètre de diamètre) fixée à l'extrémité d'un levier. Le dépôt de charges s'effectue en deux temps : on pose préalablement la pointe sur la surface d'un isolant, puis on transfère des électrons de la pointe à la surface, soit en frottant la pointe sur la surface, comme on le faisait avec une peau de chat, soit en appliquant une tension électrique entre la surface (une couche d'oxyde isolant que l'on a fait croître sur une feuille métallique) et la pointe. Ce

## Transport de cholestérol

**On a découvert une molécule indispensable à l'excrétion du cholestérol hors des cellules.**

Une pointe de microscope à force atomique a été utilisée pour le dépôt de charges positives ou négatives sur des points voisins d'une surface d'alumine (en rouge, des charges positives et en bleu, des charges négatives).

dépôt effectué, on relève la pointe et on lui fait balayer la surface isolante, à environ 0,1 micromètre au-dessus d'elle, afin d'analyser la répartition des charges électriques.

Pour effectuer cette analyse, on applique une différence de potentiel alternative entre la pointe et la surface, afin de créer une force électrostatique périodique, qui induit des oscillations de la pointe. Mesurées par un système optique, ces oscillations dépendent de la différence d'énergie électronique entre la pointe et la surface. En enregistrant alors, point par point, l'amplitude de ces oscillations, on obtient une carte de la différence d'énergie entre la pointe et la surface. Cette différence d'énergie, qui dépend des charges électriques présentes à la surface de la couche isolante, révèle la charge locale.

Nous avons ainsi constaté, par exemple, que lorsqu'une pointe de platine frotte une surface d'alumine, un électron est déposé pour 10 000 atomes environ. En outre, la quantité de charges par unité de surface est proportionnelle à la différence d'énergie naturelle, quel que soit le mode de dépôt employé : frottement ou simple contact de la pointe sur la surface. Troisièmement, dès que la durée du contact est supérieure à quelques millisecondes, la quantité de charges transférées n'augmente plus. Enfin, pour des isolants épais, les charges déposées sont stables : une fois déposées, elles restent à la surface de l'isolant pendant plusieurs heures.

Ces études permettent principalement de conclure que la triboélectricité correspond à un échange rapide de type «vases communicants» entre le métal et la surface de l'isolant (et pas son volume). De surcroît, on obtient un second résultat important : bien que la pression exercée par la pointe sur la surface soit considérable (plusieurs milliers d'atmosphères), le frottement n'engendre aucun mécanisme spécifique de transfert de charges (tels des défauts mécaniques), contrairement à une hypothèse couramment formulée.

Michel SAINT-JEAN - Université Paris VII  
Groupe de Physique des Solides

Il y a une quarantaine d'années, on découvrit la maladie de Tangier chez deux jeunes enfants, un garçon de cinq ans et sa sœur vivant sur une île située au large de Washington et qui a donné son nom à cette pathologie. Colonisée par quelques Anglais dans les années 1600, l'île fut longtemps un repère de pirates et la peste y faisait régulièrement des ravages. Les quelque 200 habitants acquies de l'île sont issus des mêmes ancêtres, et la consanguinité y est élevée. Il n'est pas surprenant qu'une maladie génétique, telle la maladie de Tangier, y soit fréquente, tandis qu'ailleurs dans le monde, ces cas sont rarissimes.

Les enfants atteints avaient des amygdales anormalement grosses et orange. L'analyse de ces amygdales révéla une accumulation anormale de cholestérol dans ce tissu. On pensa alors trouver une concentration sanguine en cholestérol supérieure à la normale. Or, au contraire, elle était très faible. Par ailleurs, ces malades présentaient des accumulations de cholestérol dans les artères, qui déclenchaient une athérosclérose précoce : généralement, seul un excès de cholestérol dans le sang entraîne la formation de plaques d'athérome dans les parois des vaisseaux qui, lorsqu'elles sont trop volumineuses, peuvent obstruer les artères et être responsables d'infarctus du myocarde ou d'accidents vasculaires cérébraux.

Le cholestérol, absorbé avec les aliments et synthétisé par l'organisme, est un constituant normal des membranes cellulaires et intervient notamment dans la synthèse de certaines hormones. Quand il est excrété dans l'organisme, il est éliminé par les macrophages, les «éboueurs» de l'organisme qui se gorgent d'esters de cholestérol et des caroténoïdes associés (lesquels sont orange). Devant la couleur et la taille des amygdales, on émit l'hypothèse que le cholestérol s'accumule dans les macrophages, qui finissent par éclater ; l'accumulation des débris expliquerait la taille anormale des amygdales.

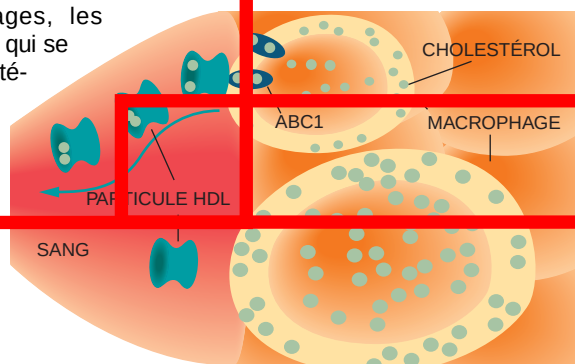
Ainsi chez ces personnes, la concentration sanguine globale en cholestérol est très faible, mais la substance s'accumule locale-

ment. Nicolas Duverger et ses collègues des laboratoires Rhône-Poulenc Rorer, de l'Université de Munster et de l'Institut américain de la santé ont montré que, chez les personnes atteintes de la maladie de Tangier, le cholestérol s'accumule dans la paroi de certaines cellules, car son transporteur intracellulaire, nommé ABC<sub>1</sub>, est absent. Normalement, ABC<sub>1</sub> transporte le cholestérol vers la surface des cellules, où il est pris en charge par des particules présentes dans le sang (nommées HDL).

En effet, le cholestérol est transporté par deux types de particules lipidiques, les lipoprotéines de basse densité (LDL) et celles de haute densité (HDL). Le cholestérol circulant, essentiellement produit par le foie, est véhiculé par les LDL pour alimenter les cellules. Le cholestérol cellulaire excédentaire est pris en charge par les HDL qui le transportent vers le foie, où il est éliminé. Chez les personnes ayant la maladie de Tangier, le transporteur ABC<sub>1</sub> n'est pas synthétisé, le cholestérol cellulaire reste piégé et les particules HDL, qui ne peuvent prendre en charge le cholestérol cellulaire indispensable à leur maturation, sont rapidement dégradées.

Quelles sont les applications potentielles de la découverte du gène ABC<sub>1</sub> ? On devra chercher si le gène est polymorphe, ce qui expliquerait les faibles concentrations en cholestérol HDL observées chez les personnes atteintes de plaques d'athérome dans les coronaires. De surcroît, on pourra étudier, sur des animaux transgéniques, si la surexpression du gène ABC<sub>1</sub> augmente les concentrations sanguines en HDL et diminue l'accumulation de macrophages riches en esters de cholestérol dans les plaques d'athérome. Si tel est le cas, la surexpression du gène ABC<sub>1</sub> pourrait améliorer la régulation de la concentration sanguine en cholestérol.

Les maladies cardio-vasculaires étant la cause de 20 pour cent des décès dans les pays industrialisés, toute nouvelle voie thérapeutique mérite d'être explorée.



**LE CHOLESTÉROL** contenu dans les macrophages est normalement véhiculé par le transporteur ABC<sub>1</sub>, puis éliminé par les particules HDL présentes dans le sang (en haut). Chez les personnes atteintes de la maladie de Tangier, ABC<sub>1</sub> manque (en bas) : le cholestérol reste piégé et les macrophages finissent par éclater.



# La science au XXI<sup>e</sup> siècle

JOHN HADDOX

*Si le futur est aussi riche que le passé, la recherche scientifique procurera, dès les 50 prochaines années, des développements inattendus et exaltants.*

**A**u XX<sup>e</sup> siècle, la science progressera répondant à des questions qui ne nous viennent pas encore à l'esprit. C'est ce que montre l'histoire des 100 dernières années. En 1899, comme aujourd'hui, on réfléchissait aux grands progrès scientifiques du siècle passé afin d'améliorer l'avenir. Au XIX<sup>e</sup> siècle, John Dalton avait montré que la matière est constituée d'atomes, et James Prescott Joule avait établi le principe de conservation de l'énergie, pressenti par Sadi Carnot. Ce dernier avait deviné que le rendement n'est jamais de 100 pour cent quand on transforme une forme d'énergie (thermique, mécanique, chimique, etc.) en une autre forme ; il avait ainsi fondé la thermodynamique. Le problème de l'irréversibilité des phénomènes, et donc du temps, était ainsi posé.

Vers la même époque, Charles Darwin publia son célèbre ouvrage intitulé *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*, qui proposait la théorie de l'évolution pour expliquer la diversité de la vie sur la Terre. En revanche, il n'expliquait ni le mécanisme de transmission du patrimoine génétique ni pourquoi un couple d'individus appartenant à deux espèces voisines en produisent de nouveaux. Maxwell démontra qu'électricité et électromagnétisme obéissent au même ensemble d'équations.

En outre, les lois de Newton décrivent si bien nos observations qu'à l'époque elles pouvaient résoudre n'importe quel problème physique clairement défini. Quelle merveilleuse époque que le XIX<sup>e</sup> siècle !

Seuls les esprits les plus perspicaces remarquèrent les points faibles des théories. Notamment, le Hollan-

dais Hendrik Antoon Lorentz découvrit que la théorie de Maxwell présentait une contradiction implicite : au lieu de supposer l'existence d'un éther où les ondes électromagnétiques étaient censées se propager, Maxwell aurait pu remarquer que le temps passe plus lentement pour un objet en mouvement que pour un observateur immobile. À partir de cette constatation, Henri Poincaré franchit le dernier pas pour arriver à la théorie de la relativité restreinte qu'Einstein publia en 1905. Cette théorie, selon laquelle rien ne se déplace plus vite que la lumière, invalide la physique newtonienne et, d'un point de vue philosophique, ni l'espace ni le temps ne peuvent fournir de référentiel pour mesurer la position d'un objet ou le moment auquel il atteint cette position. À l'époque, peu de physiciens comprirent que, selon la plus simple interprétation de l'expérience d'Albert Michelson et Edward Morley, en 1880, l'éther de Maxwell n'existait pas.

Pourtant quelques-uns étaient agacés, voire choqués, par la complaisance générale vis-à-vis de la science en 1899 ; ceux-là avaient observé que les fondements de la science allaient être ébranlés. Si les atomes étaient invisibles, pourquoi détectait-on des « fragments d'atomes », tels les électrons et les rayons X ?

En 1897, de nouvelles découvertes en 1897 ? De même, Darwin proclamait que les mutations génétiques étaient invariablement minimes, tandis qu'en reprenant les travaux de Gregor Mendel, Hugo De Vries montrait expérimentalement que ces mutations sont rares, mais importantes. Analysés par Thomas Morgan et quelques autres, ces

résultats menèrent à ce que l'on nomme depuis 1906 la génétique classique. Puis on découvrit en 1930 que le darwinisme et le « mendel-morganisme » n'étaient pas si contradictoires qu'on avait cru d'abord.

Aujourd'hui, la science se félicite d'avoir éliminé ces contradictions et bien d'autres. L'autosatisfaction scientifique du XX<sup>e</sup> siècle surpasse celle du XIX<sup>e</sup>. Les applications de la science du début du siècle nous ont donné une impression de libération par rapport à notre condition humaine. Notamment les ondes radio de Marconi entre l'Europe et l'Amérique, et les vols à bord de dirigeables traversant l'air par les frères Wright et leurs associés ont engendré l'industrie des communications et l'industrie aéronautique. Aujourd'hui, nous sommes entourés de puissants ordinateurs que personne n'avait imaginés en 1900. Notre santé est aussi bien meilleure : pensons seulement à la pénicilline !

## Les progrès scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle

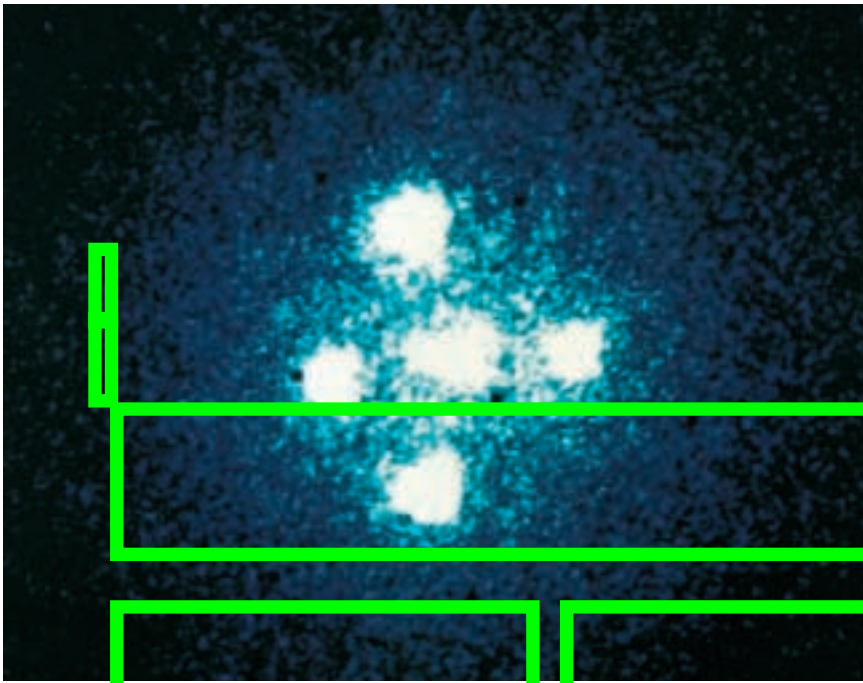
En science fondamentale, nous avons au moins autant accompli au XX<sup>e</sup> siècle que au XIX<sup>e</sup> siècle. La relativité restreinte ne se limite plus à une version simplifiée de la physique de Newton.

Parce qu'elle montre que l'espace et le temps doivent être traités de la même manière, on en est venu à lui attribuer le pouvoir quasi magique de vérifier la validité des autres théories de physique fondamentale.

Les trois grands événements scientifiques qui ont marqué ce siècle furent à peine pressentis. Avec sa théorie de



1. LA TERRE, vue de la Lune : cette image annonce une nouvelle conception de notre monde. La découverte d'autres êtres vivants dans la galaxie bouleverserait notre perception de la place que nous occupons dans la nature.



**2. LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ générale, due à Albert Einstein, décrit la gravité comme une modification de l'espace-temps, prédisant ainsi des effets tels que la déviation de la lumière par les corps massifs. Cette photographie, prise avec le Télescope spatial Hubble, en est un exemple. Elle représente ce qu'on appelle une croix d'Einstein : quatre images d'un même objet céleste entourent l'image centrale d'une galaxie, qui joue le rôle de lentille gravitationnelle.**

la relativité générale, qu'il aurait pu nommer « théorie relativiste de la gravitation », Einstein prit tout le monde de court, en 1915. Seuls les lecteurs assidus du physicien et philosophe viennois Ernst Mach auraient pu prévoir son résultat. En remarquant que, que l'on considère la lumière ou le son, les forces de gravitation sont les manifestations d'un champ qui s'étend jusqu'aux confins de l'Univers, Einstein montra que la structure et l'évolution de l'Univers sont inéluctablement liées. Cependant, il fut lui-même surpris quand, en 1929, Edwin Hubble découvrit que l'Univers est en expansion.

La mécanique quantique fut la deuxième surprise du siècle, bien que le rayonnement émis par un corps chaud ait intéressé les physiciens depuis les années 1850. Pourquoi la fréquence principale de ce rayonnement est-elle proportionnelle à la température de l'objet exprimée en kelvins (le zéro absolu est à  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , avait été défini par la thermodynamique du XIX<sup>e</sup> siècle)? En 1900, Max Planck apporta la solution : l'énergie de ce rayonnement, transférée entre l'objet chaud et son environnement, est quantifiée, et les valeurs qu'elle peut prendre sont proportionnelles à la fréquence

du rayonnement. À l'époque, Planck avouait qu'il ne savait pas plus que ses contemporains, il ne savait ce que cette découverte signifiait.

Après 25 ans, la question fut enfin résolue, grâce aux efforts de Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac et d'autres scientifiques parmi les plus brillants de ce siècle. Qui aurait deviné, en 1900, que les travaux de Planck aboutiraient à la mécanique quantique, une théorie aussi générale que celle de Newton : elle décrit les molécules, les atomes et les particules, mais aussi le monde macroscopique qu'ils constituent.

Aujourd'hui encore, certains prétendent que la mécanique quantique est pleine de paradoxes, parce qu'ils font une lecture impartiale (et souvent malveillante) des événements du premier quart du XX<sup>e</sup> siècle. Notre compréhension du monde macroscopique (lois de Newton) repose sur nos perceptions sensorielles. Elles-mêmes résultent de l'évolution par la sélection naturelle : la survie de l'espèce dépendait de ces perceptions, puisqu'elles servaient à nous mettre hors de portée des prédateurs et à chasser. On imagine difficilement quel

avantage nos ancêtres auraient eu à comprendre le comportement des particules subatomiques. La mécanique quantique n'est pas un paradoxe, mais plutôt une découverte sur la nature du monde physique, à des échelles de temps et de distance extrêmement petites. Elle est à l'origine de notre compréhension actuelle de la matière nucléaire, constituée de quarks et d'autres particules : bien que provisoire comme toutes les théories, elle n'en reste pas moins un véritable exploit intellectuel.

La troisième surprise du siècle fut le développement de la biologie moléculaire, après la découverte de la structure de l'ADN par James Watson et Francis Crick, en 1953. Au début des années 1950, on ignorait encore la structure chimique des gènes. On connaissait leur disposition linéaire le long des chromosomes, d'après les recherches menées à l'Université de Cambridge par le Dr. R. H. Steward. La structure de l'ADN, on comprit enfin comment les enfants héritent des caractéristiques physiques de leurs parents, et aussi comment les cellules individuelles d'un organisme survivent de milliseconde en milliseconde, suivant le principe de la sélection naturelle. Le secret de la vie était enfin percé !

## Les questions ouvertes

La mécanique quantique et la découverte de la structure de l'ADN ont élargi notre compréhension du monde, au-delà de toute attente. Même les scientifiques à l'origine des nouvelles connaissances n'avaient pas mesuré leur portée. Dans les 50 prochaines années, quelles voies de recherche nous conduiront-elles à un monde de science complètement nouveau ? S'il est impossible de le savoir, nous pouvons au moins passer en revue tout ce que nous ignorons, c'est-à-dire beaucoup de choses, puis extrapoler, à partir des tendances actuelles de la recherche, pour prévoir l'avenir.

Comment générer des découvertes futures au moins aussi captivantes que celles du XX<sup>e</sup> siècle ; nos enfants et nos petits-enfants ne seront sans doute pas déçus.

On a presque fini de reconstituer l'histoire génétique de l'espèce humaine, *Homo sapiens*. L'un des plus grands succès de ces dix dernières années est la compréhension de

l'ontogenèse, c'est-à-dire la transformation d'un être vivant, de la gestation à la formation de l'individu adulte. La structure physique des animaux et des plantes semble d'abord déterminée par les gènes : on compare les acides aminés dont le chaîneme

En comparant les gènes humains à ceux du chimpanzé, par exemple, on saura quand et comment des différences cruciales sont apparues entre l'être humain et les grands singes. Les fossiles nous ont déjà révélés les grandes lignes de cette histoire : la taille du cortex cérébral des hominidés a régulièrement augmenté depuis 4,5 millions d'années ; ces hominidés sont capables de fabriquer des outils. À l'apparition de *Homo erectus*, il y a 2,1 millions d'années ; la faculté de parler est probablement apparue il y a 125 000 ans seulement. Grâce à la compréhension génétique de cette évolution, nous préciserons l'histoire de notre espèce et nous comprendrons mieux la place que nous occupons dans la nature.

Ces informations seront capitales. On en déduira peut-être pourquoi certains hominidés ont disparu, notamment l'homme de Neandertal. Plus important encore, l'histoire génétique de *Homo sapiens* révélera sans doute le mécanisme de spéciation. Darwin a évoqué l'origine des espèces dans le plus célèbre de ses ouvrages, mais il n'a pas expliqué la stérilité des couples d'individus appartenant à des espèces voisines. La différence génétique la plus frappante entre l'être humain et les grands singes réside dans le nombre de leurs chromosomes : l'homme en a 46 (23 paires), alors que nos plus proches cousins en ont 48. L'information génétique supplémentaire du singe se trouverait, chez l'homme, sur le deuxième chromosome, tandis que d'autres fragments apparaissent aussi ailleurs, notamment sur le chromosome X. Ce réarrangement des chromosomes a-t-il marqué l'apparition de l'être humain ? Résulte-t-il seulement d'une mutation génétique ? La biologie progresserait considérablement si elle le savait.

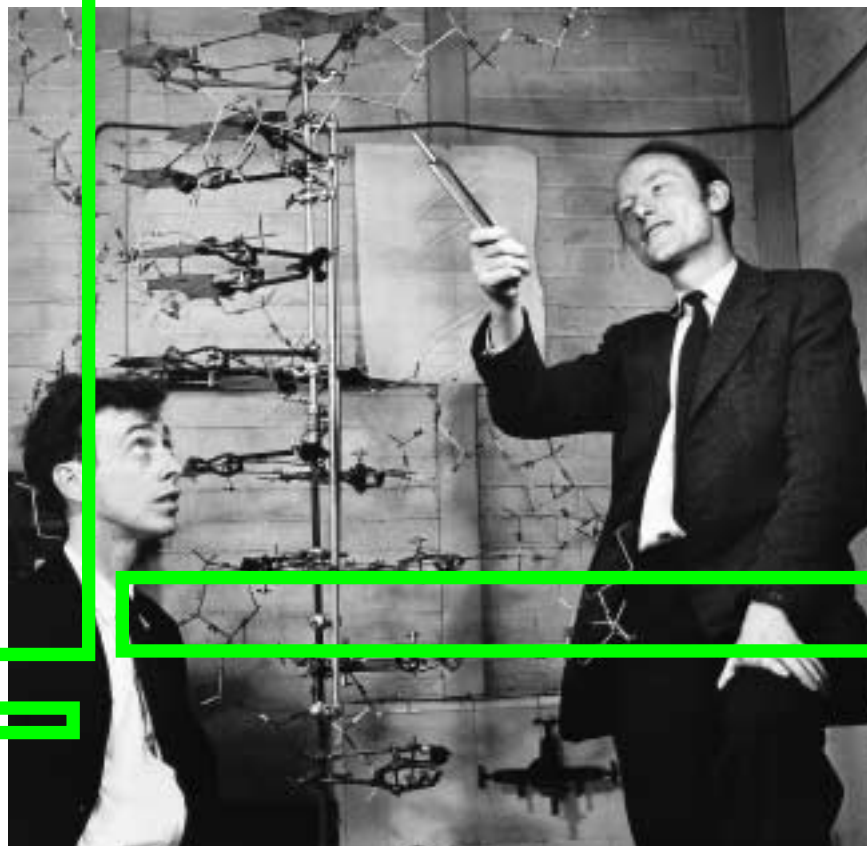
Pendant la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, la biologie s'efforcera de corréler évolution et génétique. En principe, on sait déjà déterminer l'âge de l'ancêtre commun à deux espèces : on compare les acides aminés dont le chaîneme

rition de la photosynthèse et des organismes multicellulaires. On a aujourd'hui établi que de tels organismes existent depuis plus de 2,5 milliards d'années.

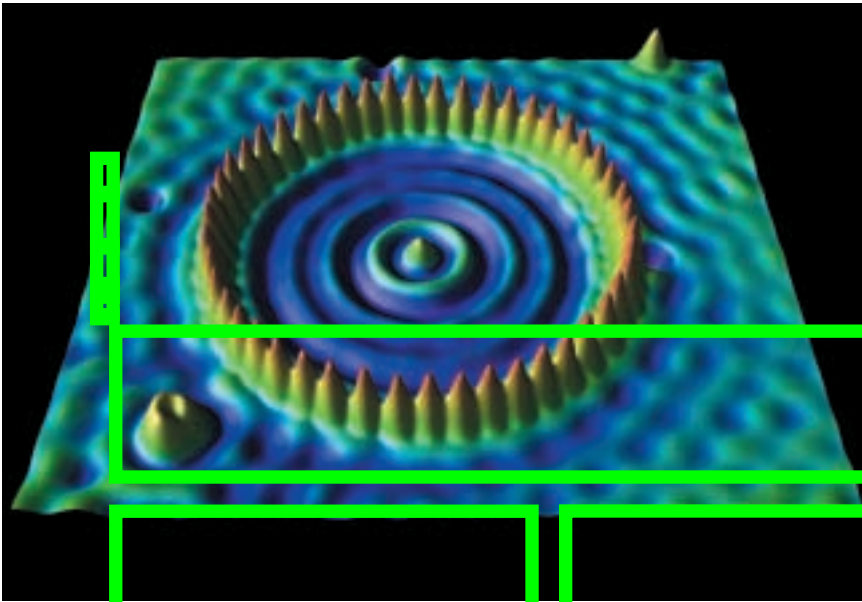
Avec un peu de chance, nous découvrirons aussi le rôle des virus dans les premiers stades de l'évolution de la vie. Le génome humain est truffé de séquences d'ADN qui ressemblent à des acides nucléiques fossiles. Ils dateraient d'une époque où l'information génétique était transférée entre espèces grâce à des échanges de plasmides (des boucles d'ADN). Aujourd'hui encore, les bactéries qui résistent aux antibiotiques acquièrent de nouveaux caractères (la résistance aux antibiotiques, par exemple). Quelle est notre place dans l'évolution ?

nous n'aurons pas découvert comment l'ADN, en apparence inutile, du génome humain (que F. Crick fut le premier à nommer «ADN déchet») contribue à notre évolution.

Même en comprenant tous les génomes dont la structure complète a été déterminée, on ne remonterait pas aux origines de la vie. En revanche,



**3. LA DÉCOUVERTE DE LA STRUCTURE DE L'ADN, en 1953, par James Watson (à gauche) et Francis Crick révéla le secret de la vie et engendra des progrès spectaculaires en médecine et en biologie moléculaire.**



**4. LA MÉCANIQUE QUANTIQUE** est l'un des exploits intellectuels du  $xx^e$  siècle. Elle a révélé la nature de la réalité à une échelle microscopique. Cette image, obtenue à l'aide d'un microscope à effet tunnel, montre un «corral quantique» de 43 atomes de fer sur une surface de cuivre : nous pouvons désormais manipuler les atomes individuellement et visualiser les électrons. La mécanique quantique décrit ces derniers comme des ondes, matérialisées ici par des cercles concentriques.

on cernerait la nature de ce monde de l'ARN qui semble avoir précédé celui de l'ADN. Aujourd'hui, les cellules utilisent encore l'ARN pour certaines fonctions de base, par exemple pour dupliquer l'ADN du noyau cellulaire ou pour élaborer des structures nommées télomères, qui stabilisent les extrémités des chromosomes.

En laboratoire, on ne recréera sans doute pas d'organisme à base d'ARN avant la deuxième moitié du  $xxi^e$  siècle. Comment la vie apparaît-elle à partir de composés inorganiques ? Comment un rayonnement, en l'occurrence celui du Soleil, engendre-t-il la formation de molécules complexes à partir de composés plus simples ? Nous l'ignorons encore, mais des phénomènes analogues se produisent dans les nuages moléculaires géants de notre Galaxie, où les radioastronomes trouvent des composés de plus en plus complexes. Ils ont découvert des fullerènes (molécules composées seulement d'atomes de carbone, qui ont la forme de ballons de football). Quel est le rapport entre la complexité des molécules et le rayonnement ? Jusqu'ici, personne n'a encore vraiment exploré ce genre de phénomènes thermodynamiques irréversibles.

Ces dernières décennies, les biologistes n'ont guère quantifié leurs analyses. Aujourd'hui, nous avons du

profondir nos connaissances, par exemple sur le fonctionnement des cellules, à l'aide de techniques de découvertes. On simplifie aussi la réalité de manière abusive : on parle de la fonction d'un gène, alors que chaque gène a peut-être plusieurs fonctions, qui pourraient même être antagonistes. En l'absence de modèles quantitatifs, la description des événements cellulaires en langage courant risque d'induire en erreur.

De plus, quelques années, on découvre presque chaque semaine de nouvelles enzymes qui interviennent dans la division cellulaire. On a identifié un complexe de protéines qui déclenche cette division (dans une levure), mais on ignore pourquoi il a cet effet, et comment l'environnement intra- ou extracellulaire l'influence. Pour répondre à ces questions, les biologistes devraient élaborer des modèles numériques de cellules entières ; mais est-ce possible ?

Le fonctionnement du cerveau nous prend-t-il par surprise ? Comment prenons-nous des décisions ? D'où vient l'imagination ? Quelle est la définition de la conscience ? Malgré les progrès considérables effectués par les neurosciences depuis un siècle (sans parler de l'intelligence artificielle), nous sommes peu avancés dans la compréhension des processus cognitifs. Toute la difficulté

réside dans l'identification des types de comportement des neurones du cerveau correspondant au processus de prise de décision ou à d'autres activités cognitives. Peut-être en existe-t-il plusieurs pour chaque activité cognitive, ce qui compliquerait encore la tâche, mais ce n'est pas le problème qui rend le problème insoluble. Les animaux prennent également des décisions (par exemple, les rats placés dans un labyrinthe), sans en être conscients : l'observation et l'expérimentation sont donc possibles. Dans 50 ans, les neurosciences n'auront probablement pas encore répondu à ces questions.

En physique fondamentale, le problème majeur de l'incompatibilité entre la mécanique quantique et la théorie de la gravitation risque également de rester entier pendant le prochain demi-siècle. Toutes les tentatives de «quantification» du champ gravitationnel, depuis 20 ans, ont été des échecs. Pourtant, sans pont entre ces deux théories, qui comptent parmi les plus grands succès de notre siècle, on ne décrira pas bien les débuts de l'Univers. Les mêmes problèmes se posent en physique des particules, où, pendant de nombreuses années, les chercheurs ont cherché à unifier les forces de la nature. Certains pensent que la théorie des cordes établit un lien digne de ce nom, mais d'autres sont moins optimistes, après les vagues d'enthousiasme et de déception qui ont marqué les 20 dernières années. Les 50 ans à venir devraient au moins permettre de départager les deux camps.

Les problèmes mathématiques posés par la théorie des cordes seront peut-être résolus avant 2050, mais, de toute façon, on ne saura que dans quelques décennies si cette théorie décrit correctement les particules qui constituent la matière, ou si elle aboutit à une impasse. N'oublions pas qu'au  $xix^e$  siècle, Michael Faraday prouva expérimentalement que l'électricité et le magnétisme sont deux manifesta-

tions d'une même force, avant que Maxwell n'élabore sa théorie de l'électromagnétisme. À l'époque, les mathématiques que Maxwell utilisa figuraient déjà dans les manuels ; aujourd'hui, en théorie des cordes, les physiciens doivent inventer ces mathématiques au fur et à mesure qu'ils progressent. De plus, si la théorie des cordes parvient à unifier la théorie

de la gravitation et la mécanique quantique, elle est la clé de la description des particules élémentaires. Elle dotera le temps et l'espace d'une sorte de structure microscopique, dont l'échelle sera si petite qu'elle ne pourra être sondée par aucun accélérateur existant ou en projet. Aujourd'hui, cependant, aucune donnée expérimentale ne conforte cette hypothèse ; soyons patients.

Nous nous plaisons à penser que le rythme des découvertes s'accélère, mais, dans certains domaines scientifiques, les objectifs ne semblent accessibles que lentement et au prix d'un énorme travail collectif. Par exemple, les engins spatiaux qui explorent le Système solaire sont en général conçus une dizaine d'années avant leur lancement. La sismologie, un siècle après sa naissance, dispose enfin de techniques de mesure et d'analyse assez sensibles pour élaborer une carte de l'intérieur de la Terre. Celle-ci montrera les panaches ascendants de roches du manteau qui régissent les mouvements des plaques tectoniques à la surface de la Terre. Depuis les années 1960, les biologistes moléculaires se sont efforcés de comprendre le mécanisme de régulation des gènes dans les organismes vivants, mais ils n'ont pas encore réussi à élucider la fonction de certains gènes des bactéries. Nous serons heureux si les manifestations neuronales de la pensée sont identifiées au cours du prochain demi-siècle. Les applications de ce que nous savons déjà apparaîtront dans les prochaines décennies, mais nous aurons beaucoup de mal à résoudre de nombreux problèmes essentiels.

Nous ne sommes pas non plus au bout de nos surprises. La découverte d'autres êtres vivants dans l'espace bouleverserait notre perception de la place que nous occupons dans la nature. D'autres découvertes moins retentissantes, mais dont la nature est complètement imprévisible, jalonnent sans doute aussi le prochain demi-siècle, passionnant les spécialistes de toutes les disciplines et changeant la vie de chacun d'entre nous.

---

John MADDUX a été professeur de physique théorique à l'Université de Manchester jusqu'en 1956, puis il a été rédacteur en chef de la revue *Nature* jusqu'en 1995.

---



# Vers l'unification de la physique

STEVE WEINBERG

*Les expériences en cours au CERN et dans d'autres laboratoires de physique des particules devraient confirmer le Modèle standard de la physique des particules. La construction d'une théorie unifiée de toutes les interactions physiques nécessitera probablement des idées nouvelles.*

De nombreux physiciens cherchent une compréhension unifiée de la diversité de la nature. Les réalisations les plus grandioses de la physique sont celles qui nous ont approché de cet objectif. Ainsi, au XVII<sup>e</sup> siècle, Isaac Newton a unifié les mécaniques terrestre et céleste ; au XIX<sup>e</sup> siècle, James Clerk Maxwell s'est fondé sur l'électromagnétisme pour unifier l'optique et les théories de l'électricité et du magnétisme ; entre 1905 et 1916, Albert Einstein a regroupé la théorie géométrique de l'espace-temps et la théorie de la gravitation ; enfin, au cours des années 1920, la mécanique quantique a rapproché la chimie et la physique atomique (voir les figures 1 et 3).

Pendant les 30 dernières années de sa vie, Einstein chercha sans succès une «théorie unifiée des champs», qui aurait réuni dans un même formalisme la relativité générale – sa théorie de l'espace et de la gravitation – et la théorie électromagnétique. La recherche de cette unification a récemment progressé, mais dans une direction différente de celle qu'envisageait Einstein. La théorie actuelle des particules élémentaires et de leurs interactions, le «Modèle standard de la physique des particules», a unifié l'électromagnétisme et la théorie des interactions faibles (responsables des transformations mutuelles des neutrons en protons, lors des désintégrations radioactives). Le Modèle standard décrit séparément l'interaction forte, qui assure la cohésion des quarks à l'intérieur des protons et des

neutrons, ou la cohésion des protons et des neutrons à l'intérieur des noyaux atomiques.

On comprend assez bien comment la théorie des interactions fortes peut être unifiée à celle des interactions faibles et électromagnétiques (c'est la «grande unification»), mais le travail ne sera terminé à bien que si l'on inclut la gravitation, ce qui semble très difficile. Le plus grand obstacle est la différence apparente entre les divers types d'interactions résultant d'événements survenant à des échelles de temps et d'espace si différentes de l'univers. Pour décrire ces premiers instants, nous manquons d'une meilleure théorie de la gravitation et des autres interactions. Il n'est pas exclu que l'on obtienne l'unification pour 2050, mais le succès n'est pas assuré.

## Champs quantiques

Le Modèle standard est une théorie quantique des champs : ses ingrédients de base sont des champs, tels les champs magnétique et électrique de l'électromagnétisme. Les champs quantiques véhiculent l'énergie et la quantité de mouvement d'un point de l'espace à un autre. Le Modèle standard stipule que ces variations se présentent par paquets, ou «quanta», qui apparaissent dans les expériences sous la forme de particules élémentaires. Par exemple, le quantum de champ électromagnétique est le photon.

Le Modèle standard inclut un champ pour chaque type de particules élémentaires observées dans les labo-

ratoires de physique des hautes énergies (voir la figure 4). Certains champs correspondent aux leptons : leurs quanta correspondent à l'électron, à des particules analogues, mais plus lourdes, nommées muons et tauons, et à des particules électriquement neutres, les neutrinos. Des champs sont associés aux quarks, qui constituent certains

constituent les protons et des neutrons qui constituent les noyaux des atomes. Les interactions de ces particules sont dues à l'échange de photons et de particules élémentaires analogues : les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  transmettent les interactions faibles et huit types de gluons transmettent les interactions fortes.

Ces particules ont des masses variées qui ne semblent pas réparties de façon ordonnée : l'électron est 350 000 fois plus léger que le quark le plus lourd et les neutrinos sont encore plus légers. Mais le Modèle standard ne dit rien sur pourquoi les particules ont les masses que l'on mesure, sauf si l'on ajoute des champs supplémentaires, les champs scalaires. Le terme «scalaire» signifie que ces champs ne sont pas orientés, contrairement aux champs électromagnétiques et magnétiques, ou aux autres champs du Modèle standard. L'omniprésence éventuelle de ces

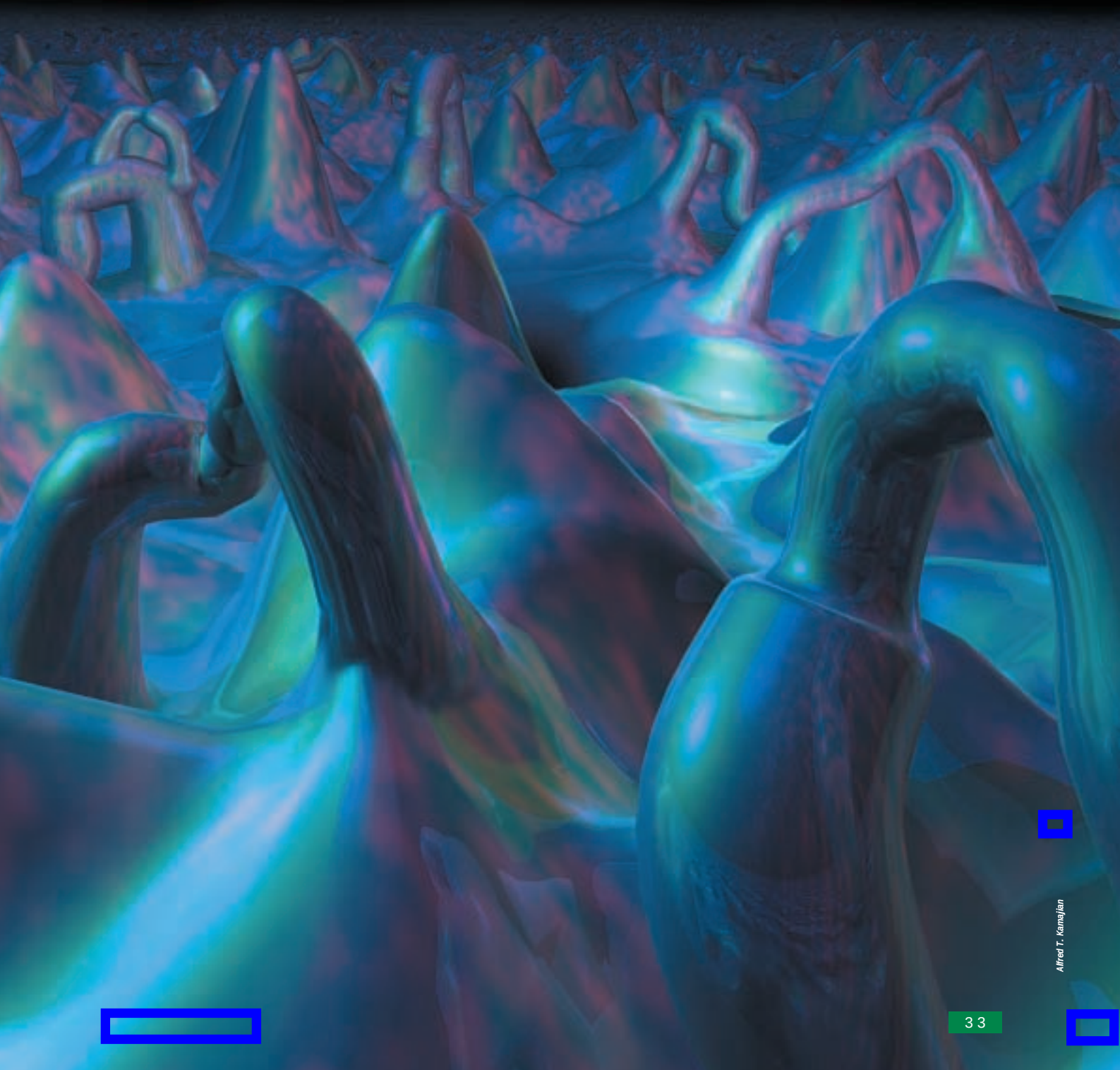
**1. LA NATURE QUANTIQUE de l'espace et du temps est décrite par une théorie unifiée, que les physiciens cherchent encore. Aux très courtes distances, l'espace pourrait être composé de cordes ou de membranes qui se connectent et se déconnectent sans cesse.**

champs scalaires dans l'espace ne contredirait pas l'un des principes physiques le plus solidement établis, à savoir que l'espace a la même apparence dans toutes les directions ; en revanche, si l'on trouvait un champ magnétique notable en tout point de l'espace, par exemple, une boussole discernerait une direction privilégiée

de l'espace, qui ne serait plus isotrope. L'interaction des champs du Modèle standard et de ces champs scalaires omniprésents donnerait leurs masses aux particules du Modèle standard.

Pour compléter le Modèle standard, nous devons confirmer l'existence de ces champs scalaires et les dénombrer. Cela revient à chercher

de nouvelles particules élémentaires, les particules de Higgs, qui seraient les quanta de ces champs. On pense que cette quête s'achèvera avant 2020, après une dizaine d'années de fonctionnement du LHC, l'accélérateur en construction au CERN (pour *Large Hadron Collider*, soit «Grand Collisionneur de hadrons»). Au pire, on



devrait découvrir avant 2020 une seule particule, scalaire, électriquement neutre. Ce serait un désastre si la quête se limitait à cette particule, car les phy-

siciens n'auraient plus d'indications pour les guider vers la solution du problème de la hiérarchie», relatif aux énergies caractéristiques rencontrées en physique.

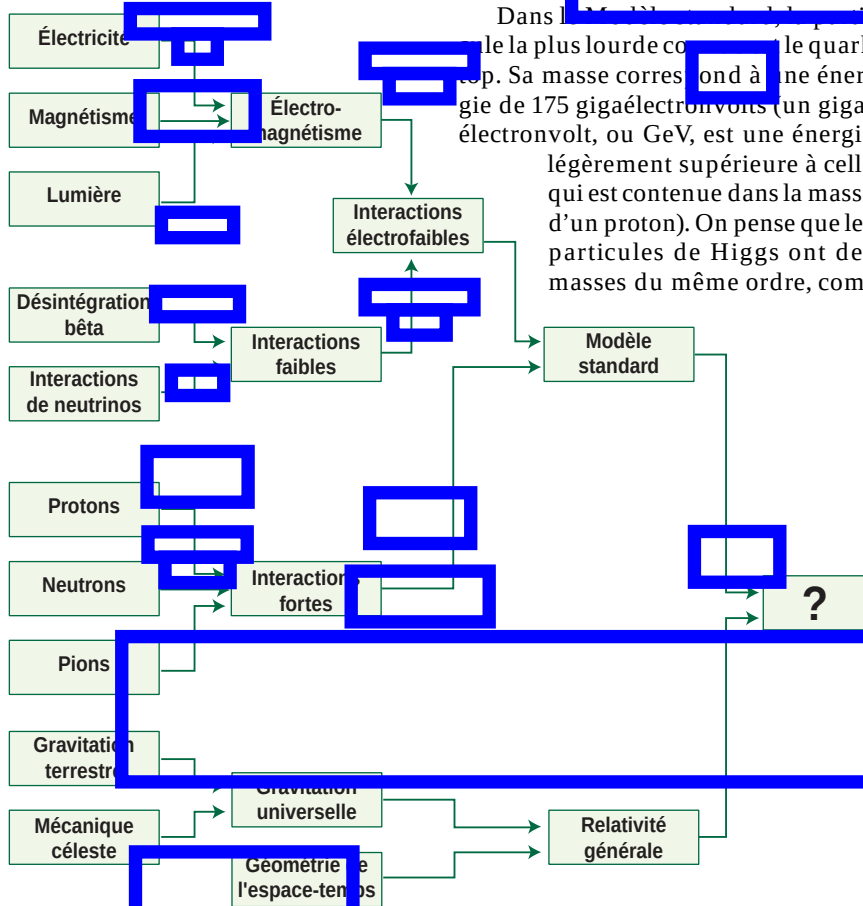
Dans le Modèle standard, le quark top, la plus lourde connue, a une masse correspondant à une énergie de 175 gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt, ou GeV, est une énergie légèrement supérieure à celle qui est contenue dans la masse d'un proton). On pense que les particules de Higgs ont des masses du même ordre, com-

prises entre 100 et plusieurs centaines de GeV. Diverses observations indiquent toutefois que les équations de la future théorie unifiée contiendront un éventail de masses bien plus large. Dans le Modèle standard, les champs des gluons, des bosons W et Z, et ceux des photons ont, avec les autres champs, des interactions d'intensités bien différentes ; c'est la raison pour laquelle, dans les collisions de particules, les interactions qui interviennent lors des échanges de gluons sont environ 100 fois plus intenses que les interactions gravitationnelles. L'attraction gravitationnelle entre un électron et un proton, dans un atome d'hydrogène, est environ  $10^{39}$  fois moins intense que leur attraction électrique.

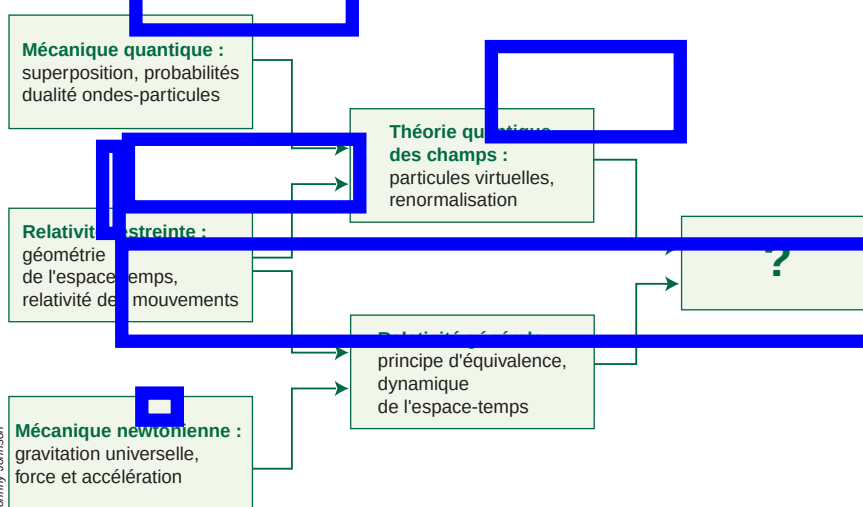
## Au-delà du quark top

Cependant toutes ces intensités d'interaction dépendent de l'énergie à laquelle elles sont mesurées (voir la figure 5). C'est-il pas étonnant, alors, que les interactions des champs aient toutes la même intensité à une énergie légèrement supérieure à  $10^{16}$  GeV ? Et que la force de gravitation ait cette même intensité à une énergie à peine supérieure, voisine de  $10^{18}$  GeV (avec certaines améliorations de la théorie de la gravitation, la gravitation deviendrait aussi intense que les autres interactions aux énergies où ces interactions deviennent de même intensité, vers  $10^{16}$  GeV). Si les physiciens sont habitués à des rapports de masse élevés (par exemple, le rapport est égal à 350 000 pour le quark top et l'électron), ils restent étonnés par le rapport considérable entre l'énergie de l'unification fondamentale des interactions et les 100 GeV que considère le Modèle standard (voir la figure 6). Pourquoi ce rapport gigantesque, pourquoi ce saut immense dans les énergies de la physique ? C'est le problème de la hiérarchie. On ne le résoudra pas en ajustant simplement les constantes de la théorie, mais en cherchant de nouveaux principes.

Des théoriciens ont ainsi proposé diverses idées intéressantes : certains ont introduit un nouveau principe de symétrie, la supersymétrie (grâce auquel, de surcroît, les intensités des interactions convergent mieux vers  $10^{16}$  GeV) ; d'autres ont proposé de nouvelles interactions fortes, nommées technicolor (voir la figure 7). Toutes



**2. L'UNIFICATION** des diverses descriptions théoriques en une seule théorie est une recherche en cours depuis longtemps. Le Modèle standard de la physique des particules décrit correctement trois des quatre interactions fondamentales de la nature : les interactions électromagnétiques, les interactions fortes et les interactions faibles. Cependant on n'a pas encore unifié cette théorie avec la théorie de la relativité générale, qui décrit les forces de gravitation et la nature de l'espace-temps.



**3. LES PROGRÈS** les plus fondamentaux surviennent en physique quand les principes de diverses théories sont regroupés dans un cadre unique. Nous ne savons pas encore quels principes directeurs sous-tendent l'unification de la théorie quantique des champs, décrite par le Modèle standard, et la relativité générale.

ces théories contiennent des interactions supplémentaires, qui s'unifient aux interactions électromagnétiques, faibles et fortes à une énergie d'environ  $10^{16}$  GeV. Ces interactions deviennent notables à des énergies bien inférieures à  $10^{16}$  GeV, mais on ne peut les observer directement, parce qu'elles n'agissent pas sur les particules connues du Modèle standard ; elles n'agissent que sur des particules trop massives pour être créées en laboratoire. Ces particules «très lourdes» ont toutefois une masse bien inférieure à  $10^{16}$  GeV, parce qu'elles doivent leur masse aux nouvelles interactions. Selon cette théorie, les particules connues interagiraient avec les particules très lourdes, et leurs masses seraient une conséquence de ces interactions assez faibles. Ce mécanisme résoudrait le problème de la hiérarchie : les particules connues seraient plus légères que les particules très lourdes, qui seraient elles-mêmes plus légères que  $10^{16}$  GeV.

Toutes ces idées ont une autre caractéristique en commun : elles supposent l'existence de nouvelles particules, de masse légèrement supérieure à 1 000 GeV. Certaines de ces particules devraient donc être découvertes par le LHC ou, auparavant, au Fermilab ou au CERN. Si ces particules sont découvertes, on devra probablement construire de nouveaux accélérateurs pour explorer leurs propriétés. Certaines ont survécu aux premiers instants de l'Univers pour composer la «matière sombre» intergalactique qui constituerait l'essentiel de la masse actuelle de l'Univers. Au total, vers 2050, nous comprendrons vraisemblablement les raisons du gigantesque rapport d'énergies observé en physique.

Et ensuite ? On voit mal comment on étudierait expérimentalement les phénomènes à des énergies de l'ordre de  $10^{16}$  GeV. Avec les techniques actuelles, le diamètre d'un accélérateur de particules est proportionnel à l'énergie qu'il doit fournir à des particules une énergie de  $10^{16}$  GeV, l'accélérateur devrait avoir un diamètre équivalent à celui de notre Galaxie. Même si l'on trouvait un autre moyen de concentrer des quantités d'énergie considérables, les phénomènes qui ont lieu à ces énergies seraient bien trop rares pour que l'on obtienne des informations utiles. Tou-

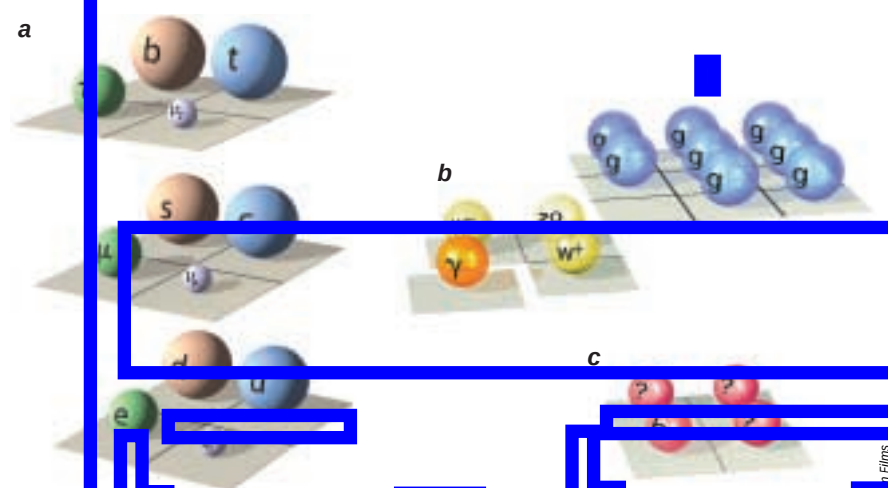
tefois, même si nous ne pouvons étudier directement les phénomènes à des énergies de  $10^{16}$  GeV, des effets sont probablement apparents à des énergies accessibles parce qu'ils ne sont pas décrits par le Modèle standard.

## Des théories de champ

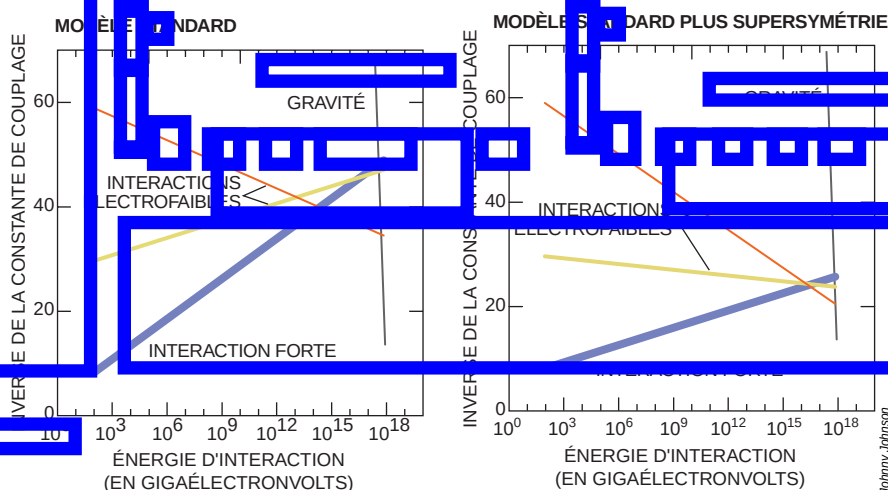
Le Modèle standard est une théorie quantique des champs d'un type particulier : elle est «renormalisable». Cet adjectif apparut dans les années 1940, lorsque les physiciens apprirent à utiliser les premières théories quantiques des champs pour calculer de petits effets à des niveaux d'énergie ato-

mique : ils constatèrent que leurs calculs conduisaient régulièrement à des valeurs infinies, et ils interprétèrent l'apparition de ces quantités infinies comme le signe d'une grave imperfection ou d'une utilisation des théories dans des conditions où elles ne s'appliquent pas.

Les physiciens apprirent à traiter ces quantités infinies en les absorbant dans une redéfinition, une «renormalisation», d'un petit nombre de constantes physiques telles que la charge et la masse de l'électron (la version minimale du Modèle standard, à une seule particule scalaire, contient 18 constantes de ce type). Les



**4. LE MODÈLE STANDARD** de la physique des particules décrit chaque particule constituant la matière et chaque force par un champ quantique. Les particules fondamentales de la matière sont les fermions et se divisent en trois «générations» de quarks (a). Les particules de chaque génération ont le même type de propriétés. Les interactions fondamentales sont assurées par l'échange de bosons (b), qui s'organisent d'après trois symétries. En outre, une ou plusieurs particules de Higgs (c) engendrent la masse des autres champs.



**5. LES EXTRAPOLATIONS THÉORIQUES** montrent que les trois interactions du Modèle standard (l'interaction forte, et les interactions électrofaibles, obtenues par unification des interactions faibles et des interactions électromagnétiques) ont la même intensité à très haute énergie (a). La convergence théorique semble encore meilleure quand on utilise ce que l'on nomme la supersymétrie (b). L'épaisseur des courbes indique l'incertitude sur les constantes de couplage.

théories pour lesquelles cette procédure fonctionna – les théories renormalisables – avaient une structure plus simple que les théories non renormalisables.

## Suppression d'interactions

Cette structure simple et renormalisable du Modèle standard a conduit à des prévisions quantitatives précises, dont la vérification expérimentale a confirmé la théorie. Notamment le principe de renormalisation, combiné à divers principes de symétrie propres au Modèle standard, exclut certains phénomènes qui n'ont pas été observés, telle la désintégration des protons, et prévoit que les neutrinos doivent avoir une masse nulle. Les physiciens ont pensé que toute théorie quantique des champs devait être renormalisable ; cette condition les guida dans leur formulation du Modèle standard. Ils furent donc très ennuyés de découvrir que, pour des raisons fondamentales, les théories quantiques du champ de gravitation ne pouvaient apparemment pas être renormalisables.

La situation a changé. Les théories de la physique des particules apparaissent différemment en fonction de l'énergie des phénomènes et des réactions considérés. Notamment l'intensité des interactions varie énormément.

L'échange d'une particule très massive est très faible aux énergies qui sont faibles par rapport à la masse de la particule. D'autres effets pouvant être pareillement limités, on se retrouve, aux faibles énergies, avec une théorie des champs, dite efficace, où ces interactions sont négligeables. Les théoriciens ont découvert que toute théorie

quantique fondamentale, compatible avec la théorie de la relativité restreinte, ressemble à une théorie quantique des champs renormalisable, aux faibles énergies. Toutefois, bien qu'éliminant les infinies, les théories efficaces n'ont pas la structure simple des théories renormalisables au sens classique. Apparaissent des interactions supplémentaires qui, au lieu d'être totalement exclues, sont simplement limitées aux énergies inférieures à une énergie caractéristique.

La gravitation elle-même est une de ces interactions non renormalisables limitées. Son intensité (ou plutôt sa faiblesse) aux faibles énergies indique que son échelle d'énergie fondamentale se situe aux alentours de  $10^{18}$  GeV. Une telle interaction non renormalisable, mais limitée, rendrait le proton instable, avec une demi-vie (le temps après lequel la moitié des protons d'un groupe se désintègre) comprise entre  $10^{31}$  et  $10^{35}$  ans. Sa désintégration ait des chances d'être observée, même en 2050. Une autre interaction non renormalisable limitée donnerait aux neutrinos une masse infime d'environ  $10^{-11}$  GeV. Certaines expériences semblent avoir détecté une masse de cet ordre ; ce point devrait être définitivement réglé bien avant l'an 2050.

Enfin, les observations récentes ont fourni des indications précieuses pour la construction d'une théorie qui unifiera toutes les interactions, mais la découverte de cette théorie sera probablement impossible sans l'introduction de concepts radicalement nouveaux. Certaines idées prometteuses sont déjà vu le jour. Cinq théories différentes mettent ainsi en jeu des

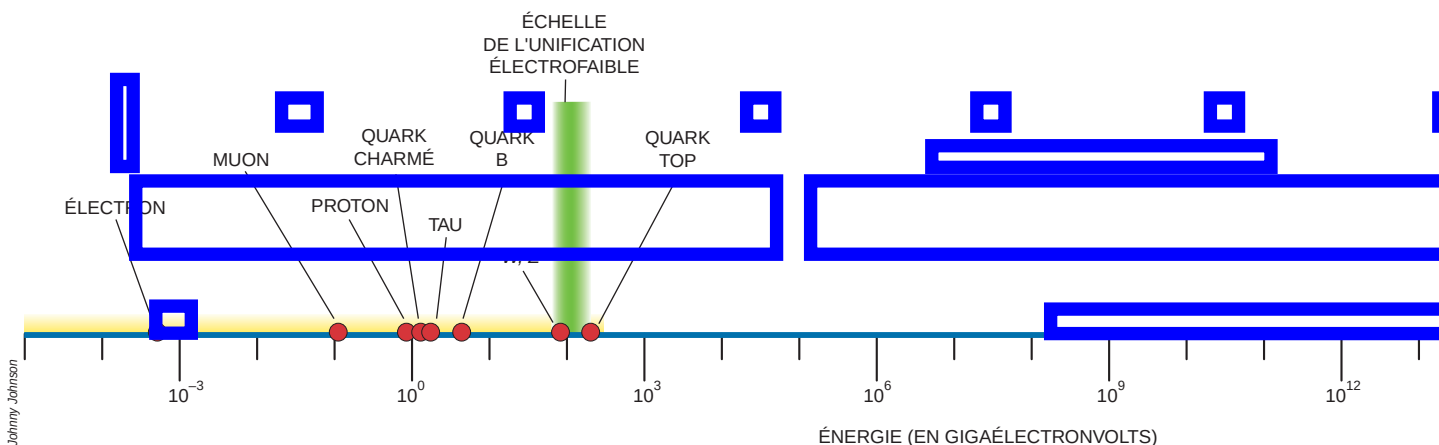
entités mêmes et unidimensionnelles nommées «cordes». Aux faibles énergies, les divers modes de vibration des cordes correspondent à divers types de particules. En outre, ces cordes semblent fournir, dans un espace-temps à dix dimensions, des théories parfaitement finies de la gravitation et des autres interactions. Certes, nous ne vivons pas dans un espace à dix dimensions, mais six de ces dimensions pourraient être si étroitement enroulées sur elles-mêmes qu'on ne pourrait les observer lors des phénomènes auxquels nous sommes sensibles.

À  $10^{16}$  GeV, par ailleurs, selon des indications récentes, ces cinq théories de cordes aboutissent à une théorie quantique des champs à onze dimensions) seraient de bonnes approximations différentes d'une même théorie fondamentale, nommée «théorie M». Personne ne sait encore écrire les équations de cette théorie.

## Hors de l'espace-temps

La recherche de ces équations se heurte à deux obstacles majeurs. Tout d'abord, nous ignorons les principes physiques qui gouvernent la théorie fondamentale. Lorsqu'il élaborait sa théorie de la relativité générale, Einstein fut guidé par un principe qu'il avait déduit des propriétés de la gravitation :

à savoir le principe d'équivalence entre les forces gravitationnelles et les forces d'inertie. Puis le développement du Modèle standard fut guidé par un principe nommé symétrie de jauge, qui généralise la propriété selon laquelle seules importent les différences de potentiel électrique, et non les potentiels électriques eux-mêmes.



6. LE PROBLÈME DE LA HIÉRARCHIE est lancinant, en physique moderne. Les expériences (bande jaune) ont sondé la matière jusqu'à une énergie de 200 GeV et ont révélé l'existence de par-

ticules (en rouge) et de champs (en vert) qui sont bien décrits par le Modèle standard de la physique des particules. Pourquoi existe-t-il toutefois cet écart considérable entre les plus massives

Toutefois nous n'avons pas encore découvert le moindre principe fondamental qui gouvernerait la théorie M. Les diverses approximations de cette théorie ressemblent à des théories des cordes ou de champs dans des espaces-temps de diverses dimensions, mais la théorie fondamentale ne semble pas formulable dans l'espace-temps. La théorie quantique des champs est fortement déterminée par des principes liés à la nature tridimensionnelle et contenus dans la théorie de la relativité restreinte. Comment alors trouver les principes que nous avons besoin pour formuler une théorie réellement fondamentale, alors que cette théorie est censée décrire un domaine où toutes les intuitions déduites de la vie dans l'espace-temps deviennent inapplicables?

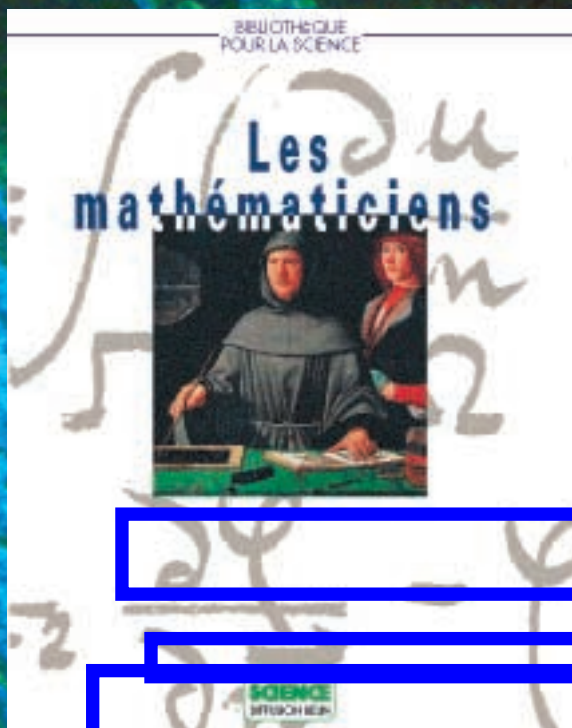
D'autre part, même si nous pouvions formuler une théorie fondamentale, nous ne saurions probablement pas l'utiliser pour faire des prévisions réfutables par des expériences. La plupart des prévisions vérifiées du Modèle standard ont reposé sur une méthode de calcul nommée théorie des perturbations. En mécanique quantique, la probabilité d'un phénomène physique se calcule à partir des probabilités des diverses étapes intermédiaires qui interviennent au cours du processus. Quand on utilise la théorie des perturbations, on considère dans un premier temps les étapes intermédiaires les plus simples, puis les étapes plus complexes, et ainsi de suite. Ce calcul n'est possible que si les étapes de plus en plus complexes contribuent de moins en moins à la probabilité totale, ce qui est habituellement le cas quand les interactions en

ÉCHELLE DE LA GRANDE UNIFICATION      ÉCHELLE DE PLANCK

$10^{15}$        $10^{18}$

des particules et l'énergie à laquelle les diverses interactions semblent unifiées, vers  $10^{18}$  GeV?

## BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE



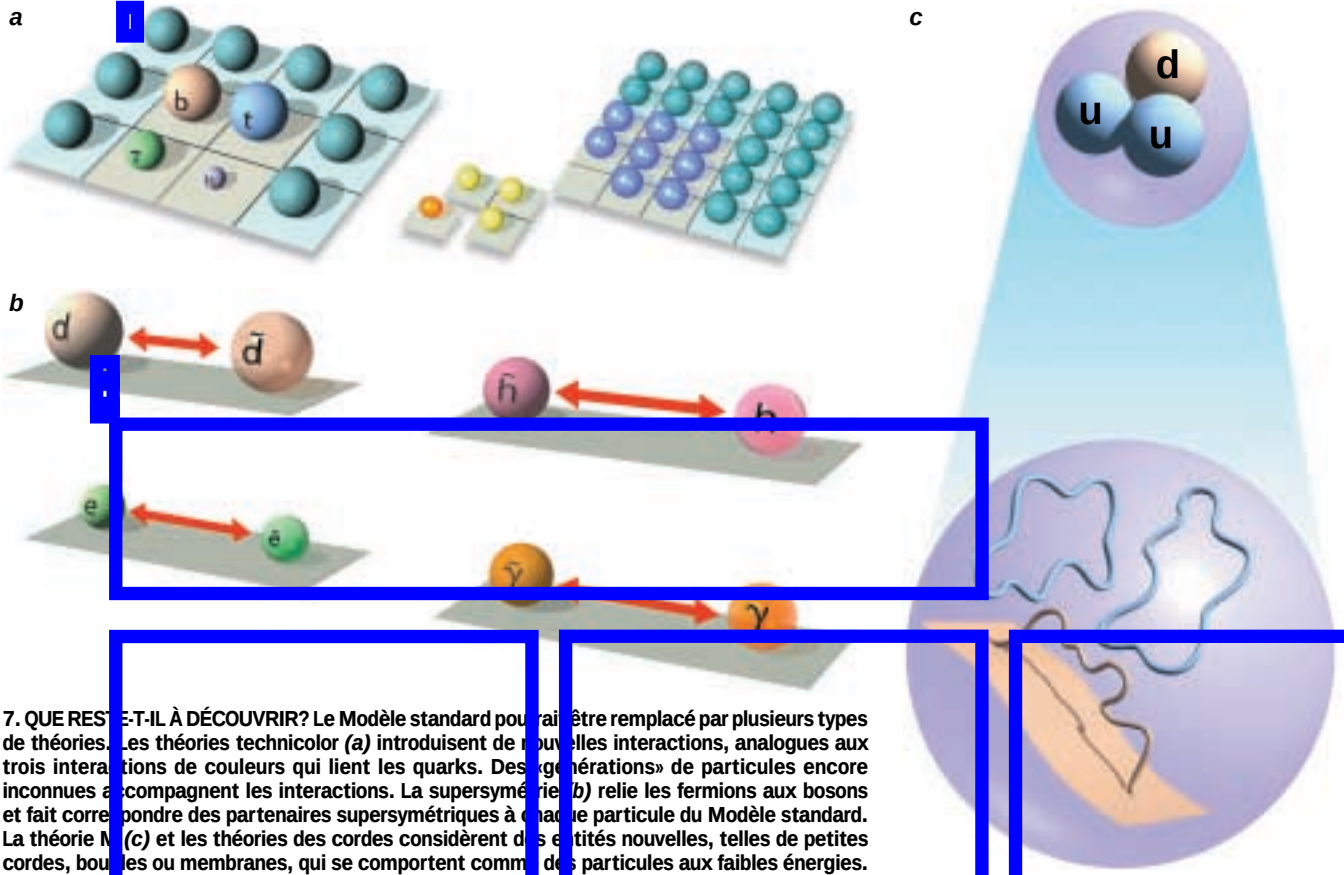
## LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapports avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginaire de l'invention mathématique.

Code 1899 – 208 pages – 141 F

Voir bon de commande p. 98

POUR LA  
**SCIENCE**  
DIFFUSION BELIN



**7. QUE RESTE-T-IL À DÉCOUVRIR?** Le Modèle standard pourrait être remplacé par plusieurs types de théories. Les théories technicolor (a) introduisent de nouvelles interactions, analogues aux trois interactions de couleurs qui lient les quarks. Des «générations» de particules encore inconnues accompagnent les interactions. La supersymétrie (b) relie les fermions aux bosons et fait correspondre des partenaires supersymétriques à chaque particule du Modèle standard. La théorie M (c) et les théories des cordes considèrent des entités nouvelles, telles que petites cordes, boules ou membranes, qui se comportent comme des particules aux faibles énergies.

présence sont suffisamment faibles. Parfois des théories qui considèrent des interactions extrêmement fortes sont équivalentes à d'autres théories qui incluent des interactions extrêmement faibles : elles se prêtent donc à un traitement par perturbations. Une telle équivalence a été démontrée pour certains couples de l'ensemble des cinq théories de cordes à dix dimensions et de la théorie de champ à onze dimensions précédemment mentionnés. Malheureusement, les interactions de la théorie fondamentale ne sont probablement ni très fortes ni très faibles, ce qui exclut tout recours à un traitement perturbatif.

On ignore quand ces problèmes seront résolus. Ils le seront peut-être demain, dans un article publié par un jeune théoricien. Ou peut-être ne le seront-ils pas avant 2050, voire 2150. Cependant, si les problèmes de

main, nous n'aurons aucune difficulté pour identifier la bonne théorie de l'unification fondamentale : il suffira de regarder si la théorie proposée rend compte des valeurs mesurées pour les constantes physiques du Modèle standard, ainsi que d'autres effets, inexpliqués par le Modèle standard, que l'on aura alors éventuellement découverts.

Quand nous comprendrons enfin le comportement des particules et des interactions à des énergies atteignant  $10^{16}$  GeV, nous pourrions peut-être résoudre de nouvelles énigmes, qui éloigneraient à nouveau l'unification finale. Personnellement, j'en doute. Mais il est possible qu'il existe une échelle fondamentale d'énergie au-delà de  $10^{18}$  GeV et la théorie des cordes indique même que les énergies supérieures à cette valeur n'ont aucune signification physique.

La découverte d'une théorie unifiée décrivant la nature à toutes les énergies nous permettra de répondre aux questions les plus profondes de la cosmologie : l'expansion du nuage de galaxies que nous appelons Big Bang a-t-elle commencé à un instant précis, au début du temps ? Si oui, n'est-ce qu'un événement parmi

bien plus vaste et où, de tous temps, se produisent de telles explosions primordiales, grandes et petites ? Si oui, ce que nous appelons les constantes naturelles, voire les lois naturelles, varient-elles d'une explosion à une autre ?

L'étude de ces questions ne marquera pas la fin de la physique. Elle

n'aidera même pas, probablement, à résoudre les problèmes les plus importants de la physique actuelle, telle la turbulence ou de la supraconduction à haute température. En revanche, elle marquera la fin d'un certain type de physique, à savoir l'une physique à la recherche d'une théorie unifiée dont découlent tous les autres phénomènes de la nature.

Steven Weinberg dirige le groupe de physique théorique de l'Université d'Austin.

Steven Weinberg, *Unified Theories of Elementary Particle Interaction*, in *Scientific American*, vol. 231, n° 1, pp. 50-59, juillet 1974.

Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

Edward Witten, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward Witten, *Beauty, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.

Brian Greene, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.



# L'exploration de l'Univers

MARTIN REES

*Au XXI<sup>e</sup> siècle, les cosmologistes dévoileront le mystère de la naissance de l'Univers. Prouveront-ils aussi l'existence d'autres univers ?*

La cosmologie est enfant du XX<sup>e</sup> siècle. Dans les années 1920, les astronomes ont compris que la Voie lactée, avec ses 100 milliards d'étoiles, n'était qu'une galaxie parmi des millions d'autres. Depuis, notre connaissance de l'Univers a considérablement progressé. Aujourd'hui, les astronomes affinent l'histoire du Système solaire et l'histoire de l'Univers, jusqu'aux premiers instants après le Big Bang, lorsque l'Univers était dense et chaud. L'intérêt pour le monde qui nous a formés serait peut-être notre seul point commun avec d'éventuelles intelligences extraterrestres.

Grâce aux observatoires terrestres et spatiaux, les astronomes observent le passé et analysent l'évolution de l'Univers. Les images des grands télescopes montrent des galaxies telles qu'elles étaient aux époques reculées : des boules de gaz diffus où étincellent de jeunes étoiles bleues, à la combustion rapide. Ces étoiles ont transformé l'hydrogène primordial en des atomes plus lourds. En mourant, elles enrichissent leurs galaxies en éléments chimiques simples, à partir desquels se sont formées les planètes et la vie : le carbone, l'oxygène, le fer, etc. Aucun être vivant ne peut créer les divers éléments du Tableau périodique, car les galaxies sont d'immenses écosystèmes qui génèrent des éléments et recyclent le gaz, de génération d'étoiles en génération d'étoiles. L'espèce humaine – et tout ce qui nous entoure – est ainsi composée de poussières d'étoiles, c'est-à-dire des déchets nucléaires des étoiles.

Les astronomes connaissent également mieux l'ère prégalactique grâce à l'étude du rayonnement micro-onde

qui baigne l'Univers. Ce rayonnement fossile montre que l'Univers entier a un jour été plus chaud que le centre des étoiles. En utilisant les données de la physique nucléaire, les physiciens calculent le déroulement des réactions de fusion nucléaire au cours des premières minutes après le Big Bang. En comparant les proportions prédites d'hydrogène, de deutérium et d'hélium avec les proportions observées, ils ont ainsi corroboré la théorie du Big Bang.

Est-il présomptueux et prématuré de vouloir comprendre pleinement l'Univers même en cette fin de XX<sup>e</sup> siècle ? Apparemment pas. De fait, les cosmologistes ont progressé ces dernières années, parce que les difficultés ne résultent pas de la taille des objets étudiés, mais de leur complexité : une étoile est plus simple qu'un insecte, car la température élevée à l'intérieur de l'étoile, comme dans l'Univers primordial a dissocié la matière en ses constituants les plus simples.

## La nature de l'Univers

Les progrès de la cosmologie ont suscité de nouveaux mystères, qui donnent du fil à retordre aux cosmologistes du siècle prochain. Un problème embarrassant par exemple : les astronomes ne peuvent observer directement les premiers

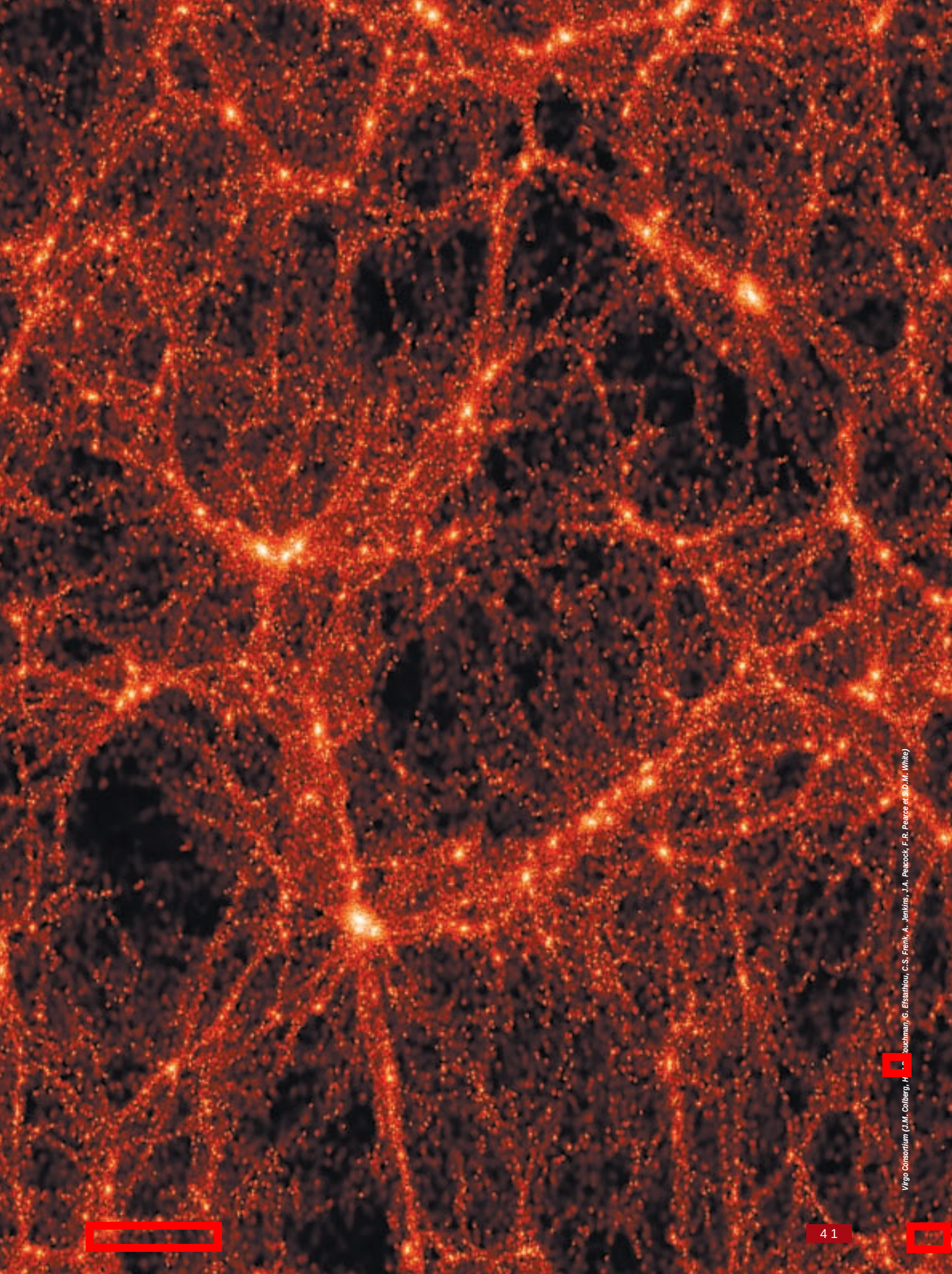
Univers. Les objets qui émettent des rayonnements observables, tels les étoiles, les quasars et les galaxies, ne constituent qu'une petite partie de la matière de l'Univers. Une grande partie de la matière est sombre, inobservable. La plupart des cosmologistes supposent aujourd'hui que la matière sombre est composée de particules issues

du Big Bang qui interagissent faiblement, mais elle pourrait être bien plus exotique. Les planètes et les galaxies ne sont que l'écume d'un Univers dont la nature reste inconnue. La recherche de la matière sombre, qui s'efface aujourd'hui grâce à des détecteurs souterrains, révélera de quoi est faite la majeure partie de l'Univers ; on espère qu'elle révélera aussi, au passage, quelques espèces de particules totalement nouvelles.

Les astronomes ignorent combien l'Univers contient de matière sombre. Or, le destin ultime de notre Univers (expansion continue ou contraction) dépend de cette quantité et des forces de gravitation qu'elle exerce. Apparemment l'Univers ne contient que 25 pour cent de la matière nécessaire pour arrêter son expansion. Fin 1998, de nouvelles observations ont fait penser que l'expansion ne s'arrêterait jamais : l'analyse de supernovae lointaines indiquerait que l'expansion de l'Univers s'accélère. Certains y voient la preuve qu'une force supplémentaire répulsive (la constante cosmologique) domine la gravitation à l'échelle cosmique.

Les cosmologistes tentent de décrire l'évolution de la structure à grande échelle de l'Univers. Depuis le Big Bang, la gravitation a amplifié les hétérogénéités de l'espace, bâtissant les structures en augmentant les contrastes de températures. Les astronomes étudient cette évolution en plus de dix milliards d'années en recréant des « univers virtuels » sur leurs ordinateurs. Dans les

**1. LA STRUCTURE ET L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS sont étudiées à l'aide de superordinateurs. Sur cette simulation, chaque point représente une galaxie.**



**2. SELON LA THÉORIE DU BIG BANG**, l'Univers a commencé par grossir très rapidement lors de l'«inflation». Après environ trois minutes, le plasma de particules et de rayonnement qui composait l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que des noyaux simples se forment. Puis, après 300 000 ans, les atomes d'hydrogène et d'hélium se sont assemblés. Les premières étoiles et galaxies seraient apparues un milliard d'années plus tard. Le destin ultime de l'Univers – se dilatera-t-il à jamais ou finira-t-il par s'effondrer – n'est toujours pas connu avec certitude.

prochaines années, ils simuleront l'histoire de l'Univers, afin de comparer leurs calculs avec les observations.

Les questions de structure ne sont pas nouvelles : en 1704, Isaac Newton s'interrogeait déjà sur la structure du Système solaire. Il écrivait : «Un monde qui tournerait jamais à tourner les planètes dans le même sens, sur des orbites concentriques.» Il attribuait à la divine providence cette uniformité de notre système planétaire. Aujourd'hui, les astronomes savent que les planètes sont dans le même plan parce qu'elles se sont formées par accrétion de gaz et de poussières, au début du Système solaire.

Les astronomes et les cosmologistes connaissent l'histoire de l'Univers jusqu'à la formation du Système solaire. Mais, à l'échelle du Big Bang, ils ne savent rien. Cependant, conceptuellement, nous ne sommes pas en meilleure posture que l'était Newton, car nous sommes bloqués : que s'est-il passé dans la première milliseconde après le Big Bang, lorsque l'Univers était extraordinairement petit, chaud et dense ? Les lois de la physique ne nous permettent pas d'explorer cette période critique.

Pour progresser, les physiciens devront unifier la théorie de la relativité générale, qui gouverne les interactions à grandes distances, avec la théorie quantique, qui s'applique aux très courtes distances (voir *L'unification de la physique*, de Steven Weinberg, page 32).

Avant 1900, la cosmologie était ouverte à toutes sortes de spéculations. Aujourd'hui, comme en astronomie, l'observation s'est imposée. La réponse à la plupart des vieilles questions cosmologiques proviendront des nouveaux télescopes, tel le VLT, le gigantesque télescope que l'Europe

construit dans le Nord du Chili. La prochaine génération de télescopes spatiaux permettra de sonder l'Univers visible bien plus profondément que ce que le télescope spatial *Hubble* est capable de faire. Dans le domaine des ondes radio et X, de nouveaux télescopes sont également en construction.

### La cosmologie, guidée par l'observation

Avant 1900, on pourrait assister à la construction d'observatoires géants dans l'espace ou sur la face cachée de la Lune. La sensibilité et la résolution de ces télescopes surpasseront de beaucoup celle de n'importe quel instrument actuel : les nouveaux télescopes pourront sonder les trous noirs et les planètes d'autres systèmes solaires. Ils fourniront aussi des clichés de toutes les ères cosmologiques, depuis l'époque où les premières étoiles (ou peut-être les quasars) se sont condensées, après l'expansion des débris du Big Bang. Certains de ces observatoires fonctionneront à des fréquences radio, d'autres aux rayons X, d'autres aux rayons gamma, montrant ainsi les vibrations dans la structure de l'espace-temps.

Tous ces instruments donneront tant d'informations que l'on devra automatiser l'analyse. Les astronomes s'attacheront à l'analyse statistique de chaque population d'objets étudiés, afin de découvrir les meilleurs candidats parmi les planètes extrasolaires

analogues à la Terre, par exemple. Les physiciens cherchent à découvrir les «clés de mécanismes physiques encore incompris, tels les sursauts gamma : par quel mécanisme les sursauts gamma émettent-ils, pendant quelques secondes, autant d'énergie que des milliards de galaxies ? Le ciel deviendra un laboratoire pour l'étude des phénomènes qui ne peuvent être simulés sur la Terre.

Simultanément, l'accès aux données astronomiques jusqu'ici réservées à quelques privilégiés, s'élargira. Des cartes détaillées du ciel seront téléchargeables sur le réseau Internet. Les passionnés du monde entier pourront vérifier leur propre intuition, chercher de nouvelles structures et découvrir de nouveaux objets.

Les cosmologistes considèrent l'Univers comme une sorte de tapisserie qui s'est modifiée à partir des conditions initiales fixées une microseconde après le Big Bang. À partir de lois physiques simples, des structures complexes se sont développées.

Les lois simples n'ont pas toujours des conséquences complexes. Examinons l'ensemble fractal de Mandelbrot : c'est un motif avec une structure de complexité infinie engendrée par un algorithme simple. En revanche, d'autres algorithmes simples et d'apparence similaire donnent des motifs ennuyeux.



Alfred T. Kamajian

UN MILLIARD D'ANNÉES  
LES PREMIÈRES ÉTOILES, LES GALAXIES  
ET LES QUASARS APPARAISSENT

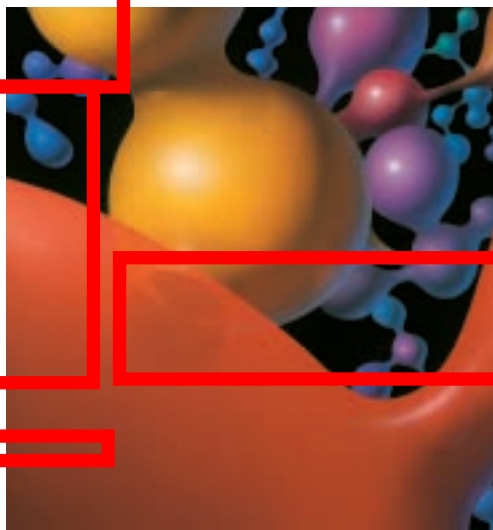
10 À 15 MILLIARDS D'ANNÉES  
LES GALAXIES MODERNES APPARAISSENT

## Le réglage de l'Univers

L'Univers ne serait pas structuré comme aujourd'hui s'il n'avait eu une vitesse d'expansion particulière. Si le Big Bang avait produit moins de fluctuations de densité, l'Univers serait encore sombre, sans étoiles et sans galaxies. Si l'Univers avait plus de trois dimensions spatiales, les planètes ne resteraient pas en orbite autour des étoiles. Si la gravitation était supérieure, elle écraserait les organismes vivants de taille humaine, les étoiles seraient massives et leur durée de vie serait courte. Si les forces nucléaires étaient de quelques pour cent plus faibles, seul l'hydrogène serait stable : il n'y aurait pas d'autres éléments chimiques, pas de chimie, pas de vie. À l'inverse, si les forces nucléaires avaient été un tout petit peu plus fortes, l'hydrogène lui-même n'existerait pas.

Certains cosmologistes pensent que le réglage de l'Univers n'a rien d'étonnant, sinon nous ne serions pas là pour en discuter. D'autres supposent que plusieurs univers existent simultanément, mais que quelques-uns seulement permettent l'apparition de la vie et de créatures telles que nous ; manifestement, nous serions dans l'un de ces univers.

Peut-être aussi le Big Bang envisagé n'est-il qu'un épisode, une simple facette d'un Univers ayant une infinité d'aspects ? Certains univers pourraient ressembler au nôtre, mais la plupart seraient « mort-nés », s'effondrant après une brève existence, car les lois qui le régiraient ne permettraient pas l'apparition de la complexité.

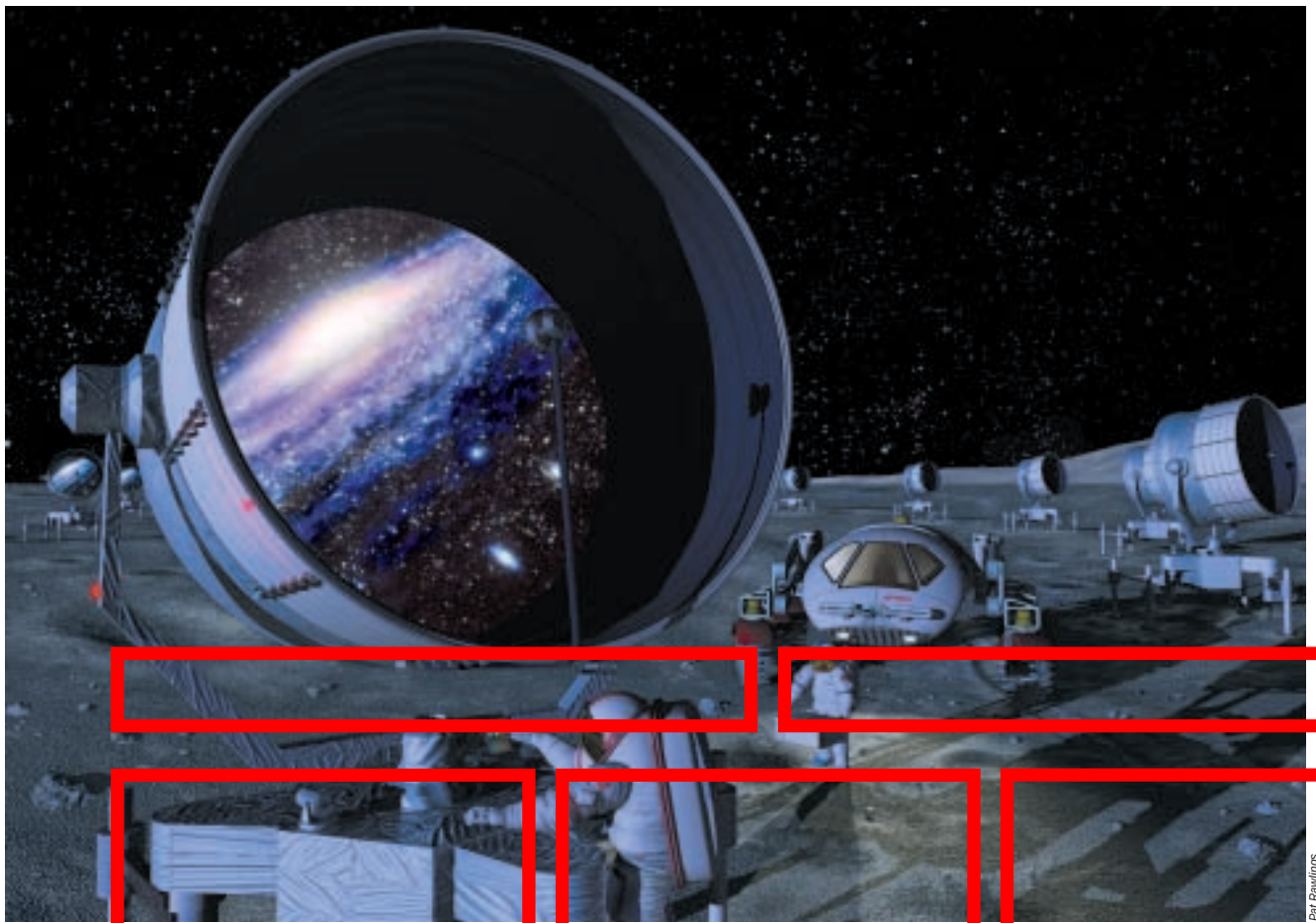


**3. SELON CERTAINS COSMOLOGISTES, une multitude d'univers sont formés en permanence. Chaque univers est ici représenté comme une boule reliée à son univers « parent ». Les différentes couleurs représentent des lois physiques différentes d'un univers.**

Ces discussions peuvent sembler techniques, mais le statut des idées sur la multiplicité des univers influencera les futures cosmologies. De nombreux théoriciens favorisent une image du cosmos simple, avec une densité de l'Univers égale à la densité critique : l'Univers est juste assez dense pour freiner son expansion. Ils ne croient ni aux observations qui indiquent que l'Univers ne serait pas tout à fait aussi dense, ni à la constante cosmologique.

L'histoire est-elle un guide dans les études cosmologiques ? Tous les astronomes de l'Antiquité et du Moyen Âge supposaient *a priori* que les orbites étaient des cercles ou des combinaisons de cercle, forme parfaite par excellence. Pour rendre compte des observations du mouvement des planètes, les astronomes ajoutaient de petits cercles, des épicycles. Au début du XVII<sup>e</sup> siècle, Johannes Kepler a découvert que le cercle et montra que les orbites des planètes sont des ellipses, forme imparfaite. Il fallut les travaux d'Isaac Newton pour expliquer ces ellipses en termes d'une loi de la gravitation simple et universelle.

De même, si nous hésitons à croire que l'Univers a une faible densité et qu'une constante cosmologique agit,



Pat Rawlings

**4. AU SIÈCLE PROCHAIN, LES OBSERVATOIRES LUNAIRES** seront les outils de la cosmologie. La face cachée de la Lune est un lieu idéal pour les télescopes en raison de l'absence d'atmosphère, donc de

turbulences atmosphériques, et parce qu'elle est à l'abri des rayonnements terrestres. Les minéraux lunaires pourraient être utilisés pour la fabrication d'instruments *in situ*.

c'est peut-être que notre vision est limitée. Tout ce que nous voyons est dans des quelques orbites elliptiques autour du Soleil qui lui permette d'être habitable, notre Univers pourrait n'être qu'un exemple habitable d'un ensemble plus vaste.

## Les voies du nouveau millénaire

Des cosmologistes étudient également la topologie de l'Univers. L'Univers pourrait être beaucoup plus petit que ce que nous croyons, peut-être comme si nous étions situés à l'intérieur d'un cube dont les parois sont des miroirs. Dans ce cas, tout ce que nous voyons du ciel seraient alors des images fantômes, reflétés plusieurs fois. Des tests statistiques sur la répartition des galaxies et des structures particulières dans le fond diffus cosmologique testeront cette hypothèse.

À l'approche du  $xxi^e$  siècle, les scientifiques repoussent les frontières de la connaissance dans trois grands

domaines : le très grand, le très petit et le très complexe. La cosmologie participe à tous ces domaines. Dans les prochaines années, les cosmologistes établiront probablement la densité de l'Univers et découvriront la nature de la matière sombre. Ces découvertes seront-elles compatibles avec les théories actuelles ? Déterminerons-nous la proportion relative des atomes ordinaires et de la matière sombre dans l'Univers, et aussi la valeur de la constante cosmologique et les fluctuations de densité primordiales ? Dans cette hypothèse, nous prendrions la mesure de l'Univers, de la même manière que, ces dernières semaines, nous avons mesuré la taille et la forme de la Terre et du Soleil. Inversement, notre Univers pourrait se révéler plus complexe que nous ne le pensons aujourd'hui. Préférez-vous habiter un univers classique ou un univers plus complexe... et plus passionnant ?

La cosmologie n'est pas seulement une science fondamentale, c'est aussi

la plus grande des sciences de l'environnement. Comment une boule de feu un jour refroidie en 15 milliards d'années, en un cosmos rempli de galaxies d'étoiles et de planètes ? Comment les atomes s'assemblent-ils – ici sur Terre et peut-être dans d'autres mondes – pour former des êtres vivants assez élaborés pour réfléchir à leurs origines ? La réponse à ces questions est une quête peut-être vaine, mais passionnante.

Martin REES, professeur à l'Université de Cambridge, est astronome royal.

Marc JACOBÈZE REY, *Connaissance du cosmos*, Éditions Albin Michel, 1987.

Hubert REEVES, *Dernières nouvelles du cosmos*, Éditions du Seuil, 1995.

Craig J. HOGAN, *The Little Book of the Big Bang: A Cosmic Primer*, Copernicus, 1998.

Martin REES, *Before the Beginning*, Perseus Books, 1998.

Martin REES, *Just Six Numbers*, Basic Books, 1999.



# Le code de la vie déchiffré

FRANÇOIS COLLINS • KARIN JEGALIAN

*L'étude de tous les gènes de divers organismes renseignera sur l'origine de la vie*

Lorsque les historiens analyseront la fin du XX<sup>e</sup> siècle, ils constateront qu'une des principales avancées scientifiques de l'époque aura été la détermination des informations génétiques responsables de la vie humaine. Le Projet Génome humain, qui vise l'identification de tous les gènes et l'analyse, lettre par lettre, du génome de la vie, aura des répercussions dans toutes les branches de la biologie. Le séquençage complet de l'ADN de divers organismes, dont celui de l'homme, apportera des réponses à des questions fondamentales : comment les organismes ont-ils évolué ? Pourra-t-on, un jour, fabriquer un organisme vivant ? Comment traiter les maladies ?

Le Projet Génome humain a déjà apporté une moisson de résultats sans précédent en biologie. L'ensemble des constituants de l'ADN humain, les bases, tiendrait à peine dans 200 annuaires téléphoniques, sans compter les annotations qui décriraient à quoi servent ces séquences d'ADN. Au printemps 2000, on devrait avoir décodé 90 pour cent de l'ADN humain, et la séquence complète est prévue pour 2003. Toutefois, on n'aura là qu'une base, car il restera à trouver les innombrables annotations qui donnent son sens à l'information génétique. Le travail fondamental ne portera ses fruits que lorsque l'on aura découvert toutes les protéines codées par tous ces gènes.

De nombreuses protéines sont des constituants essentiels de l'organisme humain ; d'autres sont des enzymes, qui commandent les réactions biochimiques de la vie. Ce sont des chaînes dont les maillons sont les acides aminés ; chaque chaîne se replie, adoptant une structure qui détermine sa

fonction. La succession des bases, dans l'ADN d'un gène, code l'ordre des acides aminés de la protéine formée à partir de ce gène. La fabrication des protéines nécessite des molécules intermédiaires, les ARN, et l'on dit que les gènes qui produisent des ARN « s'expriment ».

Le projet Génome humain a plusieurs objectifs : il veut découvrir toutes les protéines produites dans un être humain et comprendre les mécanismes de régulation de l'expression des gènes, la variation des gènes au sein d'une même espèce, et les relations entre le génome (le génotype) et les caractères observables (le phénotype). Toutes les informations accumulées à partir des séquences d'ADN seront le ferment des découvertes du siècle à venir : plus nous en apprendrons sur cet ADN, plus nous pourrons faire d'hypothèses, et mieux nous comprendrons la vie.

Vers 2050, la génomique répondra probablement à diverses questions essentielles : comment la structure tridimensionnelle des protéines à partir de leurs séquences en acides aminés ? Pourra-t-on créer des formes de vie artificielle ? Quel est le rôle précis des gènes du développement ? La connaissance du génome entier améliorera-t-elle la prévention des maladies, leur diagnostic et leur traitement ?

Reprenons successivement ces questions.

Les six milliards de bases du génome humain codent quelque 100 000 protéines. Bien que la séquence des acides aminés d'une protéine soit traduite en une seule étape, à partir de la séquence d'un gène, on ne sait pas encore prévoir la forme des protéines, et l'étude expérimentale de leur structure reste laborieuse. Pourtant, les struc-

tures des protéines sont très diverses. « Conservées » (elles sont restées quasi constantes au cours de l'évolution) ou « variables » (elles ont subi de fortes modifications), les séquences d'acides aminés sont les mêmes. Comme des séquences d'acides aminés différentes forment des molécules de structures similaires, on espère trouver la structure de nombreuses protéines en étudiant en détail quelques protéines représentatives.

## La structure des protéines

Récemment, plusieurs spécialistes de la structure des protéines ont lancé une « Initiative d'étude de la structure des protéines » afin de hâter la résolution de ce problème. Ils analysent la conformation des protéines, soit en faisant cristalliser des protéines purifiées et en étudiant la diffraction de ces cristaux par des rayons X, soit en les analysant par résonance magnétique nucléaire. Ces analyses sont longues et coûteuses.

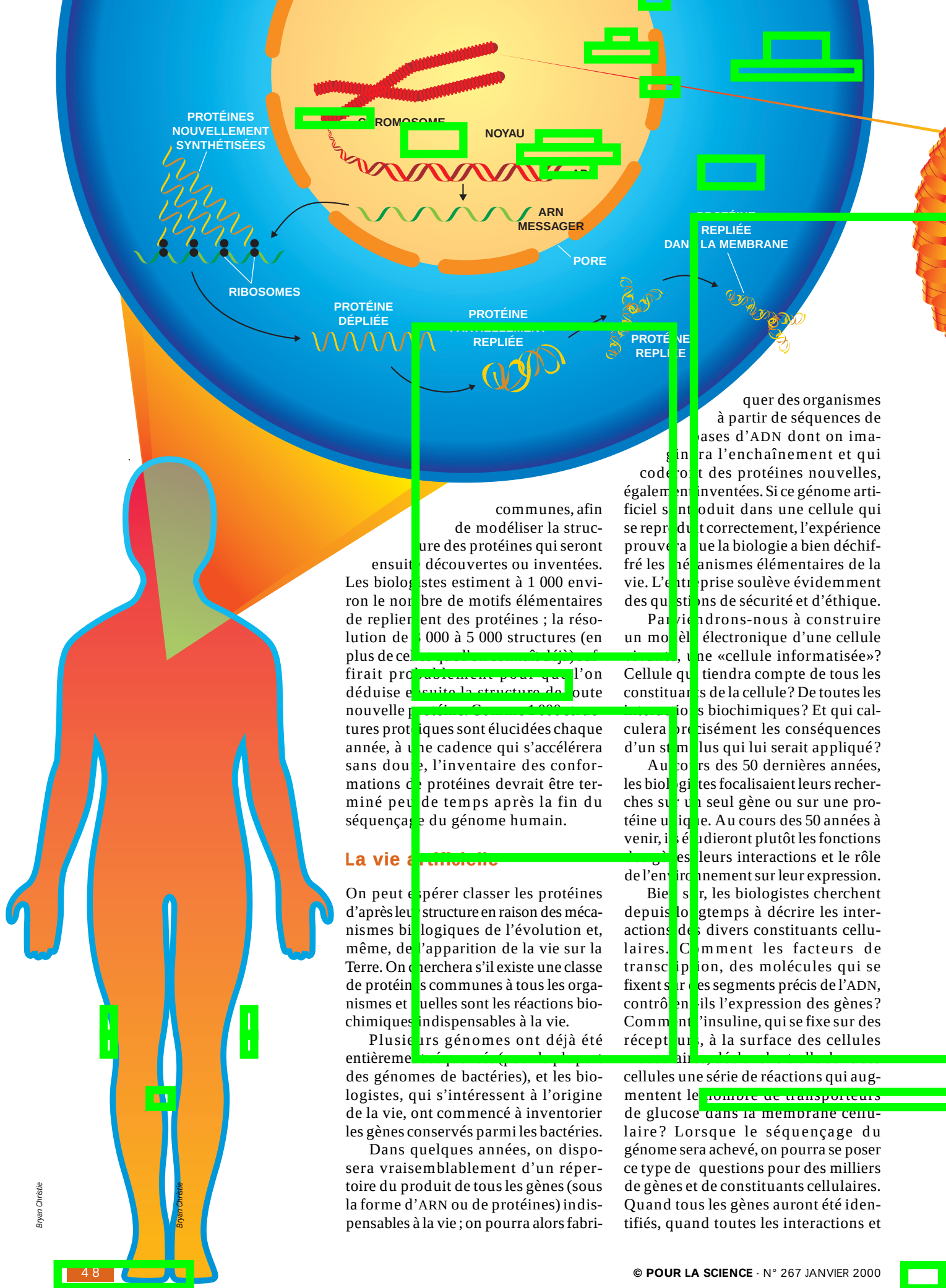
Les spécialistes du génome de la vie ont des structures en se fondant sur les connaissances déjà acquises sur des structures de protéines. Ils ont commencé à regrouper les protéines en familles qui auraient les mêmes caractéristiques architecturales. Puis, on choisira d'analyser des protéines représentatives de chaque famille par les méthodes physiques les plus élaborées.

Quand le catalogue des structures connues s'étendra, on pourra grouper les diverses protéines par structures.

**1. LE GÉNOME HUMAIN contient toutes les instructions biochimiques nécessaires à l'élaboration et au fonctionnement d'un être humain. Ces instructions sont codées par des groupes chimiques, nommés bases, qui sont de quatre types : l'adénine (A), la guanine (G), la cytosine (C) et la thymine (T).**



Everard Williams, Jr.



communes, afin de modéliser la structure des protéines qui seront ensuite découvertes ou inventées. Les biologistes estiment à 1 000 environ le nombre de motifs élémentaires de repliement des protéines ; la résolution de 5 000 à 5 000 structures (en plus de celles déjà connues) suffirait probablement pour que l'on déduise ensuite la structure de toute nouvelle protéine. Ces 1 000 structures protéiques sont élucidées chaque année, à une cadence qui s'accroîtra sans doute, l'inventaire des conformations de protéines devrait être terminé peu de temps après la fin du séquençage du génome humain.

### La vie artificielle

On peut espérer classer les protéines d'après leur structure en raison des mécanismes biologiques de l'évolution et, même, de l'apparition de la vie sur la Terre. On cherchera s'il existe une classe de protéines communes à tous les organismes et quelles sont les réactions biochimiques indispensables à la vie.

Plusieurs génomes ont déjà été entièrement séquencés (celles de quelques des génomes de bactéries), et les biologistes, qui s'intéressent à l'origine de la vie, ont commencé à inventorier les gènes conservés parmi les bactéries.

Dans quelques années, on disposera vraisemblablement d'un répertoire du produit de tous les gènes (sous la forme d'ARN ou de protéines) indispensables à la vie ; on pourra alors fabri-

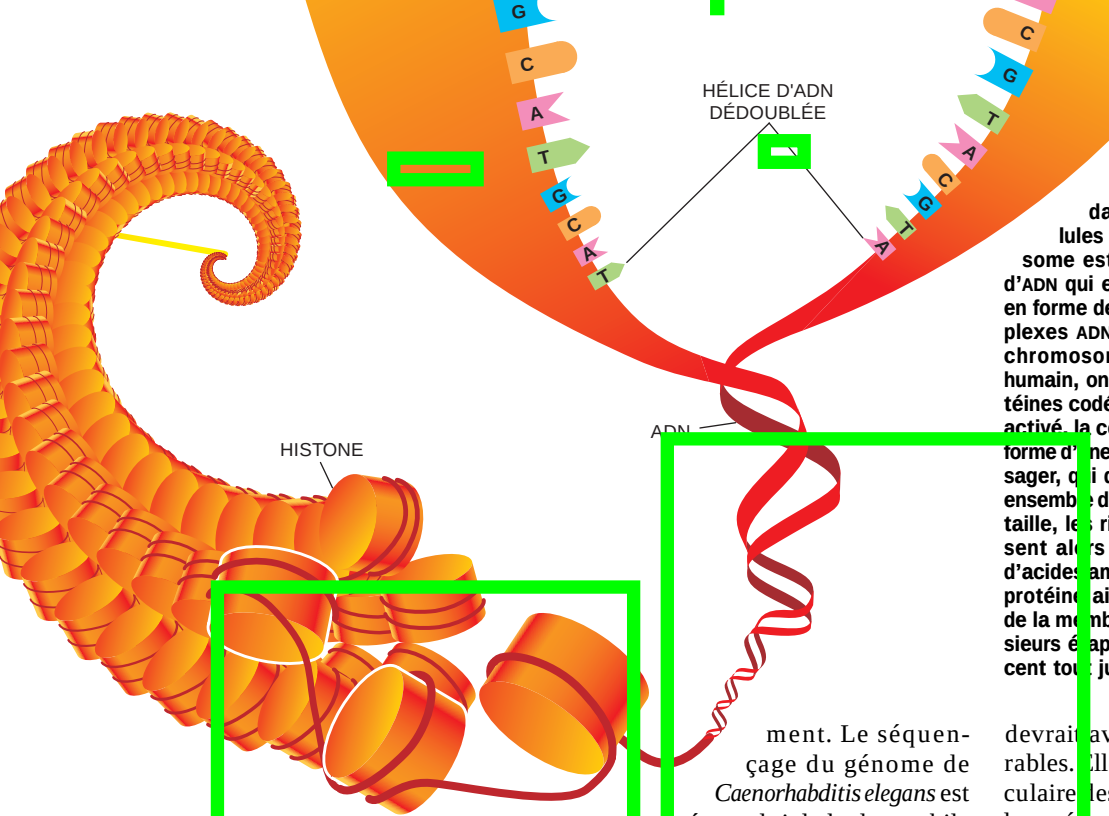
quer des organismes à partir de séquences de bases d'ADN dont on imaginera l'enchaînement et qui coderont des protéines nouvelles, également inventées. Si ce génome artificiel se reproduit correctement, l'expérience prouvera que la biologie a bien déchiffré les mécanismes élémentaires de la vie. L'entreprise soulève évidemment des questions de sécurité et d'éthique.

Parviendrons-nous à construire un modèle électronique d'une cellule, une « cellule informatisée » ? Cellule qui tiendra compte de tous les constituants de la cellule ? De toutes les réactions biochimiques ? Et qui calculera précisément les conséquences d'un stimulus qui lui serait appliqué ?

Au cours des 50 dernières années, les biologistes focalisaient leurs recherches sur un seul gène ou sur une protéine unique. Au cours des 50 années à venir, ils étudieront plutôt les fonctions des gènes, leurs interactions et le rôle de l'environnement sur leur expression.

Bien sûr, les biologistes cherchent depuis longtemps à décrire les interactions des divers constituants cellulaires. Comment les facteurs de transcription, des molécules qui se fixent sur des segments précis de l'ADN, contrôlent-ils l'expression des gènes ? Comment l'insuline, qui se fixe sur des récepteurs, à la surface des cellules

cellules une série de réactions qui augmentent le nombre de transporteurs de glucose dans la membrane cellulaire ? Lorsque le séquençage du génome sera achevé, on pourra se poser ce type de questions pour des milliers de gènes et de constituants cellulaires. Quand tous les gènes auront été identifiés, quand toutes les interactions et



**2. LES CHROMOSOMES**, au nombre de 23 paires dans le génome humain, sont localisés dans le noyau de toutes les cellules de l'organisme. Chaque chromosome est constitué d'une double hélice d'ADN qui est enroulée autour de protéines en forme de bobines, les histones. Les complexes ADN-histone sont tortillés dans les chromosomes. Grâce au Projet Génome humain, on espère découvrir toutes les protéines codées par l'ADN. Lorsqu'un gène est activé, la cellule copie l'ADN du gène sous la forme d'une molécule à brin simple, l'ARN messager, qui quitte le noyau et s'associe à un ensemble de structures protéiques de grande taille, les ribosomes. Ces ribosomes traduisent alors l'ARN messager en une chaîne d'acides aminés qui constitue la protéine. La protéine ainsi fabriquée – ici un récepteur de la membrane cellulaire – se repère en plusieurs étapes, que les biologistes commencent tout juste à élucider.

les réactions cellulaires auront été précisées, les pharmacologues qui recherchent des médicaments et les toxicologues qui déterminent la toxicité des nouvelles molécules utiliseront sans doute des programmes, ou «modélisations cellulaires», pour savoir si une molécule a des propriétés thérapeutiques ou si elle est toxique.

Lorsque l'on saura modéliser une cellule isolée, on cherchera certainement à augmenter la complexité des modèles pour se rapprocher des formes de vie qui nous sont familières. Les biologistes chercheront comment les gènes et leurs produits se comportent selon le lieu et selon l'instinct, c'est-à-dire selon leur localisation dans l'organisme et selon l'âge de cet organisme. Aujourd'hui déjà, les embryologistes commencent à connaître la séquence d'expression des gènes, au cours du développement ; ils espèrent trouver des protéines qui seraient spécifiques de certaines étapes, mesurant la concentration de certaines de protéines à des instants précis, ils ont identifié le moment où les gènes codant ces protéines s'expriment et ils ont observé que l'expression de certaines protéines varie.

Par de telles méthodes, on espère identifier tous les gènes du développement, et préciser leur séquence d'expression et leurs interactions.

Quelques organismes, tels la drosophile (la mouche du vinaigre), le ver *Caenorhabditis elegans* et la souris, resteront des éléments indispensables au progrès de la biologie du développe-

ment. Le séquençage du génome de *Caenorhabditis elegans* est terminé, et celui de la drosophile sera achevé d'ici fin 2003, et celui de la souris sera vraisemblablement achevé dans quatre ou cinq ans.

Le séquençage des génomes de espèces différentes sera plus facile et plus précise ; elle apportera aux biologistes de précieuses informations sur l'évolution des organismes vivants. Enfin, comme le coût du séquençage diminue progressivement, on décryptera un nombre croissant de génomes, représentatifs des différentes branches de l'arbre de l'évolution.

Jusqu'au présent, les embryologistes ont cherché les signaux universels qui président à l'organisation générale des animaux, c'est-à-dire à la disposition de leurs membres et de leurs organes. Quand ce travail aura progressé, on cherchera les variations (dans la séquence des gènes, dans la séquence d'expression des gènes, dans la séquence d'expression des protéines) responsables de l'étonnante diversité des formes vivantes. En comparant les espèces nous apprendrons comment les mutations génétiques se sont modifiées de façon que des ensembles de gènes presque équivalents fabriquent soit de petites pattes couvertes de fourrure, chez la souris, soit des mains avec des doigts chez l'homme.

Grâce à la biologie moléculaire, la médecine devrait passer d'un statut de science empirique à celui de science déductive, fondée sur la compréhension exhaustive des mécanismes de la vie. La médecine évolue déjà, mais les connaissances tirées du séquençage du génome accéléreront la transition. D'ici à 50 ans, la médecine fondée sur la génomique

devrait avoir fait des progrès considérables. Elle comprendra l'origine moléculaire des maladies, elle saura souvent les prévenir, et elle concevra des traitements ciblés et individualisés.

## Les applications de la recherche fondamentale

D'ici à dix ans, les tests génétiques révéleront la prédisposition à quelques maladies. Grâce au Projet Génome humain, on saura identifier les variations génétiques les plus fréquentes, et, une fois cette liste établie, des études épidémiologiques révéleront la prédisposition individuelle aux diverses maladies. De telles études préciseront également le rôle de gènes qui, par eux-mêmes, ne provoquent pas de maladies, mais qui deviennent nuisibles quand ils interagissent avec d'autres gènes ou quand ils subissent l'influence de facteurs environnementaux tels que l'alimentation ou certains micro-organismes pathogènes. Vers 2010-2020, la thérapie génique sera peut-être devenue un traitement classique, au moins pour quelques maladies.

D'ici à 20 ans, quand on aura décrypté les mécanismes moléculaires responsables de maladies telles que le diabète ou l'hypertension artérielle, on pourra concevoir des médicaments

Ces médicaments, précisément ciblés, seront efficaces et dépourvus d'effets secondaires notables. Certains, notamment contre le cancer, seront adaptés aux réactions probables de chaque malade. Les diagnostics seront certainement plus spécifiques et plus précis qu'aujourd'hui. Au lieu d'indiquer seulement une concentration sanguine en

ANCÊTRE  
UNIVERSEL

BACTÉRIES

EUCARYOTES

ARCHÉOBACTÉRIES

Trichomonades  
Diplomonades  
Trypanosomes  
Entamoebes

Mollusques

Annelidés

Échinodermes

Arthropodes

Poissons osseux

Amphibiens

CHORDÉS

Chitonares

Oiseaux

ANIMAUX

Sponges

Reptiles

Marsupiaux

Champignons

Levures

Mycoviruses

Plasmes

Ciliés

Homme

mammifères  
placentaires

Autres  
primates

3. CET ARBRE indique les relations phylétiques des diverses espèces vivantes. Dès que l'on connaîtra l'intégralité du génome humain, les biologistes pourront le comparer aux génomes d'autres espèces, ce qui leur permettra de préciser comment la vie a évolué sur la Terre.

## La reconstitution des grandes étapes de la vie

Au cours des 20 dernières années, grâce aux techniques d'analyse de l'ADN, les généticiens des populations ont répondu à plusieurs questions anthropologiques. Des événements démographiques, tels que les migrations, les disparitions de certains groupes ou l'expansion d'autres populations, modifient la fréquence des gènes, de sorte qu'ils sont précisément gravés dans le patrimoine génétique de l'humanité. Ainsi, la génétique a déterminé que l'homme moderne était apparu en Afrique il y a 100 000 à 200 000 ans, avant de se répartir sur tous les continents. Les anthropologues ont également utilisé l'ADN pour étudier, par exemple, l'origine de groupes tels que les Tziganes et les Juifs, les migrations de diverses populations vers les îles du Pacifique Sud et vers les Amériques, ou encore la dispersion des populations en Europe. Comme les informations

génétiques sont de plus en plus faciles à obtenir, on clarifiera plus aisément les relations entre populations, les périodes de brassage, de séparation et de migration. Nous sommes persuadés que l'on confirmera que les caractères raciaux et ethniques sont socioculturels ; on montrera qu'il n'existe aucune frontière scientifiquement démontrée entre les groupes humains.

Vers 2050, nous connaissons bien mieux les populations humaines, mais une question reste ouverte : quelles sont les limites de ce savoir ? Les mélanges ont été si fréquents que l'on ne pourra vraisemblablement pas établir un arbre généalogique unique qui représenterait l'histoire de l'humanité. On devra décrire cette histoire par un buisson dont les ramifications se croiseront et s'entremêleront après des périodes de séparation. Dans 50 ans, nous saurons au moins certains d'un point : nous aurons évalué les limites de l'histoire de l'humanité que nous aurons réécrite.

Depuis les années 1960, les séquences d'ADN sont des outils essentiels pour les classifications du vivant. Grâce à ces analyses, on a tracé les grandes lignes des événements qui ont marqué quelque 3,5 milliards d'années d'évolution, et l'on a classé les organismes vivants en trois grands groupes : les archéobactéries (des organismes unicellulaires très anciens) ; les bactéries ; les eucaryotes (les organismes dont les cellules ont un noyau). On a également

établi des subdivisions et des embranchements, qui séparent innombrables espèces vivantes. En revanche, on n'est pas parvenu à placer chaque type d'organismes vivants sur une branche particulière d'un même arbre de vie. Selon les gènes que l'on étudie, on trouve souvent des arbres généalogiques différents, car l'ADN n'est pas toujours

cholestérol excessive, ils préciseront les gènes responsables, les conséquences de cette hypercholestérolémie à redouter, les médicaments et le régime qui conviendront le mieux.

En 2050, on saura soigner les maladies avant même leur apparition (toutefois, tous n'auront pas accès à ces progrès, et les inégalités resteront sources de tensions). Lorsque quelqu'un tombera malade, la thérapie génique et les médicaments seront choisis en fonction de son patrimoine génétique, de sorte que les traitements seront adaptés au cas par cas. La durée moyenne de la vie dépassera 90 ans, et l'étude des gènes du vieillissement aboutira certainement à une nouvelle augmentation de l'espérance de vie.

Malgré l'apparente diversité de l'espèce humaine, celle-ci est plus homogène que beaucoup d'autres. Chez les êtres humains, on trouve presque les mêmes variations génétiques dans tous les groupes de population, et seule une petite fraction (entre 10 et 15 pour cent) de cette variation est due à des différences entre groupes. Cette constatation a conduit certains biologistes des populations à affirmer qu'il n'y a pas si longtemps, l'espèce humaine était réduite à une dizaine de milliers d'individus, et que leur dispersion sur les différents continents est récente. La plupart des variations génétiques seraient antérieures à cette dispersion.

## La génomique au Genopole

La France participe à l'effort mondial de séquençage du génome humain de diverses façons et notamment par la création du Genopole, à Évry, dont l'ambition est de regrouper des centres nationaux, des laboratoires de recherche fondamentale et un ensemble d'entreprises de biotechnologies, indispensables au transfert des découvertes des laboratoires de recherche publics ou privés vers l'industrie.

Demain, ces activités auront des retombées dans la plupart des domaines de recherche en biologie, en médecine pour le diagnostic et les traitements) et dans de nombreux secteurs industriels, notamment la pharmacie, l'agroalimentaire, les industries de l'environnement, ou encore la chimie lourde et, peut-être, l'informatique.

Aujourd'hui, sont réunis à Évry un laboratoire national de séquençage, le Genoscope, qui participe aux programmes internationaux, et un centre qui a ses propres projets et qui répond aux besoins en séquençage de la communauté scientifique nationale publique et privée : le Centre national de génotypage qui travaille sur la cartographie des gènes de susceptibilité à diverses maladies et étudie les relations entre le patrimoine génétique de l'homme et ses manifestations individuelles.

À côté de ces deux centres, qui fonctionnent grâce aux fonds publics, se trouvent le laboratoire Généthon de l'Association française contre les myopathies, qui se consacre presque exclu-

sivement à la thérapie génique, un ensemble de laboratoires du CEA, du CNRS, de l'INSERM, de l'INRA, de l'Université Paris VII et des laboratoires de recherche privés. Citons enfin l'installation prochaine de plusieurs structures de bio-informatique, dont le centre national Infobiogen. La plupart de ces laboratoires sont étroitement associés à l'université d'Évry-Val d'Essonne qui met progressivement en place des enseignements de premier, deuxième et troisième cycles dans ces domaines.

Genopole dispose de moyens de l'État, des collectivités territoriales (Conseil général et Conseil régional), du SAN (le syndicat d'agglomération nouvelle) et de l'association française contre les myopathies. Une équipe est en charge de la politique de développement industriel (implantation et création d'entreprises de haute technologie en biologie), une troisième de la communication.

La biotechnopôle d'Évry regroupe déjà 15 laboratoires de recherche et 25 entreprises ou projets d'entreprises, dont 15 sont en cours de création. À la fin de l'année 2001, le centre d'Évry devrait regrouper entre 20 et 30 laboratoires de recherche et 30 à 40 entreprises de biotechnologies. Ainsi, Genopole se caractérise par la volonté d'associer des compétences scientifiques et industrielles dans le respect des droits et des devoirs de chacun.

Pierre TAMBOURIN,  
Directeur de Genopole®

transmis, directement des parents à leur descendance, avec un taux de mutations assez stable pour jouer le rôle de repère temporel. Parfois des transferts de gènes...

...d'importants bonds évolutifs, comme dans le cas des organites qui produisent l'énergie dans les cellules animales (les mitochondries) et dans les cellules végétales (les chloroplastes) : ces constituants cellulaires ont leur propre matériel génétique et proviennent de bactéries qui ont été « avalées » par des cellules eucaryotes.

Ce type de « transfert génique horizontal » semble avoir été assez fréquent dans l'histoire de la vie, de sorte que la comparaison des gènes entre les espèces n'aboutira pas à un arbre phylogénétique unique et universel. Comme

l'histoire de l'espèce humaine, l'histoire de la vie serait plutôt comparable à un treillis, où des ramifications s'éloignent, se rapprochent et fusionnent, pour se séparer à nouveau.

Dans 50 ans, le livre de l'histoire de la vie sera plus complet, même si l'énigme de l'apparition du premier organisme capable de se reproduire n'a pas encore été résolue. Nous saurons, cependant, que les différentes lignées se sont formées, ont adopté ou adapté des gènes, se dotant de nouvelles voies métaboliques ou de nouvelles organisations corporelles.

L'observation de la vie à l'échelle du gène sera si familière aux biologistes qu'ils ne parleront plus d'organismes ou d'espèces, mais de gènes. Ils auront identifié les gènes qui ont été trans-

mis ensemble, sur quelles périodes, et dans quels génomes. On aura alors peut-être la réponse à la question posée par Charles Darwin, restée aujourd'hui sans réponse : qu'est-ce qui distingue l'homme des autres espèces ?

D'autres questions apparaîtront certainement. Les nouvelles hypothèses scientifiques, fondées sur les données recueillies, seront postulées. Paradoxalement, malgré son importance croissante, la génomique, en tant qu'entité bien définie, sera peut-être un peu occultée, car elle aura diffusé dans tous les domaines de la biologie ; elle sera peut-être absorbée par la médecine.

Comment la société réagira-t-elle à cette explosion des connaissances génétiques ? Cette question n'a pas aujourd'hui de réponse simple. Avec les progrès de la génétique et de la technique, on devrait soigner mieux diverses maladies et soulager nombre de souffrances. Toutefois, le progrès s'accompagne de risques : ainsi, certains financiers utilisent, aujourd'hui, des arguments génétiques pour tenter de justifier l'existence de groupes raciaux et ethniques. On peut craindre que certains employeurs ou assureurs utilisent les informations génétiques pour refuser un emploi ou une assurance. Saurons-nous maîtriser le pouvoir que peut conférer la mise à disposition de l'information génétique ? La question reste ouverte.

Nous espérons que la génétique

ne nous craignons que les tensions ne s'accroissent entre les partisans du progrès scientifique et les adeptes d'un retour à une vie plus « naturelle ». Les sociétés devront veiller à ce que la génomique soit bien acceptée par la collectivité et à ce que les progrès liés à cette discipline ne soient pas utilisés à des fins pernicieuses.

Francis COLLINS dirige l'Institut de recherche américain sur le génome humain (NHGRI), où Karin JEGALIAN est journaliste scientifique.

Thomas D. GELEHRTER, Francis S. COLLINS et David GINSBURG, *Principles of Medical Genetics*, deuxième édition, Williams and Wilkins, 1998.

Francis S. COLLINS, *Shattuck Lecture – Medical and Societal Consequences of the Human Genome Project*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 341, n° 1, pp. 28-37, 1<sup>er</sup> juillet 1999.



# Que nous apprendront les fossiles?

ÉRIC BUFFETAUT

*Les prochaines avancées en paléontologie dépendront de la découverte de nouveaux fossiles. Ces découvertes seront plus clairement interprétées dans le cadre des grands événements qui ont marqué l'histoire de la Terre.*

**E**n paléontologie, la prospective est un exercice difficile, parce qu'elle dépend de la prospection... : le progrès paléontologique et la percée conceptuelle sont tributaires du hasard des découvertes. Ainsi notre vision moderne de l'apparition des oiseaux en est-elle née de la découverte de la première (<sup>2</sup>) plume fossile. Or la conservation d'un organisme à l'état de fossile est déjà un petit miracle, et la mise au jour du fossile par l'érosion naturelle ou par l'activité humaine est aléatoire. La paléontologie est une science de terrain, une science naturaliste, ce que les représentants d'autres disciplines plus théoriques ont parfois du mal à apprécier.

S'il est difficile de prévoir quels seront les grands progrès de la paléontologie, il est en revanche aisé de prédire que les découvertes de nouveaux fossiles constitueront, comme elles l'ont toujours fait, un apport essentiel au développement de la discipline. Mais c'est aussi par des approches nouvelles, liées à des conceptions originales de l'évolution de la Terre et des êtres vivants qui la peuplent, que la paléontologie de demain elle-même évoluera.

La paléontologie se laisse malaisément programmer, car la découverte inattendue est la seule façon de

ment, comme l'Antarctique, réservent des surprises intéressantes, des exemples récents montrent que des contrées supposées bien connues, parce que nous les exploitons depuis longtemps, livrent parfois des fossiles tout à fait inattendus.

Un bon exemple est celui de *Baryonyx*, un grand dinosaure apparemment piscivore d'un type nouveau, découvert en 1983 dans une carrière des environs de Londres. Cet animal a modifié nombre de nos conceptions sur les dinosaures théropodes ; pourtant il provient de couches géologiques qui livrent des restes de dinosaures depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, et où l'on aurait pu croire qu'il n'y avait plus grand-chose de nouveau à trouver. Un autre exemple est celui de *Gargantuavis philoinos*, un oiseau géant incapable de voler, récemment trouvé dans le Crétacé supérieur du Sud de la France, où l'on avait précédemment trouvé en quantité des os de dinosaures sans que rien puisse faire supposer l'existence de tels oiseaux, jusque là insoupçonnés au Crétacé. On peut aussi citer les nouveaux restes de *Baryonyx*, tout comme ceux de *Gargantuavis*, furent découverts par des paléontologues amateurs. Lorsque ceux-ci collaborent avec les professionnels, les découvertes sont plus nombreuses. La paléontologie est importante. Nul doute que, dans le futur, certaines découvertes d'un grand intérêt seront dues à des amateurs.

Sachant que l'inattendu se trouve parfois à notre porte, peut-on néanmoins prédire que certains types de fossiles non encore connus seront un jour découverts ? Ce que nous savons

de l'évolution des êtres vivants peut nous guider. Il ne s'agit pas là de retourner aux conceptions dépassées du début du XX<sup>e</sup> siècle, quand certains croyaient avoir découvert des « lois de l'évolution » qui se révélèrent n'être, au mieux, que de vagues règles empiriques. Les tentatives plus récentes dans cette direction, même lorsqu'elles prétendent s'appuyer sur des méthodes modernes (les fractales, par exemple), ne sont pas plus convaincantes, et leurs résultats n'ont rien apporté de convaincant ni de constructif à la connaissance du déroulement ou des processus de l'évolution. Pour en savoir plus, il faut continuer à trouver des fossiles au rythme du calcul, comme le disait le paléontologue Pierre de Saint-Seine dans les années 1920. Ce n'est peut-être pas le doute le plus approprié, mais il est sans doute possible de faire des déductions à partir de ce que nous savons de l'histoire évolutive de certains groupes d'organismes.

## La prévision, parfois facile...

La prévision est parfois facile. Ainsi l'actuelle cœlacanthe, *Latimeria*, d'abord trouvée dans l'océan Indien au large de l'Afrique du Sud, a été découverte

beaucoup plus récemment dans les eaux indonésiennes, est un représentant d'un groupe de poissons que l'on a longtemps cru éteint — d'où les innombrables considérations sur la nature de « fossile vivant » du cœlacanthe. Un des nombreux points intéressants de cette histoire, c'est que les plus récents fossiles connus de cœlacanthes, qui ressemblent

à la forme actuelle, ont été trouvés dans des roches datant du Crétacé supérieur, ce qui signifie qu'il existe une lacune temporelle de quelque 80 millions d'années entre ces fossiles et l'actuel *Laticleria*. Comme il est évident que des cœlacanthés ont existé pendant toute cette période, qui couvre la fin du Crétacé et tout le Cénozoïque, on peut s'attendre à ce que des fossiles de cœlacanthés soient un jour trouvés dans des roches du Crétacé terminal, ou de quelque étage du Tertiaire. Cela ne manquera pas de faire quelque bruit dans les milieux paléontologiques, mais la découverte de cœlacanthés fossiles n'est

d'animaux ou de plantes « apparaissent » dans les couches géologiques d'une façon abrupte, avec des formes relativement évoluées, ce qui suggère que des représentants plus anciens et plus primitifs existent. Beaucoup de groupes de dinosaures sont ainsi encore mal connus. Les sauroptères, par exemple, font leur apparition dans le registre paléontologique au début du Jurassique, mais tout porte à croire qu'ils étaient déjà présents au Trias, et que leurs restes seront tôt ou tard trouvés dans des roches de cette période.

au monde vivant dans son ensemble. La recherche de la filiation est, en pratique, à bien sûr fort peu de chance d'aboutir un jour, mais l'étude des très anciennes traces de vie, qu'il s'agisse d'ailleurs de véritables fossiles ou d'indices chimiques d'une activité biologique, dans de très vieilles roches précambriennes, est un domaine de recherche très actif, où des découvertes importantes sont à attendre.

## Le futur de la filiation

Les arbres de parenté, actuellement établis grâce à la méthode de la taxinomie phylogénétique, ou cladisme, autorisent aussi certaines prédictions. Bien avant l'avènement du cladisme, d'ailleurs, certains paléontologues ne s'étaient pas privés de spéculer sur la découverte prévisible de « chaînons manquants » entre groupes d'organismes. Dès l'acceptation de l'évolutionnisme par la communauté paléontologique

## La recherche des origines

La connaissance que nous avons acquise, au bout de deux cents ans de recherche paléontologique, de l'histoire des êtres vivants à travers les temps géologiques autorise bien des suppositions sur les découvertes à venir. Certains groupes

sentants des groupes les plus variés d'organismes est une préoccupation essentielle des paléontologues. La découverte toute récente des plus anciens poissons connus, dans le Cambrien de Chine, illustre de façon spectaculaire les résultats qu'on peut attendre de telles recherches. Cette quête des origines s'étend évidemment



1. LA CHINE AU CRÉTACÉ INFÉRIEUR (il y a environ 120 millions d'années) : un groupe de *Beipiaosaurus* (dinosaures thérozinosauroides) sème la panique parmi divers autres animaux emplumés : à droite, le dinosaure théropode *Caudipteryx* ; à gauche, les dinosaures *Sinosauropteryx* (compsognathidés) et *Sinornithosaurus* (dromaeosauridés). Dans les branches, de vrais oiseaux (*Confuciusornis*). Cette reconsti-

tution de Luis Rey est fondée sur des spécimens récemment découverts dans le nord-est de la Chine. Ces fossiles remarquablement conservés montrent des traces de revêtements épidermiques, plumes ou filaments, qui conduisent à modifier profondément l'image que l'on se faisait de certains dinosaures – et qui confirment les prédictions faites par certains paléontologues depuis une vingtaine d'années.

durant les dernières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle les réflexions sur ce thème ne manquèrent pas, avec parfois des résultats

connait l'exemple du médecin et anatomiste néerlandais Eugène Dubois, que des considérations théoriques sur l'évolution humaine conduisirent à Java pour y trouver le « chaînon manquant » entre l'homme et le singe : il y découvrit les restes du *Pithecanthropus*, aujourd'hui considéré comme un humain archaïque, *Homo erectus*.

La paléontologie actuelle s'est quelque peu détournée de la quête des chaînons manquants, mais la recherche des « groupes-frères » a en grande partie remplacé cette dernière. La recherche du groupe-frère des oiseaux, par exemple, occupe actuellement bon nombre de paléontologues, stimulés par la découverte récente de divers petits dinosaures à plumes, et d'oiseaux primitifs aux caractères dinosauriens. C'est un domaine où il y a peu de place au grand risque d'erreur que des découvertes importantes sont à attendre. D'ores et déjà, des fossiles déterminants à cet égard se sont trouvés au rendez-vous du « calcul », ou plutôt de la spéculation intellectuelle.

## La paléobiologie

Les réflexions dépassent d'ailleurs le domaine de la phylogénie pour s'étendre à celui de la paléobiologie. Dès les années 1980, le paléontologue et artiste américain Gregory Paul avait supposé l'existence de plumes chez certains dinosaures, et réalisé des reconstitutions de théropodes emplumés. Cette conception était fondée en grande partie sur l'idée de liens phylogénétiques étroits entre ces dinosaures et les oiseaux : G. Paul, en 1987, trouva

de concevoir que les petits théropodes, très proches d'*Archaeopteryx*, n'aient pas été emplumés comme leurs descendants aviens». De plus, dans l'hypothèse où ces dinosaures avaient pu être homéo-

thermes (« à sang chaud »), un revêtement épidermique de type plume paraissait probable. Les dinosaures couverts de plumes dessinés par G. Paul et certains autres artistes paraissaient hautement séduisants jusqu'à la découverte, à partir de 1996, de fossiles remarquablement conservés dans le Crétacé supérieur du nord-est de la Chine. Nombre d'entre eux montrent, outre le squelette, les restes de parties « molles » qui ne sont qu'exceptionnellement conservées à l'état fossile. Ils révèlent que beaucoup de dinosaures théropodes étaient couverts de filaments, pas à proprement parler des plumes, mais une sorte de duvet. Ce revêtement épidermique a été observé chez des représentants des compsognathidés, des dromaeosauridés et des thérizinosaures. Qui plus est, deux petits théropodes montrant de vraies plumes, *Archaeopteryx lithographicus* et *Caudipteryx*, ont aussi été décrits (certains auteurs, il est vrai, y verraient plutôt des oiseaux primitifs perdus de l'aptitude au vol). Les reconstitutions les plus récentes montrent le même type de revêtement chez ceux qui sont emplumés, sous un jour nouveau, mais assez conforme aux prédictions de G. Paul.

On pourrait aussi rappeler comment la découverte de nombreuses pistes de ptérosaures à Crayssac (Lot) par Jean-Michel Mazin et son équipe a brillamment confirmé les suppositions de divers paléontologues, au pre-

mier rang, desquels Peter Wellnhofer : ces reptiles à quatre pattes. Ces prédictions se sont « réalisées » grâce à la découverte de nouveaux gisements contenant des fossiles extraordinairement bien conservés révélant des détails anatomiques remarquablement préservés.

## Impasses et espoirs déçus

Dans le domaine d'une science du passé comme la paléontologie, on peut donc parfois prévoir l'avenir. Qu'en est-il maintenant du développement futur de la discipline, considéré dans une optique plus vaste ? Quelles sont les directions de recherche, les approches qui devraient conduire à des avancées intéressantes ? Il faut tout d'abord être prudent et se garder de certains enthousiasmes pré-

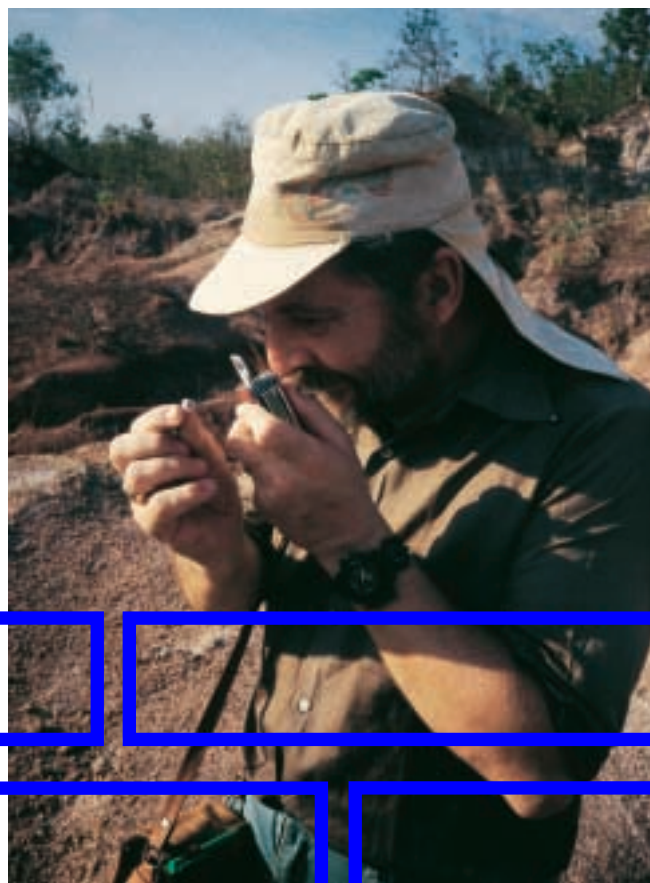
matistes. Au début des années 1990, certains paléontologues plaçaient beaucoup d'espoir dans la recherche de biomolécules fossiles, en particulier d'ADN. Le succès du film *Jurassic Park* a contribué à populariser cette approche, et l'idée de reconstituer le code génétique d'organismes disparus, voire de les recréer, a excité les imaginations. L'annonce de la découverte par une équipe américaine de restes d'ADN dans des insectes fossiles conservés dans l'ambre donnait corps à ces espoirs, même si, pour les paléontologues, la recréation de dinosaures relevait de la science-fiction. Les espoirs sont retombés, depuis que

les tentatives pour répéter cette extraction d'ADN fossile, menées notamment en Angleterre, se sont toutes révélées vaines : la molécule d'ADN est trop fragile pour résister longtemps aux modifications chimiques liées à la fossilisation, et il paraît vraisemblable que des contaminations sont à l'origine des « découvertes » signalées dans les insectes de l'ambre.

La paléontologie metteuse s'est transformée en déception. Cela ne signifie pas que l'approche biochimique de l'étude des fossiles soit nécessairement vouée à l'échec. L'étude des isotopes de certains éléments (notamment le



**2. FÉMUR (à gauche) et ensemble sacrum-bassin (à droite) de *Gargantuavis philoinos*, oiseau géant, incapable de voler, provenant du Crétacé supérieur du Languedoc. Les premiers restes de cet oiseau, de la taille probable d'une autruche, ont été découverts en 1995 en Provence. On ignorait auparavant qu'il eût existé de tels oiseaux terrestres de grande taille au temps des dinosaures. La découverte de *Gargantuavis* dans le Crétacé supérieur du sud de la France, où l'on récolte des vertébrés fossiles depuis plus de 150 ans, illustre bien la possibilité de trouver des fossiles totalement insoupçonnés dans des lieux qui peuvent paraître à tort bien connus paléontologiquement. La recherche paléontologique réserve sans nul doute encore beaucoup de surprises de ce type.**



Eric Buffetaut

**3. DÉGAGEMENT DES VERTÈBRES** de la queue de *Siamotyrannus isanensis*, le plus ancien tyrannosaure connu, dans le Crétacé inférieur du nord-est de la Thaïlande. La découverte de ce spécimen a fait reculer d'au moins vingt millions d'années dans le passé l'ancienneté de la famille des *Tyrannosauridae*. Elle est le résultat d'un programme

de recherches à long terme sur les dinosaures de Thaïlande, soutenu par le Service géologique de Thaïlande et le CNRS. La recherche sur le terrain est l'un des moteurs essentiels du progrès des connaissances en paléontologie, et l'on peut sans nul doute en attendre des découvertes majeures dans le futur.

carbone et l'azote) dans le collagène conservé par certains fossiles a ainsi pu donner des résultats intéressants sur le régime alimentaire de certains dinosaures, tels que les ours des cavernes ou le mammoth. Cependant, les résultats significatifs obtenus jusqu'ici portent essentiellement sur des animaux relativement peu anciens à l'échelle géologique, dont les fossiles ont pu conserver en relativement bon état des molécules qui résistent apparemment mal aux phénomènes de la fossilisation.

La mauvaise conservation à long terme de ces molécules organiques pourrait imposer une limite difficile à franchir à beaucoup d'approches biochimiques. Cependant, les découvertes épisodiques de spécimens très bien conservés, qu'il s'agisse de mammouths congelés ou d'insectes ou de lézards inclus dans de l'ambre, font resurgir périodiquement des espoirs que les médias font facilement passer dans le domaine de la science-fiction. Au demeurant, une meilleure connaissance des espèces fossiles en tant qu'êtres qui

furent vivants ne passe pas nécessairement par des techniques particulièrement nouvelles ou élaborées : la découverte dans le désert de Gobi de squelettes du dinosaure *Oviraptor* en position de couvaison sur ses œufs nous a appris beaucoup plus sur la reproduction des dinosaures que toutes les études biogéochimiques réalisées sur les œufs de dinosaures depuis une quinzaine d'années. L'intérêt pour la biologie, la physiologie et le comportement des espèces disparues aussi vieux que la paléontologie elle-même, est particulièrement fort actuellement, et il ne fait guère de doute que les reconstitutions paléobiologiques à partir de nouvelles ou sur des fossiles remarquables, ont un grand avenir.

C'est probablement au niveau des grandes tendances que l'on peut tenter une certaine prospective en paléontologie. Depuis les débuts de cette discipline scientifique, la première tâche des paléontologues a été d'établir l'inventaire des espèces

fossiles d'animaux et de végétaux. Cette tâche est loin d'être achevée, comme l'indique le rythme de description de nouvelles espèces fossiles appartenant à tous les groupes zoologiques et botaniques. Mais cet inventaire ne prend tout son intérêt que lorsqu'il est interprété.

## Datation et interprétation

Aux débuts de la paléontologie scientifique, durant les premières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle, un des premiers soucis était de déterminer la distribution dans les couches géologiques. Cette approche stratigraphique a été grandement renforcée, notamment à cause de son application à la datation relative des roches, et ses progrès futurs seront sans doute un affinement grandissant de la résolution fournie par les datations biostratigraphiques.

Avec le triomphe de l'évolutionnisme dans les décennies suivant la parution de *l'Origine des espèces* de Darwin

| PÉRIODE     | DATE (MA) | ÉVÉNEMENTS MAJEURS                    | PRINCIPAUX GROUPES AFFECTÉS                               |
|-------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| NÉOÈNE      |           | ÉVOLUTION HUMAINE                     | Plancton, invertébrés marins                              |
| PALÉOÈNE    |           |                                       | Plancton, mammifères                                      |
|             |           |                                       | Plancton, invertébrés marins, mammifères                  |
|             |           | LES PLANTES À FLEURS                  | Plancton, invertébrés et reptiles marins, dinosaures      |
| CRÉTACÉ     |           | ÉVÉNEMENT PRÉDOMINANT                 | Invertébrés marins                                        |
|             |           |                                       | Plancton, invertébrés marins, reptiles marins, dinosaures |
| JURASSIQUE  | 144       | ÉVOLUTION DES PREMIERS OISEAUX        | Invertébrés marins                                        |
| TRIAS       | 252       | ÉVOLUTION DES PREMIERS MAMMIFÈRES     | Invertébrés marins                                        |
| PERMIEN     | 286       |                                       | Protozoaires, invertébrés marins, reptiles, mammaliens    |
| CARBONIFÈRE | 320       | ÉVOLUTION DES PREMIERS REPTILES       |                                                           |
|             |           | INVASION DES TERRES PAR LES VERTÉBRÉS |                                                           |
| DÉVONIEN    | 408       | EXPLOSION DES PLANTES TERRESTRES      | Plancton, invertébrés marins, poissons primitifs          |
| SILURIEN    | 438       |                                       | Invertébrés marins, dont les bâtisseurs de coraux         |
| ORDOVICIEN  | 505       | ÉVOLUTION DES POISSONS                | Invertébrés marins (trilobites)                           |
| CAMBRIEN    | 590       | DIVERSIFICATION DE LA VIE MARINE      |                                                           |
| PRÉCAMBRIEN | 650       |                                       |                                                           |

**4. LES GRANDES EXTINCTIONS, (en rouge), ont ponctué l'histoire des êtres vivants, éliminant certaines espèces et permettant l'explosion évolutive d'autres lignées. Ces extinctions sont liées à des crises de l'environnement terrestre dont les causes seront précisées par des recherches sur les fossiles et sur la dynamique du système solaire.**

en 1859, les fossiles acquièrent rapidement le statut de témoins privilégiés de l'évolution. Ce fut la grande époque de la recherche des chaînons manquants, mais aussi celle de la recherche de «lois» de l'évolution, que l'on espérait découvrir par l'étude des données paléontologiques. Cette recherche de lois s'est révélée assez vaine, et les rares tentatives récentes dans ce sens paraissent tout aussi vouées à l'échec. Depuis l'avènement de la théorie synthétique, ou néo-darwinienne, de l'évolution, qui a intégré notamment les données fondamentales de la génétique, qu'ignorait Darwin, il est apparu que ce n'est pas la paléontologie qui peut nous renseigner le plus efficacement sur les mécanismes

de l'évolution (qui relèvent beaucoup plus de la génétique et de la biologie moléculaire), alors qu'elle reste une source d'information absolument irremplaçable sur son déroulement. Cela a conduit à souligner de nouveau le caractère de science historique de la paléontologie. Dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, on a assisté à un change-

ment d'approche très net dans le domaine de la paléontologie historique. L'accent fut longtemps mis sur l'analyse, fondée sur des études anatomiques détaillées, des grandes transitions évolutives, par exemple, dans le domaine de la paléontologie des vertébrés, le passage des poissons aux amphibiens, puis des amphibiens aux reptiles, des reptiles aux mammifères, etc. Plus récemment, la reconstitution des relations de parenté entre les organismes a pris le dessus sur le fait du développement de l'approche cladiste, la recherche des ancêtres étant remplacée par celle des groupes-fossiles. Cette approche paléontologique a été importante, mais a par-

historique. Un cladogramme veut exprimer des relations de parenté, mais il ne devient une représentation de l'histoire évolutive d'un groupe d'animaux ou de plantes que lorsqu'un stade suivant est franchi et qu'il est «calibré», replacé dans une succession stratigraphique.

Pour envisager ce que pourrait être la paléontologie du futur, il faut sans

doute s'intéresser à des changements d'approche plus récents encore. L'un des plus importants est sans doute la redécouverte du phénomène d'extinction. La paléontologie scientifique est née, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec la découverte de ce phénomène, lorsqu'il a été démontré de façon irréfutable, par Georges Cuvier notamment, que d'innombrables espèces animales et végétales n'avaient plus de représentants actuels, et qu'elles avaient donc disparu. La paléontologie naissante acquerrait ainsi son objet d'étude, les espèces qui n'existent plus de nos jours. Mais le phénomène d'extinction lui-même parut à beaucoup perdre de son intérêt dès lors que les catastrophes furent bannies de l'histoire de la Terre par une géologie systématiquement actualiste et gradualiste, et que la théorie de l'évolution permit de concevoir que beaucoup d'espèces avaient en fait disparu par transformation progressive. Dans un tel cadre conceptuel, les extinctions ne paraissaient plus que comme un phénomène secondaire voire accidentel, et ce jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup>, ce sont l'origine et la transformation des espèces qui ont mobilisé les énergies des paléontologues, bien plus que leur extinction.

## Les extinctions, problème majeur

Les choses ont changé depuis 1980, avec l'arrivée sur le devant de la scène d'un nouveau catastrophisme, bien sûr complètement débarrassé des arrière-pensées religieuses qui avaient coloré certaines des conceptions catastrophistes (mais pas toutes) au XIX<sup>e</sup> siècle. Les catastrophes étudiées par la géologie moderne n'ont plus rien de surnaturel, qu'il s'agisse de météorites extraterrestres ou d'éruptions volcaniques massives. L'étude des extinctions connaît depuis lors un regain d'intérêt, notamment celle des extinctions massives, qui affectent en un court laps de temps de nombreux groupes d'organismes, et qui sont éventuellement liées à des phénomènes catastrophiques.

Refaire des extinctions l'un des sujets centraux de la recherche paléontologique est en soi une petite révolution, même si relativement peu de paléontologues semblent en avoir pris conscience, ce qui est d'ailleurs paradoxal, parce que les récents débats sur

la question ont souvent été pour le moins vigoureux, notamment au sujet de la grande extinction de la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années. Il est vrai que physiciens, astronomes et géochimistes ont souvent occupé la première place dans les débats en question, mais il n'en est pas moins vrai que la question des extinctions en masse et de leurs causes remet la paléontologie au cœur d'un des débats majeurs des sciences de la Terre, position qu'elle n'avait pas occupée depuis longtemps. L'intérêt majeur des grandes crises environnementales qui ont affecté à plusieurs reprises notre planète, quelles que soient leurs causes exactes, est leurs effets sur le monde vivant. Ce sont d'ailleurs ces données paléontologiques qui permettent de repérer ces crises. Pour prendre l'exemple le plus connu, il est clair que l'impact d'un astéroïde de la limite Crétacé-Tertiaire n'aurait pas suscité autant d'intérêts s'il avait simplement laissé un énorme cratère, aujourd'hui invisible dans la topographie, sur la côte du Yucatán, et une mince couche d'argile contenant de curieuses anomalies géochimiques et minéralogiques au sein des sédiments déposés à cette époque dans le monde entier. Ce qui a rendu célèbre cet impact, c'est qu'il a provoqué une des plus sévères extinctions en masse, dont les dinosaures, entre autres, ont été les victimes. Des centaines d'articles publiés sur ce sujet, depuis 1980, par des scientifiques issus des disciplines les plus diverses tournent fondamentalement autour d'un problème paléontologique.

Que retenir de tels sujets? Beaucoup de choses et leur contribution sera essentielle. En effet, découvrir le ou les phénomènes physico-chimiques à l'origine d'une grande crise environnementale est une étape cruciale, mais il reste à comprendre le lien exact entre ces phénomènes et leurs effets sur les êtres vivants.

Les paléontologues sont bien évidemment les mieux placés pour répondre à ces questions qui sont d'ordre biologique. Toutefois, la question des extinctions en masse est qu'elles sont sélectives : alors que certains groupes d'organismes sont complètement éliminés (les dinosaures, par exemple), certains survivent (les crocodiliens), parfois sans être apparemment affectés. La naïveté des explications proposées à ce phénomène par des non-biologistes est parfois étonnante, et, dans ce

domaine en particulier, il reste énormément à faire aux paléontologues d'abord pour déterminer précisément quelles espèces s'éteignent et quelles survivent, ensuite proposer des explications biologiquement acceptables.

La paléontologie du futur aura donc à se pencher sur la question des extinctions, bien plus qu'elle ne l'a fait depuis près de deux siècles, et l'on peut certainement s'attendre à des découvertes intéressantes dans l'explication des phénomènes de disparition des espèces. Contrairement à ce que l'on a pu croire aux débuts de la paléontologie évolutive, et à ce que quelques chercheurs, extrêmement minoritaires, essaient encore de prouver aujourd'hui, les espèces ne sont pas vouées à l'extinction par ce mystérieux mécanisme interne. Tout au contraire, les liens entre l'histoire de l'organisation de la vie et l'environnement apparaissent de plus en plus clairement. Les grandes crises de l'environnement terrestre, quelles que soient leurs causes (et il est probable qu'elles furent diverses), ont eu une influence considérable sur le déroulement de l'histoire de la vie sur Terre, et y ont introduit un élément de hasard, ou de contingence, non négligeable.

Dire que l'évolution des êtres vivants et l'évolution de la planète qui les porte sont inséparables peut apparaître comme une banalité, mais c'est une constatation simple qui peut montrer la voie de certains développements futurs de la paléontologie. Dès l'avènement de la tectonique des plaques, et parfois même avant, les paléontologues ont compris que l'histoire des plantes et des animaux devait être interprétée en fonction des déplacements continentaux et des ouvertures océaniques. Mais la géographie n'est bien sûr qu'un des aspects du problème. Ce sont les changements de l'environnement dans son ensemble, y compris ceux de la composition de l'atmosphère, du climat, des circulations océaniques, etc., qui doivent être pris en considération pour comprendre les influences qui se sont exercées sur l'évolution.

La substitution des environnements du passé n'est pas chose aisée, mais les études en ce domaine se multiplient, avec par exemple la production de modèles climatiques pour des périodes de plus en plus anciennes. La paléontologie est en mesure de jouer un rôle considérable dans l'élaboration de tels modèles, parce qu'elle fournit des don-

nées concrètes qui peuvent être confrontées aux modèles théoriques, et éventuellement les réfuter. Cela peut être aisément illustré par les travaux sur les périodes de crise ou de catastrophes pour lesquelles certains modèles proposés se révèlent inadéquats, car ils ne tiennent pas compte des données paléontologiques. Ainsi, les scénarios qui postulent une baisse considérable et durable des températures à la limite Crétacé-Tertiaire ont souvent été rejetés, pour la simple raison que beaucoup de reptiles, dont on sait que les représentants actuels ne résistent pas au froid, ont survécu aux événements de cette période.

## L'évolution n'est pas un long fleuve tranquille

Environnement uniformitariste et statique de l'histoire de la Terre qui a dominé la géologie pendant plus d'un siècle a commencé à s'effacer, au profit d'une vision plus dynamique, avec l'hypothèse de la dérive des continents, puis avec l'avènement de la tectonique des plaques. Elle est battue en brèche d'une façon encore plus sévère par le retour du catastrophisme qui souligne l'importance des périodes de crise. Dans un tel contexte, il n'est plus possible de concevoir l'évolution générale des êtres vivants comme un déroulement calme et majestueux. C'est une véritable tempête de bouleversements qu'il faut sans doute envisager, et c'est dans ce cadre renouvelé que se feront sans doute les grandes découvertes paléontologiques de demain. Mais, quelles que soient les approches utilisées, à la source des progrès les plus spectaculaires il y aura toujours la recherche et la découverte de nouveaux fossiles sur le terrain.

Éric BUFFETAUT est directeur de recherche au CNRS.

Éric BUFFETAUT, *Dinosaures. À la recherche d'un monde perdu*, L'Archipel, 1997.

Rob DESAILLES et DAVID LINDSEY, *La science de Jurassic Park*, Bayard Éditions, 1997.

Walter ALVAREZ, *La fin tragique des dinosaures*, Hachette, 1998.

Éric BUFFETAUT, *Histoire de la paléontologie*, collection «Que sais-je?», Presses universitaires de France, 1998.

*Les fossiles, témoins de l'évolution*, collection Bibliothèque Pour la Science.



# Inné contre acquis : la fin de l'opposition

**FRANS DE WAAL**

*On s'est longtemps demandé si le comportement humain est déterminé par la génétique ou par l'expérience acquise. Abandonnons cette dichotomie périmée.*



D'ailleurs, le caractère inné ou acquis du comportement a toujours été controversé. Pour les biologistes, les gènes jouaient le rôle principal. En revanche, les sociologues se sont ralliés en

chacun façonnerait son comportement et sa personnalité, indépendamment de tout déterminisme génétique.

Dans les années 1970, mes conférences de vulgarisation me précipitaient souvent au cœur du débat : quand je mentionnais des différences entre individus de sexes opposés chez les chimpanzés (je disais, par exemple,

plus ambitieux que les femelles), je m'attirais invariablement des huées et des protestations. On prétendait que je projetais mes propres valeurs sur ces pauvres animaux, que mes

Et pourquoi avais-je comparé les deux sexes? Et quelles preuves avais-je de ce que j'affirmais?

Aujourd'hui, les mêmes données ne suscitent plus de réactions. Les comparaisons des comportements humains et simiens, naguère taboues, ennuiant les auditoires. Tout le monde a entendu dire que les hommes sont

plus guerriers que les femmes. Les journaux montrent fréquemment que les zones actives du cerveau humain ne sont pas les mêmes chez l'homme et chez la femme, engagés dans les mêmes tâches.

avec cette manie d'attribuer à la seule biologie les différences entre les hommes et les femmes. Ces simplifications grossières sont à la mode : par exemple, l'évocation d'effets hormonaux normaux en termes d'«empoisonnement à la testostérone» est tendancieuse. Ce n'est pas ainsi que l'on comprendra comment la génétique



1. CES JUMEaux, ÉLEVÉS SÉPARÉMENT, sont tous les deux devenus des pompiers moustachus. En les étudiant, on évalue la contribution relative des gènes et celle de l'expérience sur le comportement humain.

interagit avec l'expérience acquise pour déterminer le comportement. Nous sommes brusquement passés d'un excès à un autre, oubliant les apports des sciences sociales. Nous voulons croire, soit à la toute-puissance des gènes, soit à celle de l'expérience, mais pas à une combinaison des deux.

Pour prévoir l'issue de cette controverse, revenons d'abord sur son histoire. Le débat a commencé en 1950, parce que les deux thèses ont des conséquences politiques. Les attitudes se répartissent entre celle des réformateurs, qui croient que l'adaptation de l'homme est sans borne, et celle des conservateurs, obsédés par la race et le sang. Au XX<sup>e</sup> siècle, les deux positions extrêmes ont causé des souffrances considérables.

## Apprentissage contre instinct

Dans les années 1950, behavioristes et éthologues s'affrontaient. À partir d'expériences où l'on apprend une action à un animal (par exemple, appuyer sur un levier), les behavioristes pensaient que tout comportement résultait d'un apprentissage par essais et erreurs successifs, chez l'homme comme chez l'animal, quelle que soit l'espèce. Le fondateur du behaviorisme, B. Skinner, l'avait ainsi formulé : « Pigeon, rat ou singe, c'est sans importance ! »

En revanche, les éthologues étaient convaincus que tout animal naît avec un certain nombre de schémas de comportement innés, qui résultent d'une adaptation à l'environnement de l'évolution, et qui changent peu en fonction de l'expérience acquise par chaque individu. Ainsi, personne n'apprend à rire ou à pleurer : ces réactions innées sont universelles. De même, l'araignée n'apprend pas à tisser sa toile ; dès la naissance, elle sait comment entrelacer les fils de soie produits par ses glandes.

Ces deux théories ont beaucoup séduit, parce qu'elles se réclament de l'évolution, bien qu'elles soient en réalité, incompatibles avec celle-ci. Pour les behavioristes, le comportement de chaque individu est seulement déterminé par l'expérience qu'il a acquise : les gènes n'interviennent pas. Cependant, les behavioristes reconnaissent que les similitudes entre les comportements

animaux et humains sont dues à l'évolution. C'est là que réside toute la contradiction, car l'évolution est bien une affaire de gènes. C'est aussi la source de la diversité de la vie, car chaque animal est adapté à un mode de vie et à un environnement spécifiques. Les propos de Skinner montrent à quel point cette idée fut ignorée.

De même, pour les éthologues, la génétique prend parfois le pas sur la sélection naturelle. Au début, ils pensaient que les comportements évoluaient pour assurer la pérennité de l'espèce. Par exemple, l'agressivité était peu à peu inhibée, parce que, sinon, les animaux se seraient entre-tués et l'espèce aurait fini par disparaître. C'est aussi pour cette raison que les animaux ont aussi une raison parfaitement égoïste pour éviter les combats : ils risquent d'être blessés. Aujourd'hui, les éthologues admettent que les comportements évoluent en raison des avantages qu'en tirent individuellement les animaux. Le bénéfice pour l'espèce n'est qu'une conséquence.

Le behaviorisme a commencé son déclin quand on a découvert que les animaux n'ont pas toujours les mêmes capacités d'apprentissage, selon la situation et selon l'espèce. Par exemple, un rat ne fait de rapprochement entre une action et ses effets que si ceux-ci lui succèdent immédiatement. Un rat apprendrait très difficilement à appuyer sur un levier si la récompense n'était donnée que plusieurs minutes après. Le rat est malade parce qu'il a mangé une nourriture avariée, il associe parfaitement sa maladie à l'ingestion de la nourriture, même si les symptômes ne se déclarent plusieurs heures après. Les animaux seraient donc des apprentis spécialisés : ils apprendraient plus facilement ce qui est utile à leur survie.

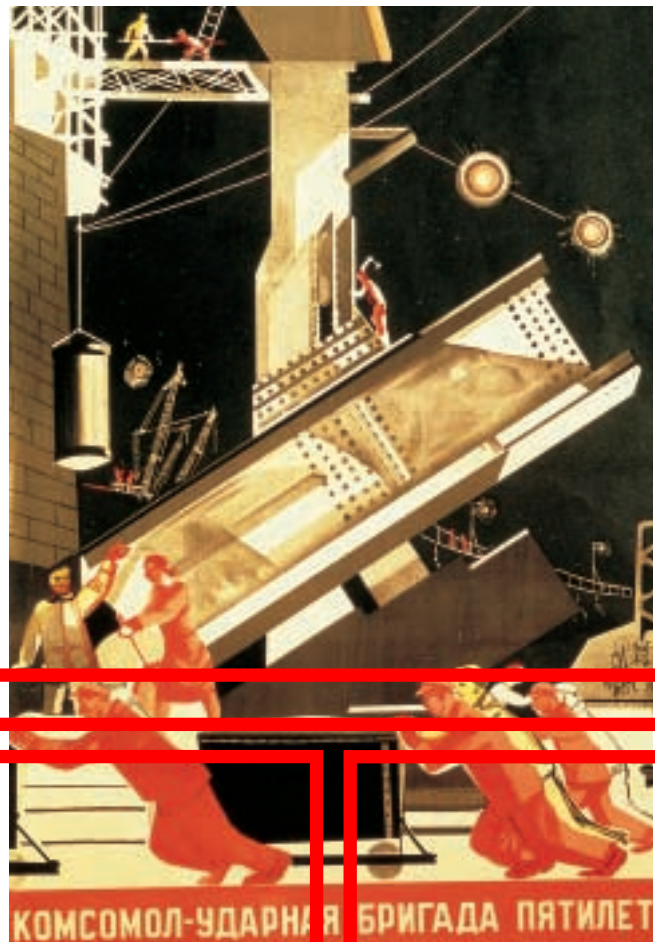
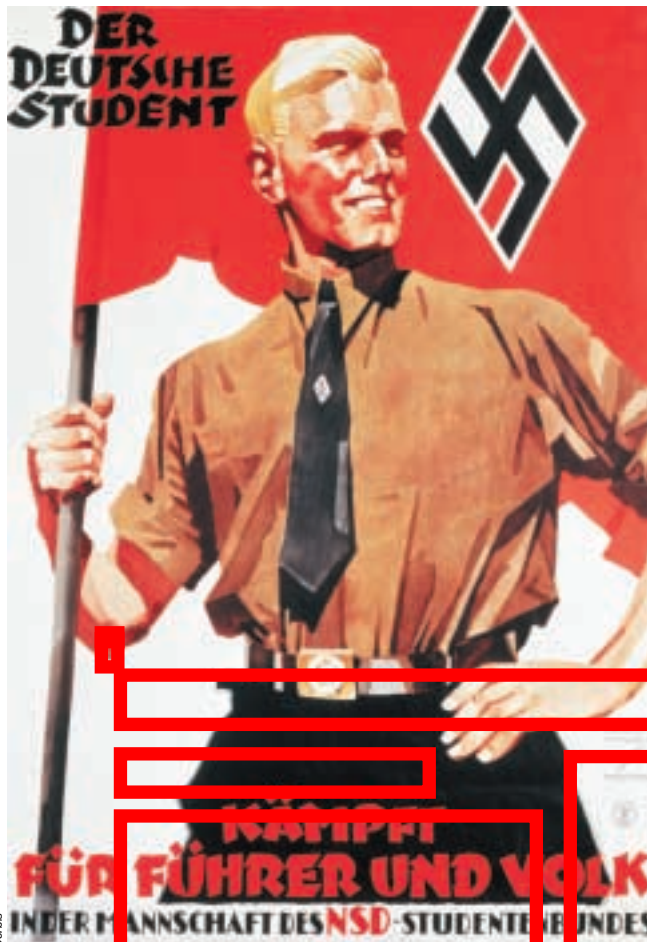
Ainsi, dans les années 1970, les behavioristes durent admettre que la biologie évolutionniste influence les résultats des observations des comportements animaux en dehors des laboratoires. À la même époque, les éthologues posaient les fondements de la révolution néo-darwinienne. Notamment, l'éthologue hollandais Nikolaas Tinbergen réalisa des expériences astucieuses pour évaluer l'impact du comportement

animal sur sa capacité à survivre. Il comprit aussi pourquoi de nombreux oiseaux enlèvent les coquilles vides d'œufs : les prédateurs les repèrent facilement : l'intérieur n'est pas coloré comme l'extérieur, de sorte que les œufs ouverts ne sont pas camouflés. Jeter les coquilles cassées est un comportement inné, qui répond au principe de sélection naturelle, car les oiseaux qui adoptent ce comportement sont plus nombreux à survivre.

Les éthologues ont aussi développé des théories pour expliquer les comportements sociaux chez les animaux. Par exemple, les fourmis font preuve d'« altruisme » quand elles meurent pour défendre leur colonie, ce qui leur évite d'être mangées par les congénères de la noyade en les soulevant jusqu'à la surface. L'entraide entre individus d'une même famille favoriserait la propagation des mêmes gènes, communs à la famille. Les animaux non apparentés s'aideraient pour que leurs congénères leur rendent la pareille s'ils étaient eux-mêmes en difficulté.

Les éthologues avaient une telle confiance en leurs explications des coopérations animales qu'ils ne résistèrent pas à la tentation de les appliquer à l'homme. Pour eux, la gigantesque coopération qu'est la société humaine était également fondée sur la promotion des gènes et sur la prévoyance individuelle. En 1975, le spécialiste des fourmis Edward Wilson fut le premier à déclarer qu'on pouvait mieux le comportement humain en l'étudiant selon une approche darwinienne : sociologues et biologistes devraient travailler ensemble au lieu de s'ignorer comme ils l'avaient toujours fait. Pour les biologistes, l'étude du comportement animal, appliquée à l'homme. Ce point de vue ne fut pas du goût des sociologues, qui refusèrent de travailler avec les biologistes. La « sociobiologie » de E. Wilson fut vivement critiquée, car elle était basée sur une vision du passé et, en fin de compte, avec le nazisme.

Bien que ces critiques soient manifestement injustes (E. Wilson proposait des explications évolutionnistes, pas des idées politiques), il n'y a rien d'étonnant à ce que la biologie humaine ait suscité tant d'émotions.



2. LES INTERPRÉTATIONS EXTRÊMISTES des idées étologiques et behavioristes sont dangereuses comme en témoignent le déterminisme biologique et le déterminisme communistes.

## Le fard du passé

Aujourd'hui, on admet que certains comportements humains sont modifiables parce qu'ils résultent d'un apprentissage, contrairement à d'autres qui font partie de notre héritage biologique.

Des idéologues de tous horizons ont utilisé cette distinction pour justifier que certaines caractéristiques humaines étaient innées (par exemple, l'intelligence, prétendument différente selon la «race») ou acquises, donc modifiables (tels certains stéréotypes sexuels, qui sont surmontables). Ainsi, le communisme supposait une grande flexibilité du comportement humain. Toutefois,

comme les êtres humains font en général passer leurs intérêts personnels avant ceux de la société (contrairement aux insectes sociaux), certains régimes ont accompagné leurs révolutions d'efforts d'endoctrinement massifs. En vain : après les terribles souffrances qu'il a causées, le communisme s'est finalement effondré,

parce que son principe de base était hors d'atteinte de la nature humaine.

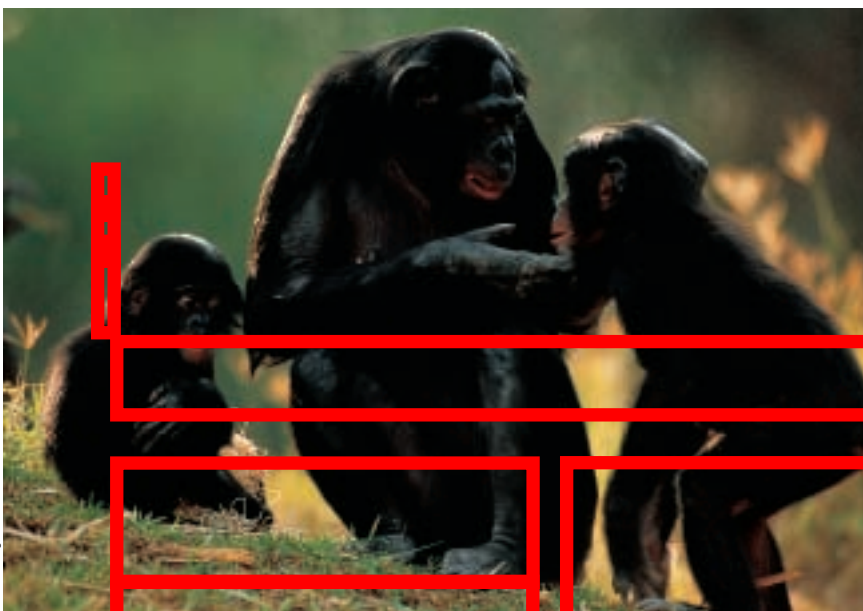
L'Allemagne nazie fit un usage de la biologie encore plus désastreux. Elle accordait également moins d'importance aux intérêts personnels qu'à ceux de la collectivité (*das Volk*), mais elle voulait manipuler les gènes au lieu de promouvoir les comportements sociaux. Les «races supérieures» devaient à tout prix être protégées de la contamination par des «races inférieures». Pour que le peuple soit «sain», on devait éliminer tous les éléments «cancéreux». Les nazis ont poussé ces idées à l'extrême, d'une manière que la civilisation occidentale a fait le vœu de ne jamais oublier.

Cette idéologie raciste fut cantonnée à l'Allemagne nazie. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, le mouvement eugéniste fut très en vogue chez les intellectuels américains et britanniques, qui voulaient améliorer l'humanité en «croisant les meilleurs spécimens». Fondée sur des idées qui remontent à la République de Platon, la stérilisation des handicapés men-

taux et des criminels était considérée comme une mesure préventive. Selon le darwinisme social, qui inspire encore certains politiciens, la population serait améliorée si on avait laissé les forts prendre le dessus sur les faibles dans un système généralisant le capitalisme. On ne devrait donc surtout pas aider les pauvres, sous peine d'aller à l'encontre de l'ordre naturel.

Évidemment, les catégories jugées inférieures – les femmes, les minorités et, de manière générale, les catégories de personnes qui subissent des discriminations – se méfièrent de la biologie et des interprétations qu'on en faisait. Pourtant, le déterminisme biologique a continué à influencer

que son opposé, c'est-à-dire la négation des besoins humains fondamentaux et la croyance que nous pouvons être tout ce que nous voulons. Les communautés hippies des années 1960, les kibboutz israéliens et les féministes proposèrent d'organiser la société comme si la jalousie, les liens entre parents et enfants et les



**3. LES COUSINS les plus proches de l'homme, telle cette famille de bonobos, partagent avec lui de nombreux types de comportements. Les programmes télévisés sur les animaux sauvages ont montré au public l'influence de la biologie sur le comportement.**

différence entre les deux sexes n'existaient pas. Ces idées sont aberrantes, parce qu'elles ne tiennent pas compte des penchants naturels.

Aujourd'hui, le génocide de la Seconde Guerre mondiale s'estompe dans les mémoires, tandis que l'influence des gènes sur le comportement se précise, comme le montrent les études sur des jumeaux élevés séparément. Les biologistes annoncent sans arrêt la découverte de nouveaux gènes. On connaît désormais la part de la génétique dans le déclenchement de la schizophrénie, de l'épilepsie, de la maladie d'Alzheimer et, même, dans certains traits de caractère, tel le goût du chocolat. On progresse dans l'étude des différences génétiques et neurologiques entre hommes et femmes, ainsi qu'entre homosexuels et hétérosexuels. Par exemple, on a trouvé une ressemblance entre une petite zone du cerveau des hommes transsexuels et la zone correspondante chez les femmes.

Aujourd'hui, la liste de tels progrès scientifiques est longue. Aujourd'hui, de sorte qu'on ne peut plus ignorer la quantité de preuves de l'influence des gènes sur le comportement. Les spécialistes qui ont toujours soutenu la thèse opposée rechignent à revoir leur jugement. Ils sont pourtant devancés par le grand public, qui croit à l'influence des gènes dans tout ce que nous faisons. De

même personne ne trouve plus à redire aux comparaisons entre l'espèce humaine et les espèces animales : grâce aux documentaires animaliers diffusés par les télévisions, on sait aujourd'hui que les animaux sont bien plus malins et intéressants qu'il n'y paraît.

D'après des études sur les chimpanzés et sur les bonobos, d'innombrables pratiques et facultés humaines (la politique, l'éducation des enfants, la violence et, même, la morale) existent aussi chez les grands singes. Comment croire encore au dualisme du passé, entre l'homme et l'animal, et entre le corps et l'esprit ?

Pourtant, certains idéologues utilisent encore la biologie pour cautionner le préjugé. Les politiques n'hésitent pas à décrire la nature humaine sous le jour qui les arrange. Pour les conservateurs, l'homme est naturellement égoïste, et, pour les libéraux, il est devenu un être social et coopératif. L'évidente exactitude de ces deux propositions montre qu'ils se réclament abusivement de la biologie.

## Le meilleur des deux mondes

Les seuls gènes sont comme des graines sur du goudron : stériles. Un trait de caractère est dit héréditaire quand une partie de sa variabilité s'explique par des facteurs génétiques.

On oublie souvent que l'autre partie s'explique par l'expérience acquise et par l'environnement.

Chercher l'influence relative des gènes et de l'expérience acquise dans un trait de caractère est absurde. Le primatologue suisse Hans Kummer a utilisé une métaphore pour l'expliquer. C'est le musicien qui détermine qu'il y a du musicien ou de son instrument, produit la musique ou dans quelle proportions ils interviennent. En revanche, si la musique change, on peut légitimement se demander qui, du musicien ou de l'instrument (des gènes ou de l'expérience acquise), a changé. C'est la seule question pertinente.

Au XX<sup>e</sup> siècle, les scientifiques préciseront les relations entre les gènes et les comportements. Nous verrons de mieux en mieux comment fonctionnent le cerveau. Les sociologues ont progressivement le paradigme évolutionniste : le portrait de Charles Darwin finira par décorer les murs des laboratoires de psychologie et de sociologie ! Espérons qu'une réflexion éthique et politique accompagne ces progrès.

En général, les scientifiques ne se sentent pas responsables de l'utilisation de leurs travaux. Parfois même, ils ont contribué à l'utilisation politique d'inexactitudes de leurs résultats. Le cas d'Albert Einstein est l'une des exceptions notables : la conscience morale devrait servir de modèle dans les sciences du comportement et dans les sciences sociales. Personne n'est mieux placé que les scientifiques pour veiller à éviter les interprétations erronées et les simplifications outrancières.

Le retour de l'anthropologie culturelle et évolutionniste, le cas de l'inceste donne une idée des développements futurs de ces sciences. Sigmund Freud et de nombreux anthropologues, comme Claude Lévi-Strauss, supposaient que le tabou de l'inceste servait à supprimer les pulsions sexuelles entre les membres d'une même famille. Freud

croyait que celles-ci étaient invariablement incestueuses chez les enfants en bas âge. Ainsi, ce tabou représentait la victoire finale de la culture acquise sur la nature innée.

Edward Westermarck, un sociologue finlandais contemporain de Freud, pensait au contraire que l'intimité des premières années de la vie,

entre mères et enfants, le cercle familial, supprime l'attraction sexuelle. Les individus qui ont été élevés ensemble auraient très peu d'attraction sexuelle les uns pour les autres. Pour Westermarck, qui était un fervent darwiniste, cette absence de désir résultait de l'évolution : l'évitement de l'inceste prévient les conséquences délétères de la consanguinité.

Récemment, Arthur Wolf, un anthropologue de l'Université de Stanford, a étudié le mariage à Taïwan. Les familles de cette île ont coutume d'adopter et d'élever leurs futures belles-filles : les époux grandissent ensemble dès leur plus jeune âge. A. Wolf les a comparés à des conjoints dont le mariage avait été arrangé sans qu'ils se rencontrent au préalable. Il a utilisé la proportion de divorces et le nombre d'enfants par couple comme indicateurs du bonheur conjugal et de l'activité sexuelle.

Westermarck avait formulé l'hypothèse de Westermarck : élever les futurs époux ensemble compromet leur vie conjugale. Un mécanisme similaire existe chez les primates. Ils évitent la consanguinité par la migration des individus mâles ou femelles à la puberté. Quand les individus restent dans le groupe familial après la puberté, ils ne s'accouplent pas.

Dans les années 1950, Kisa-buro Tokuda observa ces comportements pour la première fois, au sein d'un groupe de macaques japonais du zoo de Kyoto. Un jeune mâle, qui était devenu le chef du groupe usait fréquemment de sa position sexuelle,

en s'accouplant avec toutes les femelles... sauf avec sa mère. Ce cas n'est pas isolé. Chez les primates, les rapports sexuels entre mère et fils sont quasi inexistants, même chez les bonobos, pourtant les plus actifs de tous les singes sur le plan sexuel. On sait désormais que l'intimité des premières années de la vie, à l'inté-

rieur du cercle familial, supprime l'attraction sexuelle.

Le travail de E. Westermarck peut servir d'exemple aux approches darwiniennes du comportement humain. Il montre clairement que le comportement est déterminé par des facteurs innés (effet de l'intimité des premières années de la vie), acquis (apprentissage de l'inversion sexuelle), évolutionnistes (inhibition de la consanguinité, similitude avec le comportement animal), culturels (certains peuples élevent ensemble des enfants sans liens de parenté, d'autres séparent les frères et sœurs). La plupart ont des arrangements familiaux qui conduisent automatiquement à l'inhibition des pulsions sexuelles entre individus apparentés). À tout cela s'ajoute le tabou culturel propre à notre espèce. Sert-il simplement à renforcer l'«effet Westermarck» ou ajoute-t-il une nouvelle dimension ?

Au XX<sup>e</sup> siècle, la science progressera en cassant les vieilles barrières entre biologie du développement, génétique, sociologie, évolutionnisme et anthropologie. Ainsi, l'opposition traditionnelle entre comportement acquis et inné sera remplacée par une approche beaucoup plus globale. On s'intéressera de plus en plus aux effets de l'environnement où vivent les individus et à la transmission de l'information au sein de groupes de primates et de cétacés. Par exemple, certaines communautés de chimpanzés utilisent des pierres pour casser les noix.

D'autres communautés, qui disposent aussi de noix et de pierres, n'ont pas ce comportement. La génétique n'explique pas cette différence. Ce n'est qu'en débattant définitivement le débat opposant les composantes culturelles acquises et la nature innée du comportement humain que nous progresserons dans sa compréhension.

## Société Mathématique de France

P

r



### Prix d'Alembert des Lycéens

Créé à l'occasion

de l'Année mondiale

de la Mathématique 2000,

le Prix d'Alembert

des Lycéens

récompense

des conférences

de mathématiques

pour un public de jeunes...

Les candidatures au Prix d'Alembert peuvent être soumises par les candidats eux-mêmes ou par toute autre personne physique ou morale avant le 1<sup>er</sup> février 2000.

Les candidatures pour le Prix d'Alembert des Lycéens sont soumises par les candidats eux-mêmes avant le 1<sup>er</sup> février 2000. Ils doivent fournir à l'appui de leur candidature un CV, un résumé de leur conférence ainsi qu'un texte complet ou un enregistrement audiovisuel de leur conférence.

Frans de WAAL est directeur de recherche au Centre d'étude de primates d'Atlanta et professeur en science du comportement des primates au Département de psychologie de l'Université d'Emory.

Edward O. WILSON, *Sociobiology: The New Synthesis*, Belknap Press (Harvard University Press), 1975, édition du 25<sup>e</sup> anniversaire (à paraître).

Arthur P. WOLF, *Sexual Attraction and Childhood Association: A Chinese Brief for Edward Westermarck*, Stanford University Press, 1995.

Stephen Jay GOULD, *The Mismeasure of Man*, W.W. Norton, 1996.

Frans de WAAL, *Good Natured: The Origins of Right and Wrong in Humans and Other Animals*, Harvard University Press, 1997.



# Modifions-nous le climat ?

THOMAS KARL • KEVIN TRENBERTH

*On ne le saura vers 2050 que si tous les pays s'engagent dès aujourd'hui dans une surveillance météorologique régulière et rigoureuse.*

« L'ensemble des observations indique que l'espèce humaine a une influence perceptible sur le climat du Globe. » Par ces mots choisis, le Groupe intergouvernemental sur les changements climatiques, en liaison avec l'Association météorologique mondiale, l'Organisation météorologique de l'Organisation des Nations unies, a admis, en 1995, que l'espèce humaine a sa part de responsabilité dans la santé de la planète. Ce groupe n'a pas dit quand l'influence humaine sur le climat se fera sentir, ni où et comment ; ce sont là des questions dont les scientifiques et les hommes politiques débattent âprement.

Jusqu'ici, les changements climatiques qui semblent dus aux activités humaines ont été relativement limités, mais divers calculs indiquent que des effets importants risquent de se faire sentir à partir du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle ; ils seraient même supérieurs à ceux que le Globe a connus depuis la dernière glaciation, il y a environ 10 000 ans. Certaines régions profiteront peut-être, temporairement, des changements, mais on craint généralement des perturbations nuisibles, voire très graves. Évidemment, si les météorologues peuvent évaluer l'influence des diverses activités sur le climat, on pourrait prendre des mesures pour limiter les perturbations et relier leurs effets. L'évaluation des changements climatiques est-elle possible ? Nous le pensons. Mieux encore, une telle évaluation pourrait s'achever aux alentours des années 2050 si elle devenait une priorité internationale.

Bien qu'on ne sache pas évaluer avec précision l'impact des activités humaines sur le climat, on sait que

ces activités perturbent l'atmosphère. Par exemple, l'utilisation des combustibles fossiles dans les centrales thermiques et dans l'ensemble des moyens de transport rejette des particules et des gaz qui modifient la composition chimique de l'atmosphère. La combustion des produits riches en soufre engendre une pollution visible, sous la forme de petites particules qui donnent souvent au ciel un aspect laiteux. Ces particules, dont le diamètre est voisin de un micromètre (un millième de millimètre), refroidissent temporairement l'atmosphère, parce qu'elles réfléchissent vers l'espace certains rayonnements qui composent la lumière solaire ; toutefois elles ne restent pas dans l'atmosphère, parce que les précipitations les ramènent vers la surface de la Terre. Certains gaz, invisibles, sont cependant très durables. Le dioxyde de carbone reste dans l'atmosphère pendant plus d'un siècle, par exemple. Or ce composé et d'autres « gaz à effet de serre » laissent arriver jusqu'au sol beaucoup de rayonnements solaires, mais ils retiennent les rayonnements infrarouges, de sorte qu'ils contribuent au réchauffement de la basse atmosphère.

Personne ne conteste que les émissions de combustibles fossiles, à elles seules, ont augmenté de presque 200 % depuis 1950. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, depuis le début de la Révolution industrielle. Les océans et les végétaux absorbent une partie du dioxyde de carbone ainsi rejeté, mais les concentrations en dioxyde de carbone continuent d'augmenter. L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère réchauffe inévitablement l'atmosphère : la plu-

part des météorologues admettent que la température moyenne de la Terre a augmenté d'au moins 0,6 °C au cours des 12 dernières années ; cette augmentation résulte en grande partie de l'utilisation des combustibles fossiles.

Le réchauffement global dû à l'effet de serre évapore de l'eau des océans, des sols et des plantes. Or, toutes les précipitations puisent dans l'énorme réservoir d'humidité contenu dans l'atmosphère : tornades tropicales, pluies d'orage, tempêtes de neige... L'intensification du cycle hydrologique mondial provoque des pluies plus intenses et des chutes de pluie ou de neige dans les régions humides, ce qui accroît le risque d'inondations. Dans les dernières décennies, de nombreux endroits du monde ont déjà été touchés.

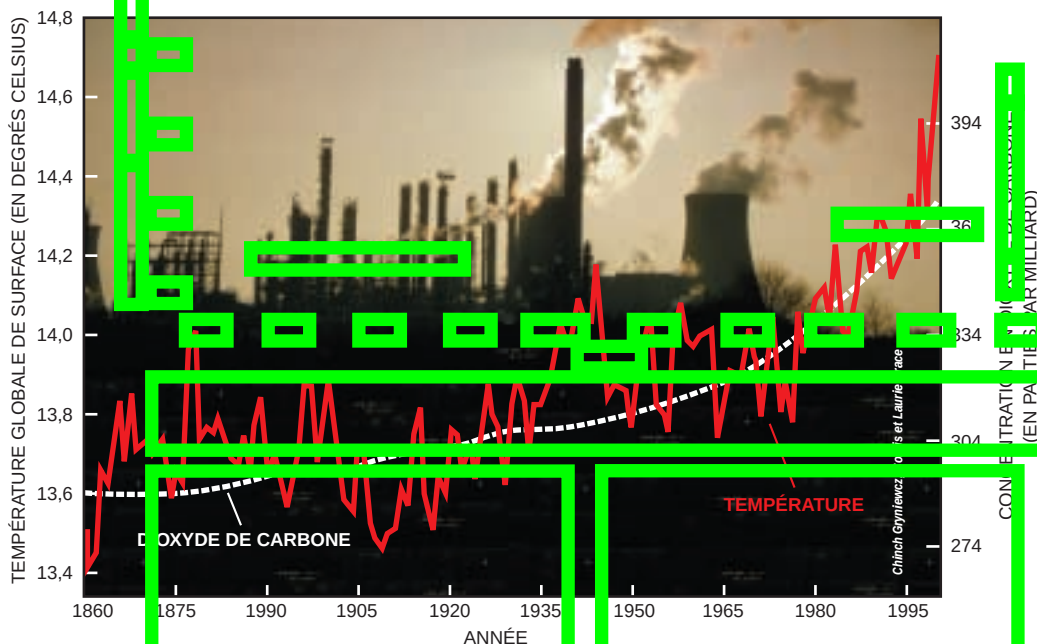
## Des problèmes de puissance

D'autres activités humaines que la combustion de combustibles fossiles perturbent le climat global. Par exemple, le défrichage des forêts et leur transformation en pâturages éliminent des arbres qui absorberaient le carbone de l'atmosphère. Le défrichage à l'effet de serre : de surcroît, les sols sont plus lessivés par les eaux qui ruissellent, ce qui augmente les risques d'inondation.

La connaissance des phénomènes qui modifient le climat global est utile, mais insuffisante. Les pays ont également besoin de savoir comment les diverses activités humaines perturbent

**1. CE PIÉTON est pris dans une tempête comme il risque de s'en produire de plus en plus souvent si le climat du Globe se réchauffe.**





**2. L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES (photographie) a augmenté la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (pointillés blancs) et a augmenté les températures du Globe depuis 140 ans (courbe rouge).**

localement le climat et quelles sont les conséquences de ces activités sur le climat mondial. Pour obtenir ces informations, les climatologues devront construire des modèles climatiques plus précis que ceux qui ont été réalisés jusqu'ici. À cette fin, ils auront besoin d'ordinateurs un million de fois plus rapides que les plus rapides d'aujourd'hui et ils devront identifier les innombrables interactions des océans, de l'atmosphère et de la biosphère, afin de savoir exactement quelles variables ils devront utiliser dans leurs simulations informatiques. Ils devront démontrer que leurs projections sont fiables. Les changements climatiques du passé et du présent, avant de se fier à eux pour prévoir l'avenir. Cette validation nécessite des mesures effectuées pendant de nombreuses années. Les simulations et les prévisions du climat n'atteindront leur maturité que si l'on enregistre régulièrement les changements, au moment où ils se produisent.

Pour les climatologues qui élaboreront des modèles climatiques, tous les phénomènes, des fluctuations des périodes glaciaires à la déforestation actuelle de l'Afrique centrale, jouent un rôle dans les simulations. Les interactions des composants climatiques – l'atmosphère, les océans, la surface des continents, la banquise, les eaux de surface, la biosphère... – évoluent selon des lois physiques décrites par des équations. Les concepteurs des programmes de simulation climatique

utilisent les ordinateurs pour appliquer des équations à des blocs de volume terrestre, l'ensemble de ces blocs couvrant l'ensemble du Globe. Comme l'atmosphère est un ensemble continu, et non un assemblage de blocs indépendants, les climatologues doivent non seulement décrire l'évolution de chaque élément de volume mais aussi calculer les interactions de ces éléments, en simulant les transports d'énergie et de masse entre eux.

Dans les principaux centres mondiaux de simulation du climat, les ordinateurs effectuent jusqu'à 50 milliards d'opérations par seconde, mais les variables à prendre en compte pour simuler l'évolution de l'atmosphère sont si nombreuses que la simulation d'un siècle nécessite des mois. On considère aussi des éléments de volume assez gros pour que leur nombre reste limité. Pour les modèles avec lesquels on prévoit l'évolution du temps, ces éléments correspondent à des volumes d'atmosphère d'environ 250 kilomètres de côté, dans la haute atmosphère, et de 100 kilomètres d'épaisseur.

Même le plus complexe des modèles de climat global ne reproduit pas la formation des nuages ou la chute de pluie : les violents orages d'été, avec leurs pluies parfois torrentielles, n'arrosent souvent que des surfaces de moins de dix kilomètres de côté, et la condensation des gouttes

locales masqueront d'autant plus un signal climatique à grande échelle que les régions prises en compte sont petites. Pour supprimer ce masquage, les climatologues doivent effectuer plusieurs simulations simulées, avec, pour chacune, des conditions initiales légèrement différentes. Les simulations climatiques qui se trouvent dans toutes les simulations constituent le signal climatique, tandis que celles qui ne sont pas reproductibles sont considérées comme des bruits de nature météorologique.

## Les interactions climatiques

Les informaticiens estiment que la vitesse des ordinateurs augmentera de bien plus d'un million de fois d'ici 2050. Avec ces ordinateurs perfectionnés, les climatologues simuleront alors plusieurs siècles par jour, avec une résolution de moins de un kilomètre dans le plan horizontal et une résolution verticale de 100 mètres, en moyenne.

Les ordinateurs n'indiqueront les changements climatiques que si les simulations

aura fournies décrivent correctement les phénomènes naturels. Par exemple, si un modèle d'atmosphère considère des températures inférieures de 4 °C aux températures réelles (ce qui n'était pas rare il y a dix ans), la simulation indiquera que l'atmosphère contient environ 20 pour cent de moins d'eau que sa capacité réelle ; l'erreur enlève

tout sens à des estimations ultérieures sur l'évaporation et les précipitations.

D'autre part, nous ne savons pas encore bien reproduire les divers phénomènes qui déterminent le climat, telles les brusques variations du cycle du carbone, les changements de libération des sols. Or ces changements provoquent des rétroactions qui, si on n'en tient pas compte, conduisent à des résultats aberrants. Ainsi une augmentation de la température modifie l'hygrométrie de l'atmosphère, ce qui amplifie la perturbation d'origine, parce que la vapeur d'eau est un puissant gaz à effet de serre.

Les climatologues commencent seulement à comprendre à quel point certaines

cent le cycle du carbone sur la planète. Par exemple, en 1991, l'éruption du mont Pinatubo, dans les Philippines, rejeta dans l'atmosphère suffisamment de cendres et de dioxyde de soufre pour refroidir temporairement le climat mondial : les composés libérés ont interagi avec les gouttelettes d'eau contenues dans l'air, empêchant certains

rayonnements solaires d'atteindre la Terre. De ce fait, l'assimilation rapide du dioxyde de carbone par les plantes a été réduite.

Les diverses utilisations du milieu naturel perturbent différemment les climats continentaux et régionaux, et l'on décrit difficilement ces perturbations dans les simulations. La déforestation, par exemple, fait apparaître des zones (claires) qui absorbent plus d'énergie solaire que les forêts et qui, de ce fait, réfléchissent plus d'énergie. Cela dissémine le climat, surtout en automne et en été. Dans les régions qui étaient initialement très boisées, ce refroidissement peut réduire l'évaporation et les précipitations.

### Mesures manquantes

Les simulations climatiques ne valent rien si l'on ne les confronte pas aux observations, afin de montrer que les modèles reflètent vraiment la réalité. Autrement dit, pour mieux connaître

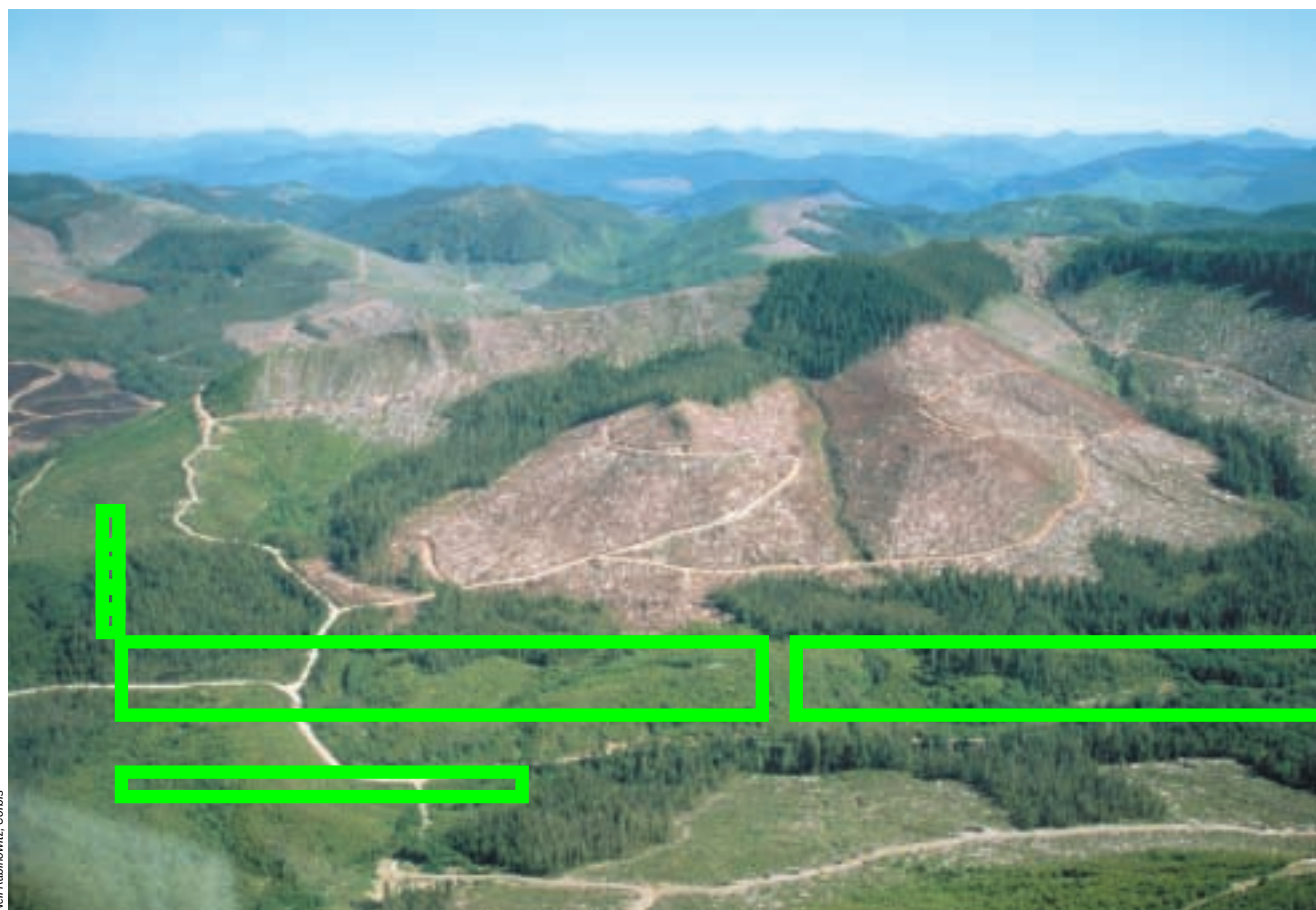
l'influence des activités humaines sur le climat du Globe, on doit savoir comment le climat a changé dans le passé. Au minimum, on doit simuler convenablement les variations du climat que l'homme a modifié la composition de l'atmosphère.

Pour comprendre le climat aux époques antérieures aux observations par les satellites météorologiques, on utilise l'air piégé dans les carottes de glace, les cernes de croissance des arbres, le corail, et les sédiments au fond des océans et des lacs.

Cependant, pour bien comprendre le climat actuel, les climatologues ont besoin de plus que ces instantanés ; ils doivent également utiliser de longs

registre de la température, de l'humidité et de la couverture nuageuse. Les mesures actuelles de la banquise, de l'étendue de la couverture neigeuse, de l'humidité du sol, du couvert végétal, et des mesures tridimensionnelles de la salinité et de la température des océans sont nécessaires, mais non suffisantes.

Or l'organisation actuelle du monde ne favorise pas l'étude des climats :



Neil Rabinowitz, Corbis

**3. LA DÉFORESTATION** perturbe le climat de plusieurs façons. D'une part, l'abattage des arbres réduit l'absorption du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Les forêts, plus sombres que les

zones dénudées, absorbent davantage le rayonnement solaire, maintenant les zones boisées plus chaudes et plus humides que les zones cultivées ou en friche.

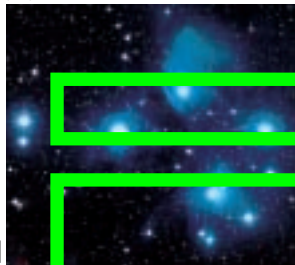
# L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

## LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



## LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F

c o d e

**POUR LA  
SCIENCE**  
ÉDITIONS BELIN

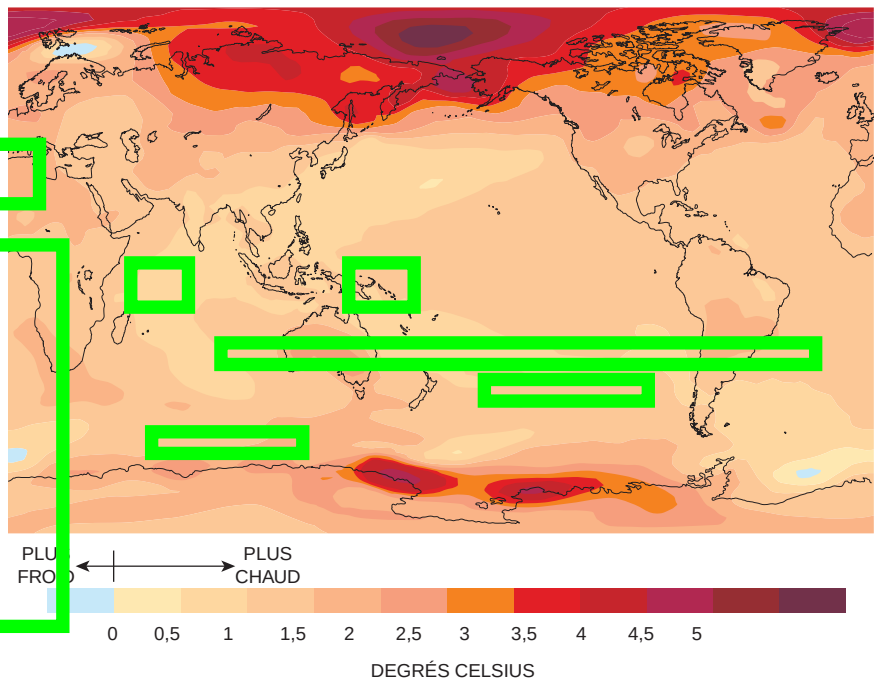
Bon de commande en p.98

aucune in...  
ressources pour assurer le contrôle du climat à long terme. Aujourd'hui les climatologues effectuent leurs interprétations du changement climatique à l'aide des mesures recueillies par un grand réseau de satellites et de détecteurs de surface qui sont équipés pour l'observation météorologique : bouées, navires océanographiques, observa-

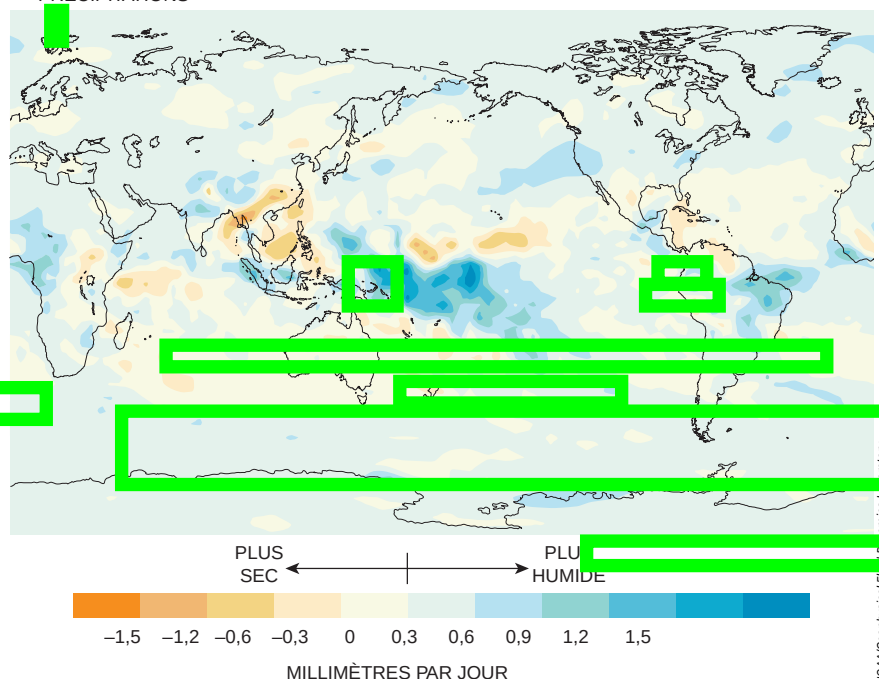
Les climats du passé sont souvent très mal connus.

Les quantités que nous mesurons aujourd'hui représentent-elles de réels changements de l'environnement, à l'échelle de quelques décennies? On ne pourra le dire que si l'on dispose d'observations continues. Que se passe-t-il quand on change les caméras

TEMPÉRATURE



PRÉCIPITATIONS



4. UN RÉCHAUFFEMENT GLOBAL atteignant cinq degrés (en haut) augmenterait les précipitations (en bas) sur l'ensemble du Globe, au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Ces simulations du climat dans la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle sont fondées sur des estimations de 1992.

NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

d'observation météorologique ou quand on les oriente différemment? La question est importante, car les satellites ne fonctionnent habituellement que quatre ans, avant d'être remplacés par d'autres satellites, qui sont placés sur des orbites différentes et sont équipés de nouveaux instruments. Au total, les signaux enregistrés représentent des données climatiques et les changements dus aux modifications méthodologiques. Si l'on ne se préoccupe pas rapidement d'évaluer les modifications des techniques d'observation, les enregistrements climatiques déjà effectués risquent de devenir inutilisables : on ne pourra comparer les nouvelles données aux anciennes.

Nous avons la responsabilité de donner aux climatologues qui nous succéderont des moyens d'évaluer leurs simulations climatiques avec des données claires, correctement archivées. Aujourd'hui, toutefois, les données que les climatologues accumulent à partir des satellites et des détecteurs répartis à la surface du Globe risquent d'être perdues. Aux États-Unis, par exemple, les observations de nombreuses stations climatologiques continuent à être enregistrées sur des bandes de papier perforé ou sont stockées sur des ordinateurs. Les données sont perdues ou illisibles par les ordinateurs modernes. La moitié des données enregistrées par les nouveaux radars Doppler est perdue, parce que le système d'enregistrement n'est pas automatique : comme on doit archiver les données manuellement, les tâches urgentes font inévitablement perdre des données.

Si de bons choix scientifiques et techniques sont faits, les travaux des 50 prochaines années diront comment les activités humaines modifient le climat terrestre et comment elles perturbent les écosystèmes. Mais l'imprudence d'attendre trop avant de lancer une étude internationale, bien coordonnée : les gaz à effet de serre subsistent si longtemps dans l'atmosphère, et les perturbations sont si

importantes, que le climat global risque de changer considérablement, même si l'humanité interrompt aujourd'hui ses activités à risque.

La fonte des glaciers dans les Andes et dans d'autres endroits du monde est un premier signe d'un réchauffement planétaire. Un réchauffement global qui atteindrait deux

degrés avant la fin du siècle prochain s'accompagnerait d'une élévation du niveau de la mer qui menacerait certaines côtes. Le changement climatique risque d'avoir des conséquences politiques et sociales. Les habitations et les équipements des régions côtières, de plus en plus peuplées, seront menacés, et l'approvisionnement en eau potable deviendra localement difficile. Les États devraient prendre des mesures pour éviter les catastrophes, de ce double point de vue, mais ils restent gênés par les incertitudes ; tant qu'on ignorera l'impact de l'homme sur le climat, les lois sur l'émission de gaz à effet de serre, sur la consommation de combustibles fossiles ou sur le déboisement seront difficiles à rédiger. Les études du climat global favoriseront la planification des équipements : par exemple, elles révéleront comment les barrages et les réservoirs peuvent être conçus pour s'adapter aux inondations prévues ou à des pénuries d'eau.

Le climat change ; il changera encore certainement, peut-être beaucoup. Les États peuvent agir pour ralentir ce changement et préparer judicieusement les réactions aux effets inévitables du changement. Aujourd'hui, toutefois, ils ne font ni l'un ni l'autre.

Si nous voulons vraiment connaître les changements climatiques et les effets de l'activité humaine aux alentours de 2050 et si nous voulons activement traiter le problème des perturbations écologiques, nous devons agir autrement qu'aujourd'hui. La Convention cadre de l'Organisation des Nations unies sur le changement climatique lie 179 gouvernements, engagés à remédier aux influences préjudiciables de l'homme sur le climat global. Le protocole de Tokyo, en 1997, a permis des progrès dans la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre, mais les observations climatiques globales à long terme et les systèmes de contrôle climatique manquent. Il faut poursuivre le travail.

Thomas KARL dirige le Centre des données climatiques de Denver depuis 1998.

Kevin TRENBERTH dirige la Section d'analyse du climat du Centre de recherches atmosphériques de Boulder.

Kerin E. TRENBERTH, *Global Warming: It's Happening*, in *naturalSCIENCE*, vol. 1, article 9, 1997.



# Le vieillissement est-il inéluctable?

MICHAEL ROSE

*On regardera peut-être le vieillissement, mais pas à l'aide d'un élixir de jeunesse. Plusieurs traitements antivieillessement devraient inhiber divers mécanismes biochimiques délétères.*

**D**e nombreuses cultures ont voulu retarder le vieillissement. Aujourd'hui, les régimes macrobiotiques, les pratiques hindoues remises au goût du jour, les hormonothérapies parallèles et quelques autres remèdes miracle promettent une jeunesse qu'ils ne peuvent restituer.

Les médecins ont trouvé des traitements contre les maladies dont la fréquence augmente avec l'âge, tels le cancer ou les maladies cardiovasculaires, et, au cours des 120 dernières années, les progrès de l'hygiène et la découverte des antibiotiques ont augmenté l'espérance de vie dans les pays industrialisés. Pourtant, aucune substance n'a été trouvée qui ralentisse les mécanismes innés du vieillissement et du déclin des fonctions physiologiques. Quand on parvient à guérir une maladie du grand âge, une autre survient peu de temps après. Les personnes de plus de 80 ans présentent souvent un handicap, même si, parfois, les médias font leur une d'un marathonien de 90 ans.

Toutefois, rien ne dit qu'on ne parviendra pas à retarder le vieillissement. Depuis 1940, de nombreux biologistes ont obtenu de bons résultats chez l'animal, même si les méthodes ne sont pas applicables à l'homme.

La recherche sur le vieillissement ressemble à celle de la physique atomique à la fin des années 1920 : les physiciens venaient de découvrir le monde, mais on ignorait comment exploiter ces forces. La recherche sur le vieillissement a récemment progressé, mais les progrès suffiront-ils à repousser nos années d'infirmité?

Pas encore. Les biologistes doivent d'abord mieux comprendre les mécanismes physiologiques de la sénescence. À mon avis, ces mécanismes seront élucidés, car nous avons répondu à une question essentielle : pourquoi le vieillissement est-il apparu ? Les études ont simultanément révélé les voies biochimiques susceptibles d'être modifiées pour prolonger les années de vie en bonne santé.

Le vieillissement est présent dans tous les types cellulaires. Si une imperfection de toutes les cellules leur imposait de mourir, la vie ne pourrait pas n'échapperait au vieillissement. Pour certains organismes ne vieillissent pas : les anémones de mer asexuées vivent parfaitement en aquarium pendant des dizaines d'années.

## Un ralentissement de la sélection naturelle

Le vieillissement ne résulte pas non plus d'un programme génétique, forgé par l'évolution pour éliminer la population. La sénescence est plutôt la conséquence indirecte d'un processus de sélection naturelle qui touche l'homme et les autres vertébrés, mais pas les invertébrés.

Pour les invertébrés, le vieillissement, les espèces à reproduction sexuée vieillissent parce que la pression de la sélection naturelle diminue dès le début de l'âge adulte.

Ce phénomène s'explique par la théorie de l'évolution. Les caractères

**1. LE VIEILLISSEMENT, aujourd'hui inévitable, pourrait être retardé.**



Jerry Gay, Tony Stone Images

héréditaires persistent et se répandent dans une population (ils sont «sélectionnés») quand ils permettent aux individus qui les possèdent d'atteindre l'âge de la reproduction et d'avoir une descendance. Les caractères les plus avantageux permettent aux individus qui les portent d'avoir plus de descendants que les autres, de sorte que les gènes qui confèrent ces avantages se répandent

dans la population au fil des générations. Inversement, les gènes qui provoquent une forte mortalité infantile se raréfient, car ceux qui les portent meurent avant de procréer. Contrairement aux gènes délétères qui agissent précocement, ceux qui sont responsables des maladies du grand âge s'accumulent dans la population,

car les porteurs de ces gènes les transmettent à leurs enfants avant que leurs effets délétères ne les empêchent de se reproduire (plus le handicap conféré par un gène est tardif, plus ce gène se répand, car les porteurs peuvent se reproduire plus longtemps). Ainsi, le vieillissement est une conséquence de la sélection naturelle.

Ce phénomène explique la répartition de

deux maladies génétiques graves : la progeria et la maladie de Huntington. La progeria, due à une mutation aléatoire sur une des deux copies d'un gène de l'embryon, est une maladie grave de l'enfant. Nanisme, maigreur et dégénérescence de plusieurs organes confèrent aux enfants atteints une apparence de vieillard. Ils meurent généralement de maladie car-

diovasculaire quand ils sont âgés d'une quinzaine d'années. La maladie de Huntington, également due à une anomalie génétique, se manifeste à l'âge adulte : le système nerveux dégénère, entraînant la mort.

Pourquoi la progeria est-elle rare, tandis que la maladie de Huntington est assez fréquente? Parce que les personnes atteintes de progeria meurent avant d'avoir eu des enfants.

sélection naturelle élimine du patrimoine génétique la mutation responsable de la progeria, dès qu'elle survient. Au contraire, la mutation de la maladie de Huntington ne perturbe pas la reproduction, car elle ne se manifeste généralement pas avant que les personnes porteuses de l'anomalie génétique aient eu leurs enfants.



Elle se manifeste à un moment de la vie où la pression de la sélection naturelle est faible.

Dans les années 1940 et 1950, à l'Université de Londres, John Haldane et Peter Medawar (prix Nobel de médecine en 1960) furent les premiers à proposer cette explication du vieillissement. Puis, dans les années 1960 et 1970, les biologistes anglais W. Hamilton et B. Charlesworth formalisèrent l'idée.

W. Hamilton et B. Charlesworth ont notamment démontré que, chez les organismes qui ne se reproduisent pas par simple division, l'impact de la sélection naturelle sur la survie diminue à l'âge adulte et disparaît complètement en fin de vie. Commela sélection naturelle agit sur l'organisme de toutes les adaptations et, par conséquent, de la santé, la vigueur des organismes âgés diminue à mesure que la sélection naturelle s'affaiblit. En l'absence de sélection naturelle durant la vieillesse, la survie est à ce point menacée qu'aucun traitement ne sera peut-être capable de maintenir en vie les personnes âgées.

Depuis les années 1970, plusieurs tests expérimentaux ont confirmé les premiers modèles mathématiques : on a prolongé la période de sélection naturelle intense et observé l'état de santé des animaux. En pratique, les biologistes ont retardé l'âge du début de la sénescence en éliminant tous les œufs fécondés produits par les animaux jeunes et en ne conservant que les œufs fécondés à un âge plus avancé. Ainsi, seuls les individus assez robustes pour se reproduire tard transmettent leurs gènes à la génération suivante.

Si le vieillissement est réellement dû à une diminution de la pression de sélection naturelle après le début de la reproduction, on devrait le différer en maintenant la pression de sélection sur plusieurs générations de la souche expérimentale.

Effectivement, on l'a vérifié chez des drosophiles, où l'on a retardé le vieillissement sur plus de dix générations. Les souches de drosophiles obtenues au terme de ces expériences vivent deux à trois fois plus longtemps que la normale

et restent plus longtemps en bonne santé.

Les souches de drosophiles à louches au vieillissement retardé sont étonnamment vives. Non seulement leurs fonctions biologiques restent normales pendant longtemps, mais elles présentent aussi de meilleures capacités à l'âge adulte. Les jeunes et les adultes résistent mieux des stress normalement mortels, tels que la déshydratation ou le jeûne. Elles sont plus fortes que les drosophiles non sélectionnées du même âge : elles marchent ou volent plus longtemps.

De telles expériences sont impossibles avec des espèces à longévité humaine et les seraient barbares, mais, de surcroît, on n'obtiendrait de résultats qu'après plusieurs dizaines de générations plus tard. Pour retarder le vieillissement humain, les biologistes doivent trouver d'autres méthodes, qui reproduisent les modifications physiologiques provoquées par des générations de naissance.

## Des indices biochimiques

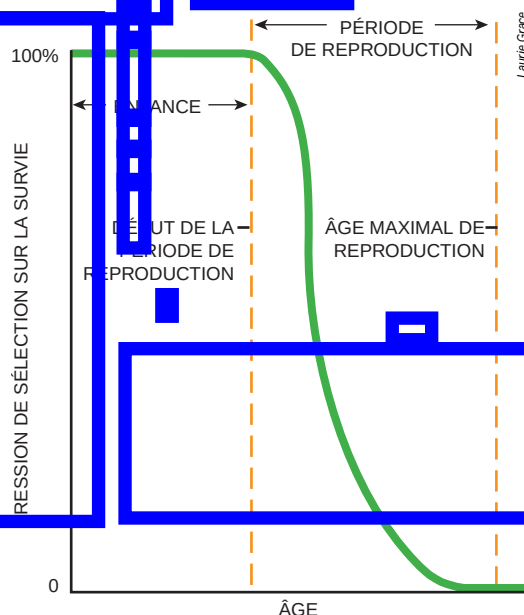
La théorie de l'évolution et quelques expériences préliminaires ont montré que des centaines de voies biochimiques (des cascades d'interactions moléculaires) déterminées génétiquement imposent la longévité. Toutefois,

on n'a découvert que quelques gènes du vieillissement, principalement chez le ver nématode *Caenorhabditis elegans* et chez la mouche *Drosophila melanogaster*. Les biologistes ignorent encore s'ils pourront appliquer à l'homme les résultats obtenus sur ces deux espèces.

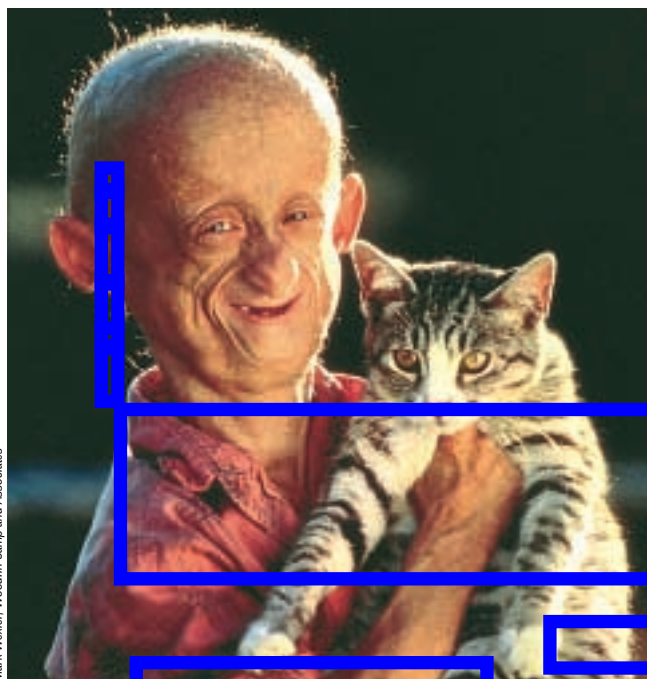
Quelques études ont également été réalisées chez l'homme. En France, la Fondation IPSEN a mené la première étude épidémiologique rigoureuse consacrée aux centenaires. Elle a été réalisée en 1990 et a porté sur 800 centenaires dont l'âge a été validé. Cette enquête a identifié deux gènes qui seraient impliqués dans la longévité. L'un de ces gènes code une des trois formes d'apolipoprotéine E, une protéine qui intervient dans le transport du cholestérol ; l'autre code l'enzyme de conversion de l'angiotensine, qui intervient dans la régulation de la pression artérielle. Des allèles particuliers de ces gènes, encore rares, sont plus fréquents chez les centenaires que dans la moyenne de la population adulte.

Cependant, ces découvertes ne conduisent à aucun traitement anti-vieillesse. On ignore comment les allèles plus fréquents chez les centenaires luttent contre le vieillissement. De surcroît, même si ces allèles, ou ceux que l'on a découverts chez le ver et la drosophile, étaient bien impliqués dans le vieillissement chez l'homme âgé, cette découverte ne serait qu'une toute première étape vers le report de la sénescence. Le vieillissement repose sur de multiples facteurs, de sorte que, pour le retarder, on devra certainement agir sur de nombreuses voies biochimiques.

Pour découvrir les allèles qui participent au vieillissement chez l'homme, on pourrait comparer le patrimoine génétique d'animaux dont la durée de vie est dans la norme et celui d'animaux qui vivent très longtemps. L'expérience expérimentale qui nous a permis de tester l'influence de la pression de sélection sur le vieillissement est applicable à la recherche des gènes qui déterminent la durée de vie. Ainsi, les drosophiles dont la longévité est prolongée grâce à une reproduction retardée possèdent un mélange



**2. L'ÉVOLUTION explique le vieillissement. Les calculs montrent que l'impact de la pression de sélection naturelle sur la survie des organismes à reproduction sexuée diminue notablement après l'âge de reproduction. Le vieillissement se manifeste, car les gènes qui ont des effets délétères au cours de la vieillesse sont peu (ou pas) soumis à la sélection naturelle, de sorte qu'ils persistent dans le patrimoine génétique.**



**3. LA RÉPARTITION DIFFÉRENTE de deux maladies génétiques s'explique par la sélection naturelle. La personne de gauche est atteinte de progeria, une maladie qui provoque une dégénérescence corporelle pendant l'enfance : elle paraît très âgée, mais ce n'est qu'un enfant. À droite, cet homme est atteint de la maladie de Huntington, une maladie neurodégénérative qui survient généralement vers la cinquantaine. La progeria est rare car la sélection**

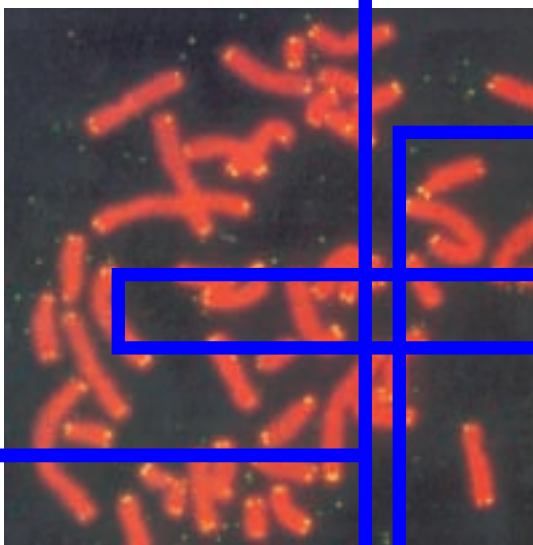
**naturelle, forte pendant l'enfance, élimine les gènes responsables de la maladie : les enfants atteints de progeria ne se reproduisent pas et ne transmettent donc pas le gène aux générations ultérieures. La maladie de Huntington est plus fréquente, car la sélection naturelle a peu d'effet sur elle. Lorsque les premiers symptômes surviennent, les malades ont déjà transmis leurs gènes délétères à la moitié de leurs enfants.**

## Pas de solution simple

**H**omo sapiens vit déjà plus longtemps que bien des espèces (les arbres exceptés). Pourtant, nombre d'entre nous souhaiteraient vivre encore plus longtemps, surtout si nous étions assurés d'être en bonne santé. Ce désir, qui aveugle parfois, fait l'affaire des charlatans.

Plusieurs traitements possibles ont été récemment évoqués : l'activité physique, les régimes alimentaires, l'administration de substances telles que l'hormone de croissance, la télomérase (une enzyme) ou les anti-oxydants. L'activité physique améliore le fonctionnement de l'organisme, à condition qu'elle soit pratiquée régulièrement, mais personne n'a démontré qu'elle augmente la longévité. De surcroît, ses effets bénéfiques ne persistent pas après l'arrêt de cette activité. La restriction alimentaire est efficace chez les rongeurs, mais son effet chez l'homme n'est pas connu, et elle ne serait guère applicable. Par ailleurs, toute modification arbitraire des concentrations hormonales serait délétère.

Les médias ont récemment prétendu que la télomérase pourrait retarder la sénescence des cellules humaines *in vitro*. Cette enzyme agit sur les télomères, les extrémités des chromosomes. Les télomères raccourcissent un peu à chaque division cellulaire, et, quand ils sont devenus trop courts, les cellules cessent de se



**Les télomères, présents à chaque extrémité des chromosomes, ont été marqués par une substance fluorescente (en jaune).**

diviser. Selon certains biologistes, des substances qui préservent les télomères devraient permettre aux cellules de continuer à se reproduire et de rester éternellement saines ; une telle action cellulaire aurait des répercussions sur l'organisme entier et en retarderait le vieillissement. Toutefois, personne n'a encore réussi à prolonger la vie d'un organisme en agissant sur les télomères de ses cellules. De plus, toute chose qui contribue à immortaliser les cellules augmente les risques de cancer.

D'après les recherches faites sur les drosophiles ou sur d'autres organismes, les radicaux libres (des molécules très réactives) semblent intervenir dans les mécanismes du vieillissement. Ainsi, les drosophiles dotées d'un variant génétique qui produit une forme particulièrement active de l'enzyme

superoxyde dismutase – une enzyme qui élimine les radicaux libres destructeurs – vivent plus longtemps que la moyenne. Si les réactions d'oxydation participent au vieillissement humain, on pourrait retarder la sénescence en bloquant la production de radicaux libres ou en les éliminant. Malgré ce que l'on entend parfois, personne ne sait encore retarder le vieillissement en toute sécurité chez l'homme, et aucune étude n'a même évalué les bénéfices que l'on pourrait attendre de telles tentatives.

## De la mouche à l'homme

Les expériences de Michael Rose sur les drosophiles sont fascinantes. Après avoir sélectionné sur plusieurs générations des mouches conçues tardivement, il obtient des insectes dont la longévité est accrue. Les durées de vie des drosophiles sélectionnées sont comprises entre 120 et 180 jours (même si certaines meurent bien avant, voire à la naissance), tandis que chez les mouches non sélectionnées, la durée de vie ne dépasse pas 60 jours. Plus de la moitié des insectes mâles sélectionnés ont des durées de vie supérieures à la durée de vie maximale des mâles non sélectionnés. Ainsi, la sélection des mouches conçues tardivement a changé l'espérance de vie du groupe, mais aussi l'intervalle des valeurs prises par les durées de vie des individus.

Comment distingue-t-on cet intervalle et l'espérance de vie du groupe? L'intervalle des valeurs prises par les durées de vie des individus, concept de biologiste, correspond à l'ensemble des durées de vie possibles pour une espèce. Chez les drosophiles, quelques-unes meurent à la naissance, quelques-unes à un jour, etc. ; la plupart meurt vers 40 jours et les plus âgées (peu nombreuses) atteignent 60 jours. Au contraire, l'espérance de vie, concept de démographe, est un chiffre prévisionnel, une estimation de la durée de vie moyenne à la naissance, ou du nombre d'années qui restent à vivre à un âge donné. La distinction entre ces deux concepts est essentielle si l'on veut appliquer à l'homme les conclusions d'expériences faites sur les animaux.

Si, pour les animaux, on peut assimiler la longévité à l'un et l'autre de ces concepts, il n'en va pas de même pour l'espèce humaine, car, en améliorant sans cesse son environnement, l'homme a augmenté la durée de vie effective.

Comment évaluer le potentiel biologique de survie de chacun? La question est complexe. Chez l'homme, l'augmentation de l'espérance de vie des personnes âgées a été considérable au cours du XX<sup>e</sup> siècle : depuis 1900, l'espérance de vie à 65 ans a augmenté relativement plus que l'espérance de vie à la naissance, dans les pays industrialisés. Cependant, on ignore de combien l'intervalle des valeurs prises par les durées de vie des individus a été étendu.

Si l'on considère l'ensemble des individus qui ont vécu au cours du XX<sup>e</sup> siècle, on peut dire que l'espérance de vie des personnes âgées a été considérable au cours du XX<sup>e</sup> siècle : depuis 1900, l'espérance de vie à 65 ans a augmenté relativement plus que l'espérance de vie à la naissance, dans les pays industrialisés. Cependant, on ignore de combien l'intervalle des valeurs prises par les durées de vie des individus a été étendu.

Selon Buffon, en tout temps et en tout lieu, l'homme en bonne santé a vécu 90, voire 100 ans. Pourtant deux faits remettent en cause cette assertion : l'âge réel des prétendus centenaires vivant avant 1800 a été mis en doute et, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, l'augmentation avérée de leur nombre. Toutefois, cette augmentation ne prouve pas que l'homme a modifié son potentiel biologique de longévité.

En fait, deux questions fondamentales restent ouvertes : existe-t-il une limite intrinsèque à la durée de la vie de l'homme? Cette limite évolue-t-elle au cours du temps? Notre potentiel de longévité est peut-être bien supérieur à celui qu'a imaginé Buffon, ce qui signifie que notre espérance de vie atteindra des valeurs inattendues,

sans que nous soyons biologiquement différents. Aujourd'hui, le gain d'espérance de vie se fait surtout en fin de vie.

Le taux de vieillissement est une autre façon d'estimer l'évolution de la longévité ; il est souvent défini par les biologistes, d'après la loi de Gompertz, comme le temps qu'il faut à un taux de mortalité pour doubler avec l'augmentation de l'âge après la maturité (après 30 ans chez l'homme). Ce taux de vieillissement varie selon les espèces. Cette conception relative de la vitesse de vieillissement, néglige les valeurs absolues du taux de mortalité qui intéressent davantage les démographes. Ainsi, avec un doublement tous les huit ans chez l'homme, la situation est la même que celle où le doublement du taux de mortalité est égal à 2,5 pour cent par an (comme c'était le cas avant la transition démographique, au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle) ou à 0,5 pour cent par an (comme c'est le cas aujourd'hui) : dans le premier cas, le taux est de 3,75 pour cent à 30 ans, de 5 pour cent à 38 ans, de 10 pour cent à 46 ans, etc. À 62 ans, après quatre doublements, la mortalité sera de 40 pour cent dans le premier cas et de 20 pour cent dans le second (cas actuel).

Dans le premier cas, celui des situations démographiques antérieures à la transition démographique, quasiment tous les individus mouraient avant 80 ans. Dans le deuxième cas, les personnes qui vivent plus de 80 ans sont nombreuses et une partie d'entre elles devient centenaire. Et pourtant le taux de vieillissement, exprimé en pourcentage par an, est resté le même!

Aujourd'hui, un réseau international de recherche, appelé ARLES, en l'honneur de Jeanne Calment, décédée à 122 ans, en 1997, regroupe démographes, biologistes et gérontologues, qui étudient la longévité humaine en combinant les approches des trois disciplines. La Fondation IPSSEN et l'Université de Montpellier font partie de ce réseau.

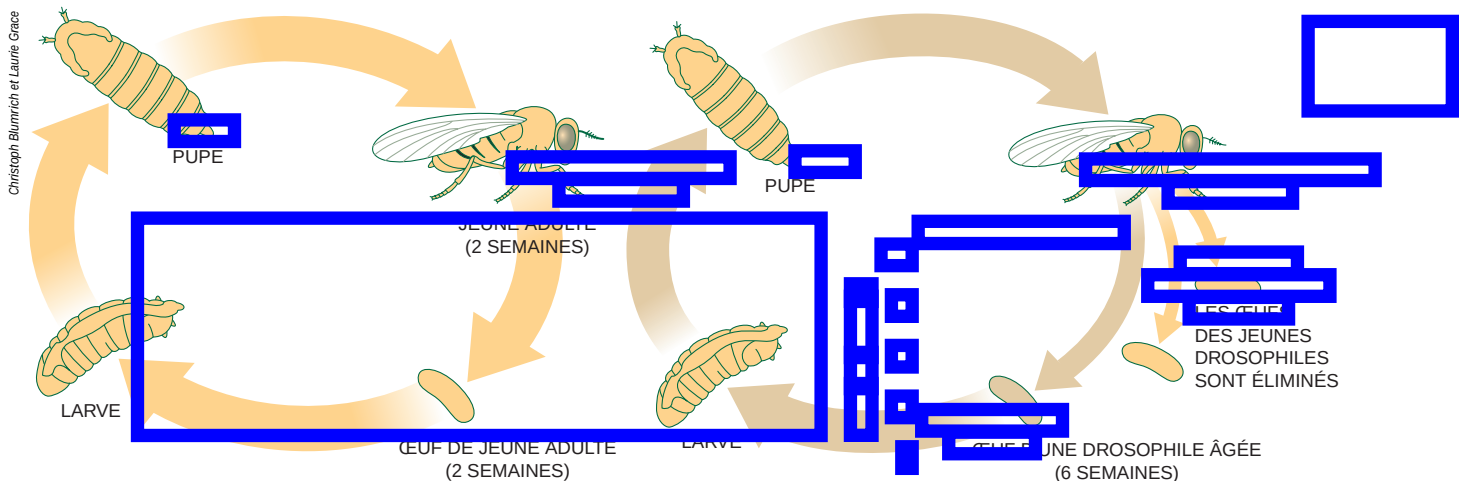
Les calculs d'espérance de vie en bonne santé fonctionnelle, c'est-à-dire sans incapacité, régulièrement effectués dans les pays à faible mortalité, montrent que l'espérance de vie sans incapacité grave augmente autant – si ce n'est plus – que l'espérance de vie totale. Là encore, le rôle de l'alimentation, de l'hygiène, de la sécurité alimentaire, la qualité de l'eau de boisson, la diminution des travaux pénibles, ainsi que les progrès de la médecine jouent un rôle important.

La connaissance de la biologie du vieillissement, l'information des personnes âgées – et de la médecine préventive ont amélioré la qualité de vie des personnes âgées. L'étude des centenaires français montre que la partie d'entre eux ont encore des capacités fonctionnelles correctes : chez l'homme, âge et handicap sont de moins en moins liés.

Jean-Marie ROBINE, Équipe Démographie et santé, INSERM UNV40520, Montpellier – Michel ALLARD Fondation IPSSEN, Paris

## REPRODUCTION STANDARD DES DROSOPHILES

## CONDITIONS DE REPRODUCTION RETARDÉE



4. DES EXPÉRIENCES SUR LA DROSOPHILE confirment que le vieillissement est dû à l'affaiblissement de la pression de la sélection naturelle, à l'âge adulte. Le groupe témoin (à gauche) s'est reproduit dès la maturité sexuelle, de sorte que la période de sélection naturelle intense a été courte. Simultanément, la reproduction a été retardée au sein d'un autre groupe (à droite), ce qui a prolongé la période de la sélection naturelle. Après plusieurs générations, cette manipulation a retardé le vieillissement chez les individus du second groupe et prolongé leur durée de vie (voir les graphes).

d'allèles différent de celui des drosophiles ordinaires. Ces allèles n'ont pas été sélectionnés à l'avance, ni transmis aux mouches qui vivent longtemps ; mais, en réaction à une reproduction tardive, des organismes dont la longévité est supérieure à la normale ont été sélectionnés.

L'identification des allèles propres aux animaux qui vivent très longtemps sera la base de nouvelles expériences : on cherchera à renforcer ou à inhiber les effets des allèles avantageux, et inhiberont les effets des allèles délétères. De tels traitements seront bien sûr testés sur l'animal avant de l'être sur l'homme.

### Technique et rythme des progrès

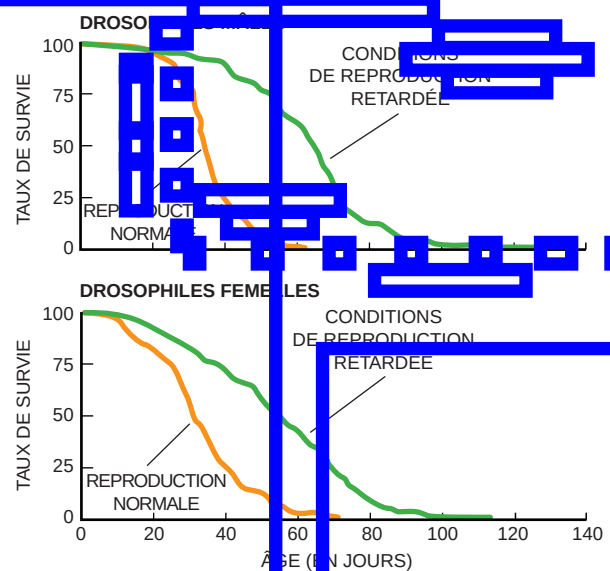
Les études de la sénescence, même avec des animaux, seront difficiles. On devra d'abord identifier les centaines, voire les milliers d'allèles les plus fréquents, puis on devra chercher les fonctions biologiques des protéines codées par ces allèles. Les techniques nécessaires à la réalisation de ces études sont du domaine de la « génomique fonctionnelle », qui se développe aujourd'hui. Si les progrès sont suffisamment rapides, la médecine retardera le vieillissement, à partir de

2050 environ. Que se passera-t-il lorsque la biologie et la médecine auront réussi à retarder le vieillissement humain ? Nous aspirons à le retarder. Cet objectif est tout en nuances, et l'on ne saura pas à quel moment.

La durée de la vie augmentera, et les capacités des personnes âgées s'amélioreront progressivement. À mon avis, la vieillesse sera repoussée sans limites si l'on réussit à activer les gènes anti-âge chez les jeunes ou à préparer des cocktails de médicaments agissant comme une thérapie génique.

L'entreprise où nous sommes engagés pose des questions politiques et éthiques. Comment fonctionnera la Sécurité sociale ? À quel âge devra-t-on fixer l'âge de la retraite ? Com-

d'héritage ? La Terre sera-t-elle menacée par la surpopulation ? Est-il moral que les personnes âgées se cramponnent à la vie ? Aujourd'hui, retarder le vieillissement humain ne représente en aucune façon une menace. Toutefois, d'ici 2050, les enjeux politiques et sociaux devront être précisés.



Michael ROSE est professeur de biologie de l'évolution à l'Université d'Irvin.

Michael R. ROSE, *Evolutionary Biology of Aging*, Oxford University Press, 1991. 100 tableaux pour 100 ans, Fondation IPSEN Paris, 1991.

M. R. ROSE et Theodore J. NUSBAUM, *Prospects for Postponing Human Aging*, in *FASB Journal*, vol. 8, n° 12, pp. 925-928, septembre 1994.

Michael R. ROSE et Laurence D. MUELLER, *Evolution of Human Lifespan: Past, Future and Present*, in *American Journal of Human Biology*, vol. 10, n° 4, pp. 409-420, 1998.

J.M. ROBINE et M. ALLARD, *The Oldest Human*, in *Science* n° 279, pp. 1834-1835, 1998.

J.M. ROBINE, I. ROMIEU et E. CAMBOIS, *Health Expectancy Indicators*, in *Bulletin of the World Health Organization* 77(2), pp. 181-185, 1999.



# Le cerveau et l'esprit

ANTONIN DAMASIO

*D'où vient la conscience ? Une meilleure connaissance du fonctionnement du cerveau apporte des éléments de réponse à cette question qui préoccupe depuis longtemps philosophes et scientifiques.*

La principale question des sciences de la vie est : comment ce que nous nommons l'esprit se forme-t-il dans le cerveau ? Le problème posé depuis des siècles est toujours d'actualité. Depuis que l'on n'est plus brûlé vif quand on le pose, il est intensément débattu. Récemment, les spécialistes des neurosciences et des sciences cognitives, les philosophes et tous ceux qui s'interrogent sur les origines de l'esprit se sont intéressés aux sources de la conscience.

Le débat est renouvelé par les progrès de la biologie et, notamment, ceux des neurosciences. Ces dernières ont permis de nombreux mystères de la vie. On a peut-être plus appris sur le cerveau et sur l'esprit au cours des années 1990 – la « décennie du cerveau » – qu'au cours de toute l'histoire de la psychologie et des neurosciences. Une des dernières questions à résoudre est celle des bases neurobiologiques de la conscience.

Comment étudier la nature de la conscience ? Pour certains, la question de l'étude du cerveau par lui-même serait insoluble, par principe. Pour d'autres, l'amélioration incessante de nos connaissances fait espérer que la science réussira à élucider la conscience, à condition que les théories soient pertinentes et les techniques suffisamment performantes. Le débat est étonnant, inattendu même, car personne n'avait douté que l'on puisse étudier le fonctionnement du cerveau.

La vision ou de la mémoire, qui sont pourtant deux éléments importants de l'esprit conscient.

Je suis résolument dans le camp des optimistes, même si je mesure parfaitement les difficultés qui restent à surmonter : nous trouverons – et peut-être très vite – une explication de la genèse de l'esprit par le cerveau.

Rien n'est plus familier que l'esprit. Pourtant, le voyageur qui part rechercher les fondements et les mécanismes biologiques de la conscience découvre un paysage étrange, et il est rapidement confronté à diverses questions ardues, que nous examinerons ici.

La première difficulté est celle, déjà évoquée, de l'observation du cerveau par lui-même : si nous pouvons observer le corps ou le cerveau d'autrui, nous ne pouvons voir son esprit. Seule l'auto-observation procure des informations sur l'esprit. Cette constatation a des conséquences importantes. Si nous observons d'autres personnes observer un même objet ou un même cerveau, elles peuvent confronter les observations ; en revanche, la confrontation n'est plus possible dans le cas de l'esprit. Le corps et le cerveau sont des objets publics, accessibles au regard, externalisés et objectifs. L'esprit est privé, masqué, interne et subjectif.

Quelles sont alors les relations entre un corps objectivable et un esprit internalisé ? Pour étudier le cerveau, on utilise des techniques d'imagerie perfectionnées et l'on mesure l'activité des neurones cérébraux. Selon les sceptiques, l'analyse exhaustive de toutes les données établit des corrélations entre les états mentaux, mais ne disent rien des états mentaux étudiés. L'observation détaillée de la matière vivante ne permet pas d'accéder à des mécanismes de la matière.

C'est pourquoi, pour beaucoup, cette matière engendre l'idée de soi, qui est la marque de la conscience (l'idée que les images de mon esprit sont miennes). Je considère que cet argument est fallacieux, mais il fait douter les neurobiologistes de la conscience les plus optimistes.

Les sceptiques ont un autre argument, que je réfute également : selon

eux, on ne peut même pas comprendre pourquoi l'esprit se préoccupe de représenter les objets. Les philosophes utilisent le terme d'« intentionnalité » pour faire référence à cette qualité représentationnelle de l'esprit.

Enfin, ils soulignent que la question de l'émergence de la conscience ne peut être posée que parce que la conscience existe. On est contraint de faire des recherches avec un instrument qui est lui-même en cours d'exploration. Cette situation rend particulièrement difficile la définition du problème et la démarche expérimentale. Ils soulignent qu'il y a nécessairement conflit entre l'observateur observé et l'observé observateur, et que l'itération de ce problème empêche de comprendre comment naît la conscience. Ce conflit existe, mais je soutiens qu'il n'est pas insurmontable.

En résumé, la difficulté du problème rattrape les biologistes qui veulent trouver la solution et, d'autre part, conforte dans leurs convictions, ceux qui pensent que la solution est inaccessible.

## Les difficultés

Pour les sceptiques, les données actuelles sur le fonctionnement du cerveau vivant sont tellement incomplètes qu'elles suffisent à postuler que nous pourrions jamais découvrir la « substance de l'esprit ». Ils prétendent que nous ne pourrions jamais découvrir le cerveau et que nous n'avons pas « trouvé » l'esprit au cours de ces recherches. Je refuse cette idée.

**1. DES FILMS naissent en permanence dans notre cerveau, soumis aux événements sensoriels internes et externes. Quand le cerveau s'interroge sur l'identité de l'observateur de ce film, le sens du soi apparaît.**



Aujourd'hui, la description des phénomènes neurobiologiques est toujours incomplète : nous n'avons pas élucidé tous les détails moléculaires du fonctionnement des neurones et de leurs connexions ; nous ne comprenons pas encore le comportement des groupes de neurones d'une région donnée du cerveau ; nous ne connaissons pas les systèmes auxquels participent les différentes régions cérébrales. Nous commençons tout juste à comprendre que les interactions de régions cérébrales non contiguës aboutissent à des états biologiques notablement plus élaborés que celui qui correspondrait à la simple somme des constituants.

Nous n'avons pas encore élucidé tous les mécanismes biologiques, ni les phénomènes physiques qui sont sous-jacents à la biologie, de sorte que nous ne pouvons déclarer que le problème de la recherche de la conscience et de l'esprit est insoluble. Nous n'avons fait une étude exhaustive du cerveau ni sur le plan neurobiologique ni sur le plan physique. Ainsi, la description la plus fine de l'esprit, par exemple lors de l'élaboration rapide d'images sensorielles, de leur modification ou de leur superposition, nécessitera peut-être un traitement quantique. À l'Université d'Oxford, le mathématicien Roger Penrose a proposé que la conscience repose sur des phénomènes quantiques qui se produisent dans certains éléments des neurones, les microtubules. Toutefois, même si j'évoque la possibilité que des phénomènes quantiques se produisent, je n'adhère pas nécessairement à la théorie de R. Penrose. Une description quantique des opérations aiderait peut-être à expliquer d'où vient l'esprit, mais elle ne me paraît pas indispensable pour comprendre comment nous savons que nous sommes dotés d'un esprit, c'est-à-dire d'une conscience.

La question de l'esprit et de la conscience reflète surtout notre ignorance, qui limite notre imagination, et qui tend à faire paraître le problème insoluble impossible. La « technique » cérébrale est si complexe qu'elle semble « magique » ou, du moins, inaccessible à la connaissance. Le gouffre apparent entre états mentaux et phénomènes biologiques reflète sans doute celui qui sépare, d'une part, la compréhension de l'esprit à laquelle nous sommes parvenus après des siècles

d'introspection et, d'autre part, la recherche en sciences cognitives, et, d'autre part, le décryptage incomplet de l'activité neuronale par les neurosciences. Néanmoins, le fossé sera peut-être comblé par la neurobiologie. Rien n'indique que nous soyons à l'approche d'une solution de la question qui séparerait le mental et le neuronal.

C'est pourquoi je soutiens que les mécanismes biologiques qui semblent aujourd'hui correspondre aux mécanismes de l'esprit sont effectivement les mécanismes de l'esprit. Je ne nie pas l'existence de l'esprit, et je ne dis pas que l'esprit aura disparu quand on

l'aura élucidé tous les mystères biologiques. Je crois simplement que l'esprit précieux et unique, est biologique, et qu'il sera un jour décrit en termes biologiques.

Qu'en penser de l'objection selon laquelle l'esprit humain ne pourrait être décrit en termes biologiques ? Notons d'abord que le cerveau et l'esprit ne sont pas d'un seul bloc : ils sont constitués de plusieurs niveaux structurels, et le plus élevé crée des instruments qui autorisent l'observation des autres. Ainsi, le langage confère à l'esprit le pouvoir de se décrire lui-même. Les observations, selon des principes logiques, sont vraies ou fausses. Même si nous devons nous en rendre compte, nous ignorons si nous parviendrons un jour à élucider totalement notre nature, nous nous devons d'essayer, au risque de contredire Aristote pour qui l'homme est infiniment curieux de sa propre nature.

## Les raisons d'espérer

Pour résoudre l'énigme de l'esprit conscient, je propose de diviser le problème. D'abord, je propose d'étudier comment naissent ce que j'appelle un « film dans le cerveau ». Un tel film est la somme, intégrée et unifiée, des diverses impressions sensorielles – auditives, tactiles, olfactives – qui constituent l'esprit. Ensuite, je propose d'étudier la question du « soi », de chercher pourquoi je sais que tel film m'appartient. Ces deux approches sont liées, la deuxième découlant de la première, mais leur étude séparée est intéressante, car chacune de ces deux questions a sa propre réponse.

Les neurobiologistes étudient la question des films depuis près de 150 ans : le chirurgien français Paul Broca (1824-1880) et le médecin allemand Carl Wernicke (1848-1905) ont proposé que des régions distinctes du cerveau traitent les différents aspects du langage ; ce fut le début de la cartographie des régions du cerveau participant à l'élaboration des films. Avec des outils toujours plus performants, cette hypothèse a été validée.

Aujourd'hui, on enregistre directement l'activité des neurones (isolés ou en groupes) et on la relie à certains états mentaux, telle la perception de la couleur rouge ou d'une ligne courbe. Les techniques d'imagerie cérébrale, notamment la tomographie



Figure 2. (a) et (b) : la répartition des neurones activés dans l'une des couches du cortex visuel primaire.

**2. LE CERVEAU est occupé à des tâches de représentation. Des études faites sur des macaques ont montré une remarquable similitude entre une forme observée (a) et la répartition des neurones activés dans l'une des couches du cortex visuel primaire (b).**

par émission de positons ou la résonance magnétique fonctionnelle, révèlent comment différentes régions cérébrales d'une personne participent à un effort mental donné, par exemple l'association d'un mot à un objet, ou la reconnaissance d'un visage. On commence même à connaître les molécules qui, à l'intérieur des microscopiques circuits neuronaux, participent à ces tâches mentales, et l'on identifie les gènes qui produisent ces molécules.

Il y a une quarantaine d'années, à l'Université Harvard, David Hubel et Torsten Wiesel ont apporté les premiers indices sur la façon dont les circuits cérébraux représentent la forme d'un objet : ils ont montré que certains neurones du cortex visuel primaire réagissent spécifiquement à des bords orientés selon des angles précis, dans le champ visuel. Puis D. Hubel et sa collègue Margaret Livingstone ont montré que d'autres neurones du cortex visuel primaire réagissent sélectivement à la couleur, mais pas à la forme. Au Collège universitaire de Londres, Semir Zeki a montré que certaines régions du cerveau qui reçoivent l'information sensorielle après le cortex visuel primaire sont spécialisées pour la suite du traitement de la couleur ou du mouvement. Ces résultats expliquaient les observations faites sur des personnes ayant des anomalies neurologiques : des lésions de régions particulières du cortex entraînent, par exemple, seulement la perception des couleurs, sans perturber celle des formes ou du mouvement. D'après l'ensemble des données, on suppose aujourd'hui qu'il existe une correspondance étroite entre la structure d'un objet vu par l'œil et l'activité neuronale engendrée dans le cortex visuel de l'organisme qui voit cet objet.

D'autres progrès remarquables ont amélioré la compréhension des mécanismes de l'apprentissage et de la mémoire. Ainsi, le cerveau utilise des systèmes distincts selon le type d'apprentissage. Les ganglions de la base et le cortex préfrontal sont impliqués dans l'apprentissage de certaines activités, par exemple faire de la bicyclette ou jouer d'un instrument de musique ; l'hippocampe assure l'apprentissage de faits liés aux personnes, aux lieux ou aux événements. Une fois les faits enregistrés, leur mémorisation durable repose sur des systèmes cérébraux multicomposants, dont certains éléments

clefs sont localisés dans les aires du cortex cérébral.

Les mécanismes de l'apprentissage à long terme des faits nouvellement enregistrés ont lieu à l'échelle des neurones, voire des molécules : ces faits sont « gravés » dans les circuits neuronaux. La force de la gravure dépend du renforcement ou de l'affaiblissement des contacts entre les neurones, les synapses. Eric Kandel, de l'Université Columbia, et Timothy Tully, du

Laboratoire de Cold Spring Harbor, ont récemment montré que de nouvelles protéines doivent être synthétisées pour que la gravure ait lieu ; elles sont produites par des gènes spécifiques, activés dans les neurones qui assurent la consolidation de la mémoire.

L'étude du langage, des émotions et de la prise de décisions a également apporté des informations intéressantes. Quelle que soit la fonction mentale considérée, elle est réalisée par un cerveau qui contribue ensemble à son élaboration. À un état mental ou à un comportement correspond l'activation de régions cérébrales spécifiques, et à chaque région – par exemple, le cortex visuel primaire, une aire de traitement du langage, ou un centre de l'émotion – correspond un circuit neuronal microscopique.

Les progrès impressionnants qui ont été réalisés dans l'étude du cerveau ne sont que des prémices. Les méthodes d'analyse progressent, donnant une idée de plus en plus fine du fonctionnement cérébral, à l'échelle moléculaire ou à l'échelle intégrée des réseaux qui constituent le cerveau. Grâce à des progrès qui précisent les correspondances entre les faits cérébraux et les états mentaux, on se rend compte que le cerveau est plus complexe que les techniques progressent et que l'inventivité des chercheurs se concrétise, les structures physiques et les activités biologiques qui constituent les films qui se déroulent dans nos cerveaux se précisent.

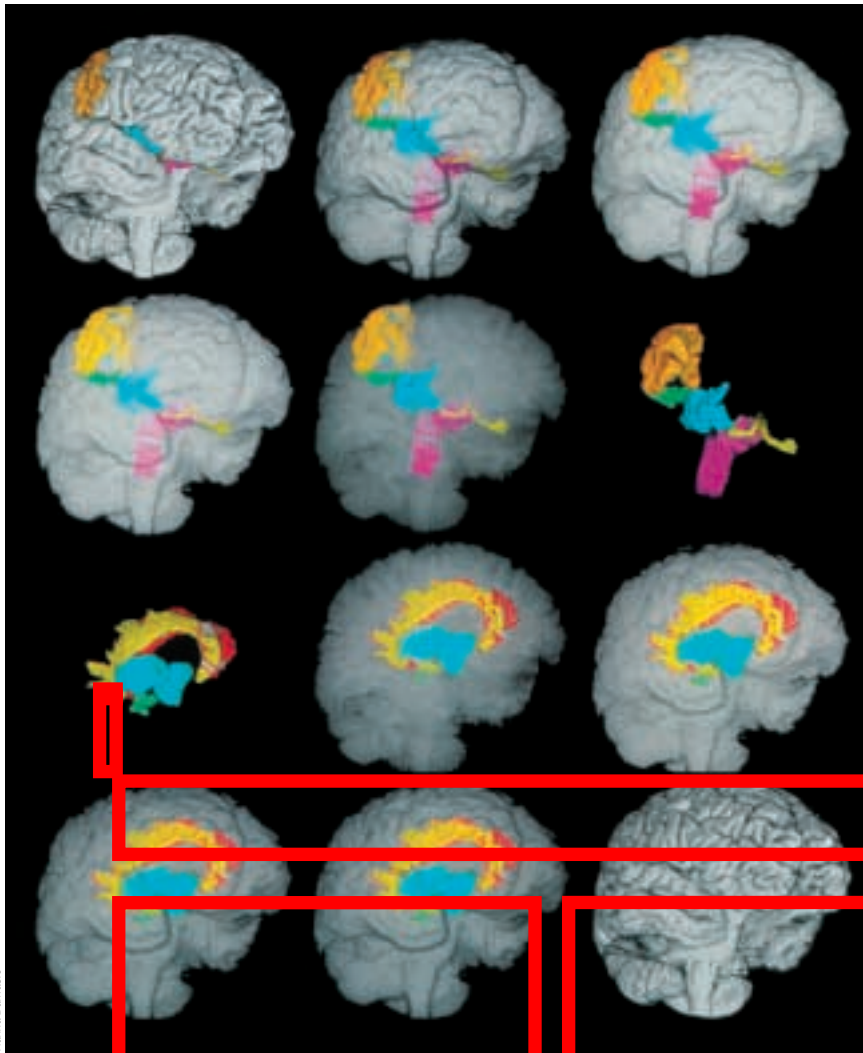
### Du cerveau au soi

Le rythme des progrès et l'abondance des résultats accumulés devraient convaincre un nombre de sceptiques que les bases du comportement humain sont accessibles. Il restera encore à leur faire accepter que l'on pourra résoudre l'autre aspect de la question de l'esprit et de la conscience : celle de l'émergence du sens de soi. J'admets que l'on ne résoudra pas simplement cet aspect du problème en montrant la solution dans mon nouveau livre *Le sentiment même de soi*.

Cette hypothèse est fondée sur une capacité spécifique du cerveau : celle de la représentation de son environnement. Les cellules du cœur ou du foie ont un rôle fonctionnel, mais elles ne représentent rien d'autre. Au contraire, les cellules du cerveau, à



**3. CERTAINES TÂCHES activent des zones cérébrales spécifiques. Des zones du langage sont activées sur les images a et b. Sur l'image c, les aires de traitement des couleurs apparaissent en rouge et celles de la reconnaissance des visages en vert. Le sens de son propre corps apparaît en rouge sur l'image d.**



Hanna Damasio

**4. LE SENS DU SOI** est localisé au centre du cerveau, un logiciel de traitement d'images qui laisse apparaître les régions profondes du cerveau responsables de quelques zones responsables du maintien de l'équilibre physiologique, des émotions, de l'éveil et du sens du soi.

tous les niveaux du système nerveux, représentant des entités ou des événements qui se produisent ailleurs dans l'organisme. Par construction, les neurones se préoccupent de ce qui a lieu ailleurs : ce sont les cartographies nées de la géographie de l'organisme et des événements qui s'y déroulent. On s'interroge souvent sur l'aspect mystérieux de l'« intentionnalité » de l'esprit dans la représentation des objets : peut-être les émotions internes et les intentions sont-elles le cœur du problème ? Si la question préoccupe les philosophes, elle trouve sa réponse en termes darwiniens : l'évolution a façonné un cerveau qui représente directement l'organisme et qui représente indirectement tout ce qui interagit avec l'organisme.

L'intentionnalité naturelle du cerveau nous conduit alors à constater que

ce dernier est équipé de dispositifs qui contrôlent la vie de l'organisme de façon que les équilibres chimiques internes qui conditionnent la survie soient toujours respectés. Ces dispositifs ne sont pas au centre du cerveau, dans le tronc cérébral et dans l'hypothalamus. Ces dispositifs cérébraux représentent aussi, nécessairement, les états de l'organisme en perpétuel changement. Autrement dit, le cerveau est doté de moyens naturels qui lui permettent de percevoir l'état de l'ensemble de l'organisme.

Comment passer de ce soi biologique à la conscience de soi, c'est-à-dire à l'idée que nos pensées sont construites de notre propre point de vue, sans tomber dans le piège de la théorie de l'homoncule, cet être supérieur omniscient que notre cerveau hébergerait et qui interpréterait la réa-

lité ? Comment peut-on s'observer soi-même et observer son environnement ? Je suis persuadé que les clés biologiques du sens de soi sont cachées dans ces dispositifs cérébraux qui représentent, à chaque instant, la continuité d'un même organisme.

Plus précisément, je suppose que le cerveau utilise des structures qui cartographient à la fois l'organisme et les objets. Cette représentation est une représentation nouvelle, de second ordre. Cette dernière indique que l'organisme, tel qu'il est représenté dans le cerveau, interagit avec le monde extérieur, également représenté dans le cerveau. La représentation de second ordre n'est pas une abstraction : elle a lieu dans des structures neuronales telles que le thalamus.

Cette représentation, par laquelle l'organisme est informé qu'il est le propriétaire du processus mental en cours, fournit une réponse à la question que l'on ne pose jamais : à qui cela arrive-t-il ? Ainsi le sens d'un soi qui sait est créé à la base d'une perspective personnelle qui caractérise la conscience.

Encore une fois, dans une perspective darwinienne, la nécessité d'un sens de soi s'éclaire : comparons un organisme conscient de lui-même et un autre organisme sans conscience ; celui qui est conscient peut éviter le danger à l'échelle du film de ce qu'il a déjà vécu, par exemple la douleur causée par un objet particulier, peut éviter tout contact avec cet objet, et il est avantagé par rapport à l'organisme inconscient du danger. D'un point de vue évolutif, la conscience de soi est un avantage incontestable pour la survie.

Pour reprendre la métaphore du film, on pense que le sens du soi, dans l'acte de connaissance, naît dans le film lui-même. Elle fait partie du film, de sorte que sont mis en présence l'observé et l'observateur, le pensé et le penseur. Il n'y a pas de spectateur des films qui se déroulent dans un cerveau. L'idée du spectateur est intrinsèque à la notion de connaissance.

ne hante la « salle de cinéma ». Des mécanismes cérébraux objectifs élaborent la subjectivité de l'esprit conscient à partir de cartographies sensorielles. Comme la cartographie sensorielle la plus fondamentale retrace les états de l'organisme et se manifeste sous forme de sentiments, le sens du soi dans l'acte de connaissance se

traduit par un sentiment particulier, le sentiment de l'interaction d'un organisme et d'un objet.

## Et demain ?

Je ne suis pas assez insensé pour faire des prévisions sur ce qui pourra ou ne pourra pas être découvert, sur le moment d'un tel événement, ou sur le chemin qui y mènera. Toutefois, on peut raisonnablement affirmer que, d'ici 2050, notre connaissance des phénomènes biologiques aura suffisamment progressé pour que nous soyons débarrassés des séparations traditionnelles entre le corps et le cerveau, le corps et l'esprit, ou encore le cerveau et l'esprit.

Certains craignent que l'esprit humain, précieux et respectable ne soit rabaissé par l'élucidation de sa structure physique. Je n'ai pas cette crainte, car je suis convaincu que l'admiration que nous éprouvons à son égard sera simplement transférée aux microstructures fascinantes de l'organisme et aux formations si élaborées qui leur permettent de fonctionner. En découvrant les secrets de l'esprit, nous le percevrons comme l'ensemble de phénomènes biologiques le plus élaboré de la nature, et non plus comme un mystère insondable. L'esprit survivra à l'explication de sa nature, tout comme le parfum de la rose continue d'embaumer, même si l'on en connaît la structure moléculaire.

Antonio DAMASIO dirige le Département de neurologie de la Faculté de médecine de l'Université d'Iowa. Il est également professeur à l'Institut Salk d'études biologiques, à San Diego.

John R. SEARLE, *The Rediscovery of the Mind*, MIT Press, 1992.

Gerald M. EDELMAN, *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of the Mind*, Basic Books, 1993.

David H. HUBEL, *L'œil, le cerveau et la vision*, L'Univers des Sciences, Éditions Pour la Science, 1994.

Antonio R. Damasio, *L'erreur de Descartes*, Éditions Odile Jacob, Sciences, 1995.

Antonio R. DAMASIO, *Le sentiment même de soi : corps, émotion, conscience*, Éditions Odile Jacob, Sciences, 1999.

Paul M. CHURCHLAND, *Matière et conscience*, Éditions Champ Vallon, 1999.



La science, nous dit-on, est «objective» et «neutre». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de «l'irrationnel».

Le puritanisme rationaliste, pourtant, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Maints exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites «occultes».

Pierre Thuillier est philosophe et historien des sciences. Il enseigne à l'université Paris VII.

code 2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 98

  
BELIN



# Une vie extraterrestre?

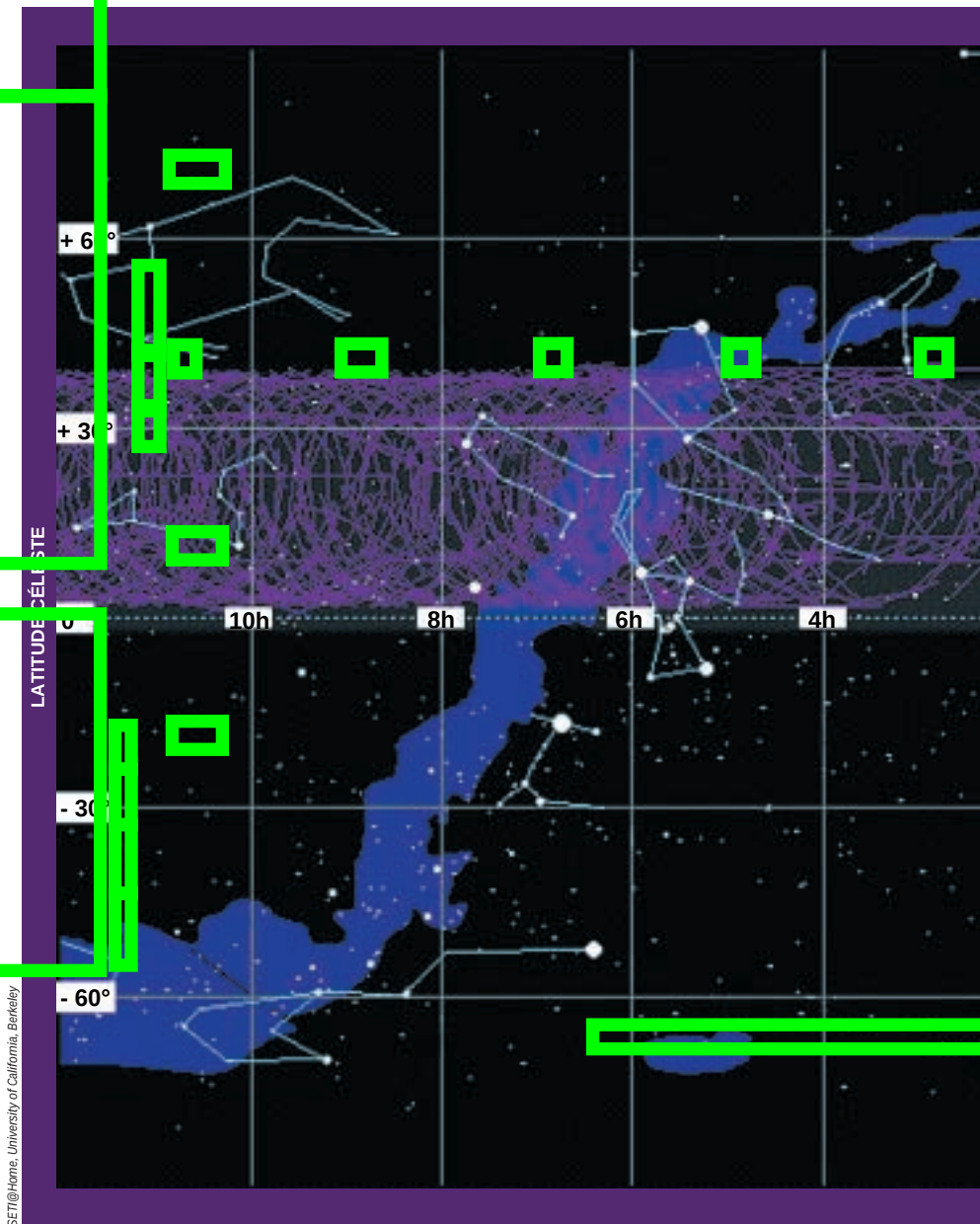
JILL TARTER • CHRISTOPHER CHYBA

*La recherche de vie extraterrestre commence seulement : on découvre des planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, des sondes explorent le Système solaire et les radioastronomes scrutent les cieux...*

Depuis 40 ans, des astronomes cherchent des signaux radio qui seraient émis par des extraterrestres, on envoie des sondes spatiales vers la plupart des planètes du Système solaire et les planétologues étudient les conditions nécessaires au maintien de la vie. Le public pense que la science a déjà beaucoup cherché – sans succès – des indications d'une vie extraterrestre, mais cette recherche commence à peine.

Si le programme d'exploration spatiale se poursuit au rythme actuel, nous saurons peut-être, d'ici 2050, s'il existe ou si, un jour il y a eu de la vie ailleurs dans le Système solaire. Au minimum, nous aurons exploré systématiquement les possibilités : nous saurons si la vie existe sur Europe, un satellite de Jupiter, ou sur Mars. Nous aurons également repris l'exploration de systèmes planétaires autour d'autres étoiles, à la recherche de traces de vie dans les spectres des atmosphères planétaires. Ces études seront complétées par des recherches poussées de signaux intelligents.

1. UNE BANDE DU CIEL est sondée par le télescope d'Arecibo, au Porto Rico. Comme il ne peut pas s'incliner, il observe uniquement la portion du ciel qui s'étend de l'équateur céleste jusqu'à une déclinaison (latitude céleste) de 35 degrés. Afin d'observer tout au long de l'année et d'éviter les interférences avec d'autres observations astronomiques, le programme de recherche écoute simplement les signaux en provenance des régions du ciel où sont pointés les autres instruments du télescope. Au fil du temps, l'intégralité de la bande sera couverte. Les données sont analysées par le logiciel SETI@Home, téléchargeable sur le réseau Internet.





## SETI en France

En France, la recherche de la vie extraterrestre a une longue tradition. Dès sa fondation en 1667, l'Observatoire de Paris a attiré dans ses murs d'illustres étrangers, dont Christian Huygens, auteur du premier livre scientifique sur le sujet : *Essai sur la pluralité des mondes*. Diffusant ces idées, les *Entretiens* du philosophe Fontenelle avec sa marquise est resté un best-seller un siècle durant. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le directeur de l'Observatoire, Jules Janssen, un pionnier de la toute jeune spectroscopie, a créé la section de Meudon, située alors en dehors de la pollution parisienne. Il voulait y poursuivre ses recherches délicates sur la valeur d'eau dans l'atmosphère de Mars et, déclarait-il devant les cinq Académies, «faire un nouveau pas décisif dans la grande question de l'habitabilité des mondes et de la vie extraterrestre».

Plus près de nous, en 1965, le président Charles de Gaulle inaugurait le plus grand radiotélescope du monde, à Nançay, et demandait à son créateur : «Dites-moi, Denisse, avec votre grand machin, pouvez-vous me dire s'il est vrai que les Russes ont découvert des signaux radio extraterrestres...». Il s'agissait en fait du premier quasar, CTA 102, que les Russes avaient pris pour des signaux extraterrestres.

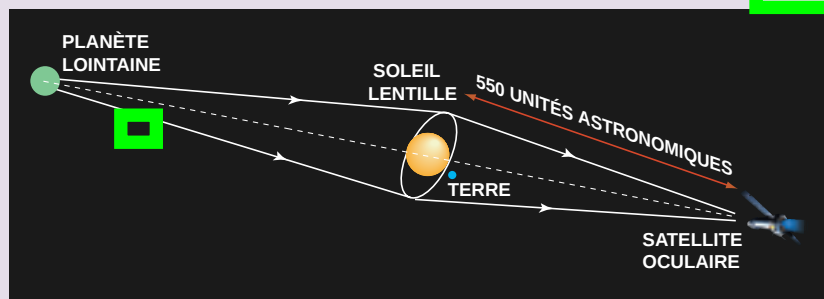
Paris, Meudon, Nançay... Depuis, seuls deux radioastronomes, François Biraud, puis moi, avons utilisé très sporadiquement le radiotélescope de Nançay à la recherche de signaux extraterrestres, en collaboration avec la pionnière américaine Jill Tarter. Nous voulions amener derrière cette grande antenne un récepteur mis au point par la NASA qui comprend des dizaines de millions

de canaux, mais nous n'avons jamais reçu le soutien officiel français, de sorte que cette collaboration a été abandonnée.

En me tournant vers le milieu international, j'ai alors lancé deux initiatives. D'abord, avec le soutien de l'Académie internationale d'astronautique et du Comité international de recherche spatiale (COSPAR), je mène une étude pour l'établissement d'un observatoire radio sur la face cachée de la Lune. En préservant un site privilégié, le cratère Saha, mon but est d'assurer à l'humanité une fenêtre radio libre de toute pollution, à la fois pour SETI, mais aussi pour la radioastronomie des décennies à venir. La situation progresse.

Ensuite, avec un groupe d'ingénieurs et de scientifiques turinois, j'ai présenté à l'Agence spatiale européenne un projet de mission spatiale lors du Système solaire pour utiliser l'effet de lentille gravitationnelle du Soleil déduit de la relativité générale. Le projet consiste à placer un «oculaire» au foyer de cette lentille, créant ainsi un télescope gigantesque muni d'un objectif d'un million et demi de kilomètres de diamètre ! La difficulté est que ces foyers sont situés 20 fois plus loin de nous que ne le sont Neptune ou Pluton (550 unités astronomiques). Cela pose des problèmes très difficiles, mais solubles. Avec un tel instrument, on pourrait voir, sur des planètes de type terrestre situées à 100 années-lumière, des continents, des mers, et même, plus important, des ouvrages «astro-technologiques» d'éventuelles civilisations très avancées.

Jean HEIDMANN,  
Observatoire de Paris



Des appareils de chromatographie en phase gazeuse et des spectromètres de masse emportés par les sondes Viking cherchaient en effet la présence de molécules organiques. Aucune molécule organique n'ayant été trouvée, les scientifiques expliquèrent le résultat de l'expérience de dégazage par des réactions chimiques imprévues plutôt que par des réactions biologiques (voir *La vie sur Mars*, par Norman Horowitz, *Pour la Science*, janvier 1978). Ils avaient adopté une définition biochimique de la vie : la vie martienne, comme la vie terrestre, serait fondée sur la chimie du carbone.

Quelles leçons tirer de ces expériences ? Tout d'abord, on doit chercher la vie avec de multiples définitions, mais la définition biochimique prévaut pour les détectations à distance : si l'on ne trouve pas de molécules organiques, les indices de présence biologique doivent être considérés avec circonspection. Ensuite, afin d'interpréter les résultats, les exobiologistes doivent les restituer dans le contexte chimique et géologique de leur découverte. Enfin, les expériences de détection de la vie devraient être conçues de manière à fournir des informations scientifiques intéressantes, même lorsqu'elles ne trouvent pas de vie. Ces idées ont guidé l'élaboration des missions futures, telles celles qui exploreront Europe.

On prévoit également d'ajouter un microscope aux instruments de détection biochimique : le microscope ne se fonde sur aucune hypothèse *a priori*. Toutefois, cet instrument n'est pas une solution absolue : en 1998, une équipe de la NASA a prétendu avoir trouvé des microfossiles sur la météorite martienne Allan Hills 84001. La controverse qui a suivi a bien montré qu'on ne peut se fonder seulement sur la forme des structures microscopiques pour identifier la vie ; bien des phénomènes non biologiques produisent des structures analogues.

Le satellite Europe intéresse beaucoup les exobiologistes, car, sous une couche de glace, il semble posséder un océan vieux de quatre milliards d'années. En 2003, une mission d'exploration d'Europe ira chercher cet océan. Si on le trouve, un programme d'exploration détaillé, avec des capsules d'atterrissage et, peut-être, des sous-marins pénétrant sous la glace, vérifiera si cet océan héberge des formes de vie. Ces études révéleront l'adaptabilité de la vie et les conditions où

elle peut apparaître. Sur la Terre, partout où il y a de l'eau, il y a de la vie, même dans des endroits inattendus, telles les grandes profondeurs, sous la croûte terrestre.

Un océan semble également présent sur un autre satellite jovien : Callisto. Plus généralement, tous les grands satellites glacés des planètes gazeuses ont peut-être des océans subcrustaux. Titan, satellite de Saturne, est recouvert d'une brume qui masque sa surface. En 2004, la sonde *Huygens* descendra dans son atmosphère et enverra des images de la surface, peut-être recouverte de mers d'hydrocarbures liquides. Si ces matières organiques se mélangeaient à l'eau située sous la surface, la vie serait-elle possible ?

## Une civilisation interplanétaire

D'ici à 2030, nous aurons parcouru la surface et sondé une partie du sous-sol de Mars. Les responsables de la NASA ont déjà prévu de lancer deux vaisseaux spatiaux vers Mars, à chaque alignement favorable de Mars et de la Terre, c'est-à-dire tous les 26 mois. De surcroît, les chercheurs préparent une série de micromissions vers Mars, qui seront lancées par la fusée européenne *Ariane 5*. Dans les années 2010, Mars sera doté d'un système de positionnement global par satellite (GPS). Les utilisateurs d'ordinateurs, sur la Terre, recevront les images que nous enverront les robots qui exploreront le sol et l'atmosphère de Mars. Ainsi, des centaines de millions de personnes visiteront virtuellement la planète rouge. Le réseau Internet prenant une dimension interplanétaire, l'humanité se sentira davantage une civilisation du Système solaire.

Dans dix ans, nous disposerons sur la Terre d'échantillons du sol martien. Toutefois, les meilleurs sites pour la recherche de traces de vie extraterrestre, comme les sources chaudes martiennes et les grottes profondes contenant de l'eau liquide, seront difficiles d'accès pour les robots explorateurs : l'envoi d'explorateurs humains deviendra alors une nécessité. Malgré les difficultés, les premiers avant-postes humains permanents pourront s'installer sur Mars, avec un remplacement régulier des équipages, vers 2050. Les hommes utiliseront les robots pour explorer en détail les sites qui semblent abriter la vie ou ses restes fossiles.

Si l'on trouve la vie sur Mars, les exobiologistes s'interrogeront : est-elle apparentée à la vie terrestre ? Depuis une dizaine d'années, on pense en effet que les planètes du Système solaire interne ne sont pas isolées biologiquement : par exemple, des roches martiennes projetées dans l'espace, lors d'impacts d'astéroïdes, auraient pu transporter des organismes vivants jusqu'à la Terre. Une planète où la vie serait apparue en premier aurait pu « ensemler » les autres planètes. Si la vie existe sur Mars, nous pourrions avoir des ancêtres communs avec elle, et la comparaison des ADN martien et terrestre révélerait l'origine de la vie terrestre. Inversement, la vie martienne pourrait aussi être distincte de la vie terrestre, sans ADN par exemple. La découverte d'une seconde genèse, au sein du Système solaire, montrerait que la vie est probable ailleurs dans l'Univers. Voir *À la recherche de la vie extraterrestre*, par Carl Sagan, *Pour la Science* (décembre 1994).

Simultanément, les exobiologistes exploreront d'autres systèmes planétaires. On connaît déjà plus de planètes en dehors du Système solaire qu'à l'intérieur de celui-ci. Avant 2050, les premières missions réellement interplanétaires auront quitté le Système solaire munies de gigantesques voiles mues par le rayonnement solaire. Les

instruments embarqués sur ces engins analyseront les molécules organiques que les radiotélescopes ont déjà détectées dans le milieu interstellaire. Avec les techniques actuelles, les sondes n'atteindront pas les systèmes stellaires les plus proches d'ici 2050, car le voyage durera des milliers d'années : ces systèmes planétaires seront étudiés à distance.

En 2050, nous aurons des catalogues des systèmes planétaires extrasolaires comparables aux catalogues actuels d'étoiles. Nous saurons si notre système planétaire est commun ou très particulier. Aujourd'hui, on ne sait observer que des planètes au moins aussi massives que Jupiter, mais des télescopes spatiaux détecteront régulièrement des planètes de la masse de la Terre autour d'autres étoiles — si elles existent — et analyseront leurs atmosphères à la recherche de traces de vie. De tels mondes feront alors l'objet d'observations poussées ; on y cherchera notamment des signes d'intelligence.

## Une fenêtre sur d'autres mondes

Les exobiologistes cherchent moins des signaux intelligents que la preuve d'une technique extraterrestre. Jusqu'ici, ils ont concentré leurs efforts sur une technique très particulière : les



**2. DES BATTERIES DE PETITES PARABOLES** chercheront une intelligence extraterrestre, dans les prochaines décennies. Ces paraboles de télévision par satellite se compteront par centaines, voire par milliers ; la sensibilité des réseaux formés sera supérieure à celle des radiotélescopes actuels. Ces réseaux couvriront plus de fréquences et ils seront moins gênés par les interférences que les radiotélescopes actuels. Le premier instrument fondé sur cette idée, le télescope 1hT (qui couvrira une surface de un hectare), devrait coûter 150 millions de francs.

émissions radio à des longueurs d'onde dont les bruits de fond naturels sont faibles et l'absorption réduite.

Pour l'instant, aucun signal détecté ne provient de façon certaine d'une technique extraterrestre. Toutefois, l'échec résulte peut-être de l'insuffisance des méthodes de détection. En outre, l'étoile la plus éloignée sondée directement n'est encore distante que de un pour cent du dixième de notre Galaxie.

Le projet de recherche des signaux extraterrestres dans le domaine radio, nommé SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*, soit «Recherche d'intelligence extraterrestre»), comme l'ensemble de la radioastronomie, est en crise : l'humanité utilise tant le spectre radio que les signaux provenant de l'espace sont progressivement brouillés. À

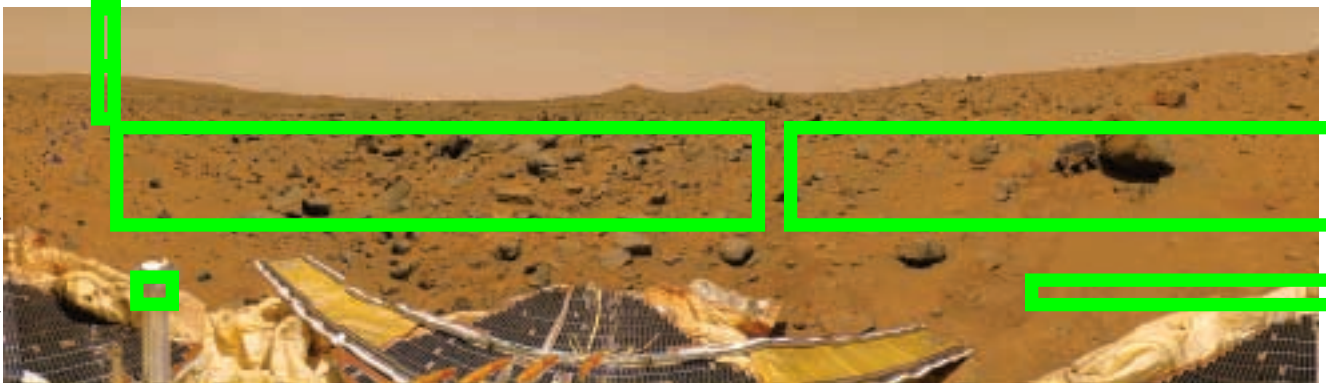
plus ou moins long terme, on devra établir des observatoires radioastronomiques sur la face cachée de la Lune, seul lieu du Système solaire où la Terre ne se lève jamais. Des accords internationaux ont déjà établi une «zone protégée» sur la Lune, et certains astronomes ont proposé de réserver le cratère Saha aux radiotélescopes. Si la voie de l'exploration humaine de Mars passe par la Lune, alors l'infrastructure nécessaire pourrait être en place d'ici à 2050.

Dans les programmes de recherche, on envisage également la construction de divers instruments sur Terre avec une sensibilité, une couverture de fréquences et une durée d'observation accrues. Aujourd'hui, tous ces projets ont des financements privés. Les recherches dans le domaine radio ont commencé sur le

télescope 1hT (*One Hectare Telescope* «Télescope d'un hectare»), qui devrait être installé en Californie. À terme, ce radiotélescope permettra d'accéder simultanément à la totalité du spectre des micro-ondes. Grâce à son grand champ et à sa puissance informatique considérable, il observera simultanément des dizaines d'objets, des sources astronomiques classiques et des cibles SETI. Ainsi plutôt que de se faire concurrence, comme c'est souvent encore le cas, la radioastronomie et SETI partageront les ressources instrumentales. Le télescope 1hT montrera également la faisabilité économique d'un télescope encore plus grand, dont la sensibilité serait 100 fois supérieure à celle des meilleurs radiotélescopes actuels. Pour SETI, ce facteur 100 accroîtra d'un



Ron Miller



NASA/Jet Propulsion Laboratory

**3. DES ORGANISMES** vivent peut-être dans les profondeurs de Mars (*en bas*) ou d'Europe (*en haut*). Les canyons creusés sur la surface martienne indiquent que, naguère, il y avait de l'eau. L'observation de la surface d'Europe, parsemée d'icebergs, indique la

présence d'un océan situé sous la surface. Or, la vie est présente même à de grandes profondeurs, sous la croûte terrestre et dans les océans. Pourquoi ne le serait-elle pas également sur ces mondes hostiles ?

facteur 10 des distances d'exploration et 1 000 le nombre d'étoiles sondées.

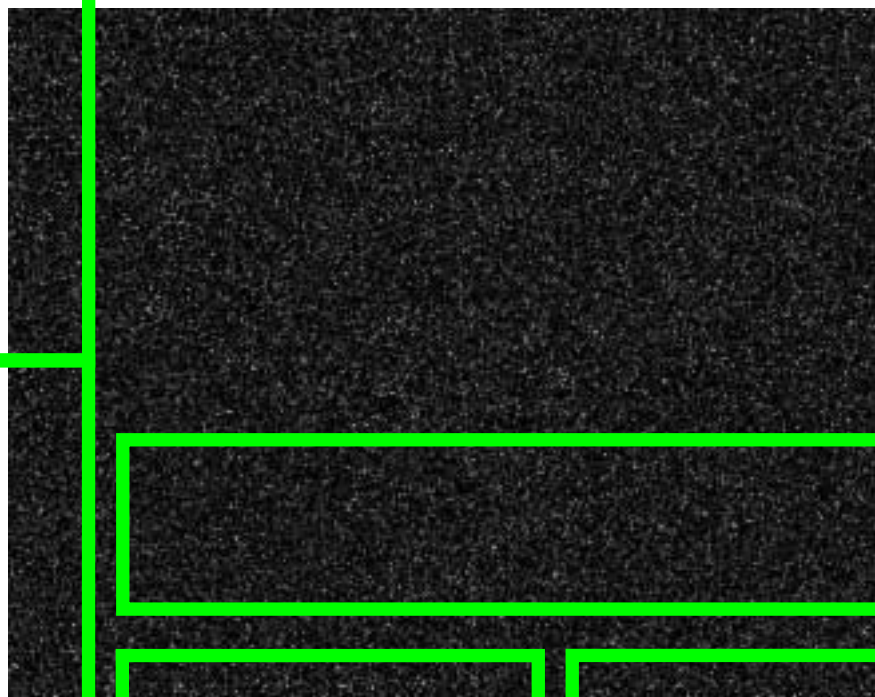
On construira de tels instruments en utilisant des matériels perfectionnés de série : ordinateurs, récepteurs radio, etc. En effet, selon la loi de Moore, vérifiée depuis 20 ans, la puissance des processeurs augmente de manière exponentielle en fonction du temps. Le programme SETI@home, que plus d'un million de personnes ont téléchargé, utilise les ordinateurs personnels pour analyser les blocs de données enregistrés au radiotélescope d'Arecibo. En 2050, si le nombre de grands radiotélescopes sur Terre réussit à réduire la quantité d'interférences en provenance des systèmes de télécommunication mobiles, ils seront certainement moins onéreux qu'un observatoire sur la face cachée de la Lune.

D'autres domaines de longueurs d'onde ont retenu l'attention. Des générations d'observateurs ont scruté le ciel à l'œil nu et à l'aide de télescopes, sans jamais voir un signe d'activité extraterrestre. Toutefois, si ces signaux ne sont que des éclairs d'un milliardième de seconde, ils ont échappé à l'observation. La recherche d'impulsions aux longueurs d'onde visibles vient de commencer. Au cours des prochaines décennies, des recherches de signaux dans le visible pourraient être entreprises à l'aide de grands télescopes. Si ces premières recherches d'autres civilisations n'aboutissent pas, au moins aurons-nous sondé le bruit de fond du ciel avec une grande résolution temporelle.

L'exploration du système solaire sera l'occasion de nouvelles recherches de vie intelligente extraterrestre. Les sondes lancées examineront avec attention les recoins du Système solaire, à la recherche d'objets techniques non humains.

## La diffusion des recherches

Que saurons-nous des autres habitants de l'Univers en 2050? Difficiles à dire. La seule chose sûre, c'est que tout le monde aura accès aux découvertes. Toute personne curieuse pourra constamment savoir quelles recherches auront été effectuées, quels groupes étudient quels sujets, à partir de quel endroit, etc. Les données engendrées par les recherches afflueront à une vitesse telle que nous ne pourrons les absorber, mais les signaux intéressants, sélectionnés par des ordinateurs, seront



4. UN SIGNAL D'ORIGINE EXTRATERRESTRE se présente ainsi sous la forme d'une traînée dans un diagramme où chaque point représente la détection d'un signal radio à une fréquence donnée (axe horizontal) et à un instant donné (axe vertical). Les points désordonnés représentent le bruit de fond, et les signaux apparaissent sous la forme de droites. Pour un signal extraterrestre, la ligne est penchée, parce que l'orbitation de la Terre décale les fréquences. Dans le cas illustré ici, le signal provient d'un vaisseau spatial, Pioneer 10, qui est maintenant hors du Système solaire.

à la disposition du plus grand nombre. De cette manière, nous espérons suppléer les pourvoyeurs de pseudoscience qui attirent les curieux en les invitant dans un royaume extravagant (mais fort lucratif) d'absurdités. Aujourd'hui, les données réelles sont trop souvent inaccessibles, alors que les données inventées sont largement diffusées. La réalité est plus intéressante et elle sera plus facilement accessible dans le futur.

Si, d'ici 2050, nous n'avons trouvé aucun traçage d'intelligence extraterrestre, nous devrons en déduire soit que l'intelligence technique évolue peu,

soit que les civilisations techniques s'auto-détruisent rapidement, soit encore que nous n'avons pas fait les recherches adéquates. Si l'humanité existe encore en 2050 et si elle est encore capable de rechercher des signaux extraterrestres, ce sera la preuve que notre technique n'aura pas encore engendré notre perte. Un signe optimiste pour la pérennité de la vie en général. Nous pourrions alors envisager l'émission active d'un signal que d'autres pourront capter, mais, à ce point, nous serons confrontés à de nouvelles questions : qui parlera au nom de la Terre et que faudra-t-il dire?

Jill TARTE est directeur scientifique de l'Institut SETI, à Mountain View (Californie). Christopher CHYBA, exobiologiste, est professeur à l'Institut SETI.

Frank DRAKE et Dava SOBEL, *Is Anyone Out There? The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*, Delacorte Press, 1992.

I.S. SHKLOVSKII et Carl SAGAN, *Intelligent Life in the Universe*, Holden-Day, 1966.

*Extraterrestrials : Science and Alien Intelligence*, sous la direction d'Edward Regis, Jr., Cambridge University Press, 1985.

Donald GOLDSMITH et Tobias OWEN, *The Search for Life in the Universe*, Addison-Wesley, 1992.

*Extraterrestrials – Where Are They?* sous la direction de Ben Zuckerman et Michael H. Hart, Cambridge University Press, 1995.

Jean HEIDMANN, *Intelligences extraterrestres*, Odile Jacob, 1992.

Seth SHOSTAK, *Sharing the Universe : Perspectives on Extraterrestrial Life*, Berkeley Hills Books, 1998.



# L'ère des robots

HANS MORAVEC

*En 2040, les robots rivaliseront d'intelligence avec les hommes : les ordinateurs de leurs « cerveaux » artificiels exécuteront 100 000 milliards d'instructions par seconde.*

Dans les années 1990, les ordinateurs personnels ont tant proliféré qu'ils sont aujourd'hui partout. Toujours plus fonctionnels, ils ont envahi notre vie quotidienne, notamment avec le développement de l'Internet. Dans ce domaine, la réalité a dépassé les prévisions. Certains redoutent l'avènement d'un monde saturé de puissants microprocesseurs qui s'insinueront dans nos machines, nos maisons, nos vêtements et même dans nos corps.

En revanche, la robotique est loin d'avoir progressé autant qu'on l'espérait dans les années 1950 : à l'époque, les experts, éblouis par les énormes capacités de calcul des ordinateurs, pensaient qu'en 10 ou 20 ans des programmes donneraient vie à des robots autonomes ; ces derniers tondraient les pelouses, nettoieraient les sols et débarrasseraient l'être humain de toutes sortes de corvées.

Ils se sont évidemment trompés. Certes, des robots ont révolutionné certaines industries, telle celle de l'automobile. Toutefois, cette automatisation est très en retard par rapport à ce que l'on espérait. De nombreux chercheurs ont baissé les bras, et des entreprises de robotique ont fait faillite.

On sait fabriquer le corps mécanique des robots : des bras articulés et divers autres mécanismes mobiles sont déjà utilisés dans l'industrie. En revanche, les microprocesseurs ne sont pas encore assez puissants pour exécuter des programmes qui animeraient des robots humanoïdes.

Néanmoins, je suis convaincu que le vieux rêve du robot autonome et généraliste, c'est-à-dire capable de tâches variées, se réalisera dans le futur proche. Dès 2010, des robots mobiles, de taille humaine, auront des aptitudes cognitives équivalentes à celles d'un lézard. Ils s'acquitteront de tâches simples : aspirer, balayer, livrer des paquets ou

sortir les poubelles. En 2040, on atteindra l'objectif initial de la robotique, tant décrit dans les romans de science-fiction : des robots se déplaceront de façon autonome et auront les capacités intellectuelles d'un être humain.

## Justification de l'optimisme

Pourquoi prévoir des progrès rapides et extraordinaires, malgré les déceptions passées ? Parce que, récemment, la micro-électronique et l'informatique ont beaucoup progressé. De surcroît, depuis plus de 20 ans que j'étudie les robots, les ordinateurs, les insectes, les reptiles et les autres animaux, je vois une convergence des aptitudes des robots et des créatures simples.

Surtout, les performances des ordinateurs de série se sont remarquablement accrues. Dans les années 1970 et 1980, les ordinateurs des chercheurs en robotique exécutaient environ un million d'instructions par seconde (MIPS). Une instruction est une tâche élémentaire : par exemple, additionner deux nombres de dix chiffres ou stocker le résultat à un endroit donné, dans la mémoire de l'ordinateur. Dans les années 1990, la puissance des ordinateurs disponibles en robotique est passée à 10 MIPS, puis 100 MIPS. Depuis peu, elle a atteint 1 000 MIPS. Le nouvel ordinateur portable d'Apple (le iBook), vendu environ 13 000 francs, exécute plus de 500 MIPS. Les robots d'aujourd'hui ont des capacités bien supérieures à celles des robots des années 1980, à des prix accessibles au public.

Par exemple, en octobre 1995, le véhicule expérimental Navlab V a traversé les États-Unis d'Est en Ouest en se conduisant tout seul pendant plus de 95 pour cent du voyage. Le système de navigation du véhicule comprenait un ordinateur de 25 MIPS, mis au point par Sun Microsystems. Des véhicules

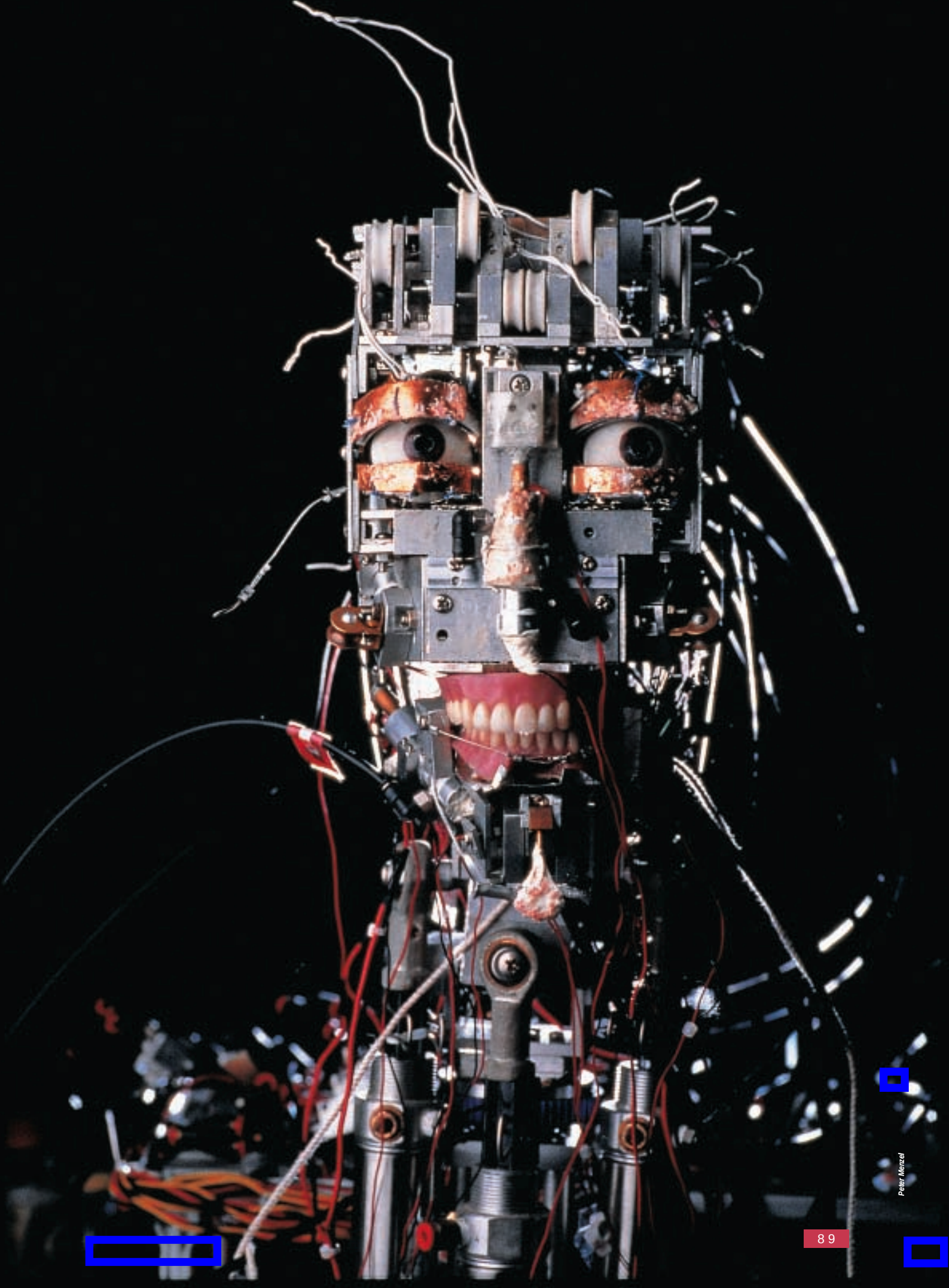
similaires construits par d'autres chercheurs américains, allemands et français, notamment l'équipe du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, à Toulouse, dirigé par Jean-Claude Laprie, ont déjà parcouru des milliers de kilomètres d'autoroutes, dans différentes conditions météorologiques et de circulation.

Récemment, on a également testé des robots mobiles, qui ont exploré des bâtiments où ils se sont ensuite déplacés. Des systèmes de reconnaissance visuelle ont repéré des objets, identifié des visages et analysé leurs changements, en temps réel. Simultanément, on perfectionnait les programmes de reconnaissance du langage écrit et parlé.

Malgré ces progrès, malgré leurs capacités de calcul supérieures, les robots actuels sont inférieurs à l'être humain dans les tâches de reconnaissance et de déplacement. En effet, le cerveau humain n'est pas un ordinateur généraliste, mais un produit de l'évolution. Afin de survivre, nos ancêtres devaient trouver de la nourriture, échapper aux prédateurs, se reproduire et protéger leur progéniture. Seuls ont survécu les individus dont le cerveau était doué pour la reconnaissance de formes et les déplacements. Façonné par des millions d'années d'évolution, le cerveau humain est devenu une sorte d'ordinateur très spécialisé.

Les capacités de calcul étaient sans intérêt pour la survie de l'espèce, mais, à mesure que le langage transformait l'être humain, une petite partie de son cerveau devenait une sorte d'ordinateur généraliste, capable de suivre

**1. AVEC SA FACE MOBILE, ce robot de l'Université des sciences de Tokyo répond aux expressions d'un interlocuteur humain, en l'imitant. Les robots du futur utiliseront ce type de communication non verbale pour interagir plus facilement avec les humains.**



des instructions. Grâce au langage, de telles instructions peuvent être transmises et exécutées.

Cependant, l'être humain manipule toujours les nombres de façon maladroite et peu efficace. Pour calculer, notre cerveau mobilise des centaines de milliards de neurones, et nous mettons plusieurs minutes, là où quelques centaines de neurones, spécialement arrangés et «reconnectés» pour le calcul, font le travail en quelques millisecondes. Une infime proportion de la population naît avec des dispositions exceptionnelles pour le calcul (ces personnes calculent 100 fois plus vite que la moyenne), mais les ordinateurs sont des millions, voire des milliards de fois plus rapides.

Les spécialistes de la robotique essaient de programmer des ordinateurs généralistes pour donner à ceux-ci des performances égales à celles du cerveau humain, spécialisé dans la perception et dans d'autres tâches biologiquement utiles. Pour l'instant, les ordinateurs ne sont pas assez puissants, mais on approche du but.

## Reproduire l'intelligence

Quand je dis que les ordinateurs auront la même perception, la même intelligence et la même pensée que notre espèce, j'affirme implicitement que des systèmes artificiels suffisamment com-

plexes – électroniques, par exemple – peuvent être programmés de sorte qu'ils fonctionnent comme le système nerveux humain. Cette idée est évidemment controversée, même parmi les spécialistes d'intelligence artificielle.

La question fondamentale est de savoir si des structures et des comportements biologiques résultent seulement des lois physiques et si ces lois sont calculables. Je ne vois aujourd'hui aucune preuve d'impossibilité, au contraire.

La biologie moléculaire et les neurosciences découvrent les mécanismes physiques de la vie et, notamment, de la pensée, mais elles n'en sont pour l'instant qu'aux plus simples. Cependant, en combinant des fonctions simples, on obtient les capacités supérieures des systèmes nerveux, comme le montrent les programmes d'ordinateur qui lisent, reconnaissent le langage parlé, guident des bras de robots pour assembler des composants grâce au toucher, classent des composés chimiques avec leur odorat ou leur goût artificiels, raisonnent sur des problèmes abstraits... Si les compétences des ordinateurs et des robots sont encore loin derrière celles des êtres humains ou des animaux, c'est, je crois, parce que les ordinateurs sont limités à l'intelligence des insectes. D'ailleurs, les robots confrontés à des tâches simples se comportent effectivement comme des insectes.

Par exemple, les fourmis suivent des pistes odorantes, mais elles sont complètement désorientées quand les pistes s'interrompent. Les papillons de nuit suivent les phéromones et s'orientent grâce à la lune. De même, les robots suivent des guides sous le sol et s'orientent avec des lasers qui lisent des codes-barres sur les murs.

À mesure que la puissance des ordinateurs augmentera, leurs capacités égalent puis surpasseront celles de divers animaux et, finalement, celles des êtres humains. Si l'on découvrait un jour des capacités mentales inaccessibles aux robots, quelle que soit leur puissance de calcul, on serait face à un problème scientifique passionnant : trouver comment isoler et identifier la capacité fondamentale du cerveau qui manquerait aux ordinateurs. Pour l'instant toutefois, rien n'indique qu'une telle capacité existe.

D'autre part, les lois de la physique semblent être reproductibles par le calcul : on a déjà réussi à simuler des simulations informatiques, à divers degrés d'abstraction et d'approximation, dans des domaines aussi variés que les collisions frontales de voitures ou la physique des particules.

## Le cerveau, plus rapide que l'ordinateur

Quelle puissance les ordinateurs devraient-ils avoir pour simuler le cerveau humain ? Pour l'estimer, examinons la rétine des vertébrés. En comparant la vitesse de traitement d'image de la rétine au nombre d'instructions par seconde nécessaires à un ordinateur pour accomplir une tâche similaire, j'évalue la puissance de traitement de l'information du tissu nerveux et, par extrapolation, du système nerveux humain tout entier.

La rétine humaine, à l'arrière du globe oculaire, a une épaisseur de 0,5 millimètre environ et un diamètre de l'ordre de deux centimètres. Elle est essentiellement constituée de cellules sensibles à la lumière. Sur une épaisseur de 0,1 millimètre, elle comporte aussi des circuits de traitement d'image qui détectent les contours (les différences de contraste) et le mouvement. L'image est découpée en un million de petites portions, chacune étant associée à une fibre du nerf optique, qui effectue environ dix détections de contours ou de mouvements par seconde. Les résultats de



Space Channel/Philip Saunders/Gordon Chapman

**2. AUSSI INTELLIGENTS QUE LES SINGES**, les robots généralistes du XXI<sup>e</sup> siècle seront équipés d'ordinateurs qui traiteront 50 000 milliards d'informations par seconde.

ces «calculs» suivent le nerf optique jusqu'à des zones du cerveau plus profondes.

Mes travaux sur les systèmes de vision des robots m'ont montré que chaque détection de mouvement ou de contour nécessite au minimum l'exécution d'une centaine d'instructions. Par conséquent, pour qu'un ordinateur effectue dix millions de détections par seconde, comme la rétine, sa puissance devait atteindre 1 000 MIPS.

Or, le cerveau humain pèse environ 1 500 grammes, soit 75 000 fois plus que les 0,02 gramme de circuit de traitement de l'information que contient la rétine. Aussi 100 millions de MIPS (soit 100 000 milliards d'instructions par seconde) seraient nécessaires pour des simulations du cerveau humain. Les ordinateurs personnels actuels font mieux que certains insectes, mais ils sont bien moins puissants que la reine humaine ou même que le petit cerveau des poissons rouges. Pour que les performances d'un ordinateur personnel s'approchent de celles du cerveau humain, il faudrait qu'il soit un million de fois plus puissant qu'aujourd'hui.

## Le coût ou la bêtise

La puissance insuffisante des ordinateurs actuels décourage parfois les spécialistes, mais la réalisation d'un cerveau artificiel, calqué sur le modèle humain, n'est pas inaccessible. A prix constant, la puissance de calcul des ordinateurs a doublé tous les deux ans jusqu'en 1980, tous les 18 mois de 1980 à 1990, et tous les ans depuis 1990. À ce rythme, l'écart sera comblé en 30 ou 40 ans. De toute façon, les robots n'ont pas besoin d'atteindre les performances du cerveau humain pour être fonctionnels.

Diverses expériences de robotique ont montré que les capacités mentales d'un poisson rouge (environ 1 000 MIPS) suffiraient à guider des robots mobiles polyvalents, de façon fiable, dans des environnements inconnus. Ils pourraient alors travailler dans des centaines de milliers de sites industriels, puis dans des centaines de millions d'habitations. De tels robots existeront peut-être dans dix ans, mais leur conception résiste depuis si longtemps aux scientifiques que seule une poignée d'équipes s'y consacrent encore.

Environ 10 000 robots mobiles ont été vendus à ce jour. Les plus performants d'entre eux (10 MIPS) ont à peine



**3. DES NAVETTES ROBOTISÉES transportent leurs passagers sur des trajets prédéfinis, en se repérant à des aimants enterrés.**

les capacités d'un insecte. Les entreprises qui les ont fabriqués ont des difficultés financières, quand elles n'ont pas fait faillite. Les fabricants de bras manipulateurs ne se portent guère mieux. Les robots mobiles sont principalement des véhicules guidés automatiquement (VGA), qui transportent des matériaux dans les usines et dans les entrepôts. La plupart se déplacent en suivant des guides enterrés qui émettent des signaux, et ils détectent les obstacles grâce à des capteurs (la technique date des années 1960!).

L'installation de câbles de guidage dans des sols en béton est très coûteuse, et l'itinéraire des robots n'est pas modifiable. Ces robots ne sont donc rentables que dans les grandes usines, dont la structure est figée longtemps. Certains robots, mis au point dans les années 1980, après l'apparition des microprocesseurs, se repèrent grâce à des signaux plus subtils, tels les motifs d'un sol carrelé, et ils utilisent des ultrasons ou des rayonnements infrarouges pour détecter les obstacles et les contourner.

Les robots industriels mobiles les plus perfectionnés, mis au point depuis la fin des années 1980, sont guidés par des balises de navigation temporaires, placées en fonction des besoins (par

exemple, les codes-barres lus par des lasers), et par des éléments architecturaux, tels les murs, les angles, les portes... Ainsi, on modifie facilement les trajectoires des robots. Ces robots auraient de nombreuses applications dans l'industrie pour transporter des charges, nettoyer les sols, surveiller des locaux... si l'installation ou la modification de leur parcours n'était pas si pesante : elle est longue, coûteuse et nécessite l'intervention de spécialistes pour programmer le parcours. Bien que techniquement intéressants, ces robots ne sont économiquement pas viables.

L'analyse des échecs, toutefois, a révélé les conditions du succès des prochains robots. Tout d'abord, le prix doit être proportionné à l'utilité. Les VGA existants, les chariots élévateurs, les machines de nettoyage des sols..., conçus pour être pilotés par des conducteurs humains ou pour se déplacer en suivant des fils de guidage, peuvent être adaptés en vue d'un fonctionnement autonome. D'autre part, l'utilisateur doit pouvoir faire fonctionner les robots sans l'aide d'un spécialiste. Troisièmement, ces robots doivent fonctionner au moins six mois sans rencontrer de problème. Les robots qui se coincent quelque part, se perdent, roulent

## Tous les obstacles sont-ils surmontables ?

À quelle applications les progrès des sciences conduisent-ils ? Ceux qui se sont frottés à cet exercice de divination ont souvent échoué, car ils ne pouvaient pas savoir à l'avance quelles idées novatrices germeraient dans le cerveau d'une poignée de personnes inventives ? Néanmoins, dans certains domaines, comme la robotique, l'histoire de la recherche et l'examen des projets en cours permettent de discerner les tendances futures les plus vraisemblables. Les prévisions sont d'autant plus fiables que les idées à la base des applications à venir existent déjà et que le délai d'apparition et de diffusion de ces applications est faible.

Les grandes lignes des progrès de la robotique décrites par Hans Moravec semblent tout à fait plausibles. Il envisage plusieurs générations successives de robots, qui correspondent aux efforts de recherche actuels. Néanmoins, plusieurs obstacles importants subsistent.

La puissance et la miniaturisation des ordinateurs continueront-elles à croître ? L'épaisseur des traits sur le silicium des microprocesseurs limite leur puissance. Aujourd'hui, on ne sait pas faire de traits de moins de 0,1 micronètre d'épaisseur. De plus, on ne voit pas par quelles méthodes on atteindrait 100 millions de MIPS (ou millions d'instructions par seconde). Les techniques actuelles n'offrent aucun début de solution.

H. Moravec envisage des robots dont l'intelligence serait proche de celle du singe, puis de l'homme. Le singe ressent des émotions, a une personnalité et une vie sociale que les robots n'auront pas. Créer des robots qui auraient à la fois les capacités de raisonnement et de déduction du singe, et une certaine perception de leur environnement serait une grande réussite. Aucune théorie ne laisse espérer qu'on ira plus loin.

À quel rythme les générations de robots se succéderont-elles ? La mise au point de chaque génération prendra sans doute plus d'une dizaine d'années, vu la lenteur des progrès scientifiques et techniques déjà obtenus,

et les coopérations interdisciplinaires nécessaires.

Les ordinateurs personnels ont envahi nos vies, à partir des années 1980. De même, les robots personnels s'imposeront sûrement dans quelques décennies, notamment dans les foyers, mais je m'interroge sur leurs performances. Ils seront probablement spécialisés : ceux qui feront la mayonnaise ne pourront pas promener le chien. Un robot ne serait généraliste que s'il comprenait son environnement, or, on ne sait pas comment programmer cette compréhension. Quand il voit un arbre, un robot ne le reconnaît pas en tant que tel, car il ne sait pas généraliser. Il passe en revue tous les objets qu'il a en mémoire et ne reconnaît l'arbre que si l'un des arbres mémorisé lui ressemble. Comme il existe toutes sortes d'arbres, il ne le reconnaîtra pas à coup sûr. Ainsi, ce qu'on sait faire théoriquement (un robot qui sait reconnaître un arbre), c'est-à-dire dans son environnement et avec des objets connus à l'avance, n'est pas toujours réalisable en pratique. Aujourd'hui, un robot peut faire une action ordonnée, mais il ne sait pas trouver seul l'enchaînement des actions nécessaires à l'exécution d'une tâche un peu complexe : si on demandait à un robot de passer un pot de fleur à quelqu'un, il devrait savoir qu'il faut d'abord marcher en direction du pot, le reconnaître, s'en saisir, identifier la personne à laquelle il doit le donner, l'apporter vers elle, puis lui donner.

Au siècle prochain, l'intelligence des robots augmentera, mais je ne crois pas qu'ils comprendront correctement tout le langage naturel ni qu'ils comprendront parfaitement leur environnement. Leurs capacités à généraliser seront probablement limitées.

On combinera peut-être des tissus biologiques, par exemple des rétines animales, à des microprocesseurs, dans des biorobots. On pourrait ainsi doter les robots de capacités qu'on ne sait pas programmer.

Philippe COIFFET,

Laboratoire de Robotique de Paris

sur les pieds des employés ou tombent dans les escaliers, même après un mois de fonctionnement irréprochable, n'intéressent personne. Après six mois, en revanche, on trouve normal qu'un robot ait besoin d'un jour de « congé maladie ».

Certains robots fonctionnent très bien depuis des années. On améliore sans cesse leurs performances, par programmation, en remédiant aux défaillances les plus fréquentes : progressivement, ces machines fonctionnent sans fautes. Toutefois, pour l'instant, on n'a obtenu une telle fiabilité que sur des itinéraires fixés à l'avance. Une puissance de 10 MIPS, correspondant aux capacités intellectuelles d'un insecte, suffit tout juste pour que le robot suive quelques points de repère soigneusement choisis, sur chaque portion du trajet. Ces robots sont facilement dérivés : par de minimes changements de l'emplacement des codes-barres ou par l'encombrement d'un couloir. Ils sont comme les fourmis qui perdent leur piste quand celle-ci s'interrompt ou comme les papillons de nuit qui confondent la lueur d'un réverbère avec la Lune.

### Où mettre les pieds ?

Des robots qui dressent eux-mêmes leur itinéraire sont apparus au milieu des années 1990, quand la puissance des microprocesseurs a atteint 100 MIPS. Ils relisent des cartes à deux dimensions de leur environnement, avec un sonar ou un laser, afin de se repérer et de se déplacer. Les plus performants circulent dans des couloirs de bureaux pendant plusieurs jours, sans se perdre. On est encore loin du fonctionnement pendant six mois, car les cartes qu'ils utilisent sont trop rudimentaires : ils ne distinguent pas un lieu d'un autre, à coup sûr, ne reconnaissent pas un même lieu quand ils le voient d'une hauteur de 50 centimètres ou de un mètre, si bien que de petits obstacles leur échappent. Néanmoins, les détecteurs et les ordinateurs de leur cerveau font tant de progrès qu'on devrait bientôt résoudre ce problème.

Dans les années 1980, mes collègues et moi-même avons mis au point une méthode de traitement de grandes quantités de signaux bruyants pour en faire des cartes fiables (à deux dimensions) : on accumule des données statistiques pour chaque portion de l'espace, afin de

déterminer si elle est occupée ou vide. Plusieurs robots mentionnés précédemment ont mieux fonctionné grâce à cette méthode.

Les cartes en trois dimensions seraient beaucoup plus efficaces que les cartes en deux dimensions, mais elles étaient jusqu'ici hors de portée de nos ordinateurs. En 1992, nous avons utilisé différentes astuces pour réduire d'un facteur 100 le coût des cartes en trois dimensions. Nous avons réalisé un programme qui accumule des milliers de mesures, effectuées par des caméras stéréoscopiques, et qui dresse ainsi le plan d'une pièce au centimètre près. Exécuté par un processeur qui effectue 1 000 MIPS, le programme analyse un « coup d'œil » par seconde, ce qui est suffisant pour un déplacement lent en intérieur.

## Des robots qui retrouvent leur chemin

Pour l'instant, les microprocesseurs de 1 000 MIPS n'équipent que les ordinateurs haut de gamme. Dans quelques années, ils équiperont les portables et les petits ordinateurs bon marché, adaptés aux robots. Pour nous préparer à cette évolution, nous cherchons à mettre au point un prototype de robot commercial qui contiendra ce genre d'ordinateur. Nous voulons automatiser les processus d'apprentissage, afin d'optimiser les centaines de paramètres contenant des données pertinentes pour la vision. Nous avons prévu d'écrire des programmes qui déterminent les itinéraires possibles, la position des objets, des sols, des murs, des portes... à partir des cartes en trois dimensions. Nous testerons aussi des programmes plus performants, qui se chargent des livraisons, du ménage, de la surveillance, par exemple.

Nous commenceront avec un petit robot mobile doté d'une multitude de caméras. Deux ordinateurs le feront fonctionner : un *Apple iBook* embarqué et une machine dérivée d'un *Apple G4*, de 1 000 MIPS environ, qui communiquera sans fil avec le *iBook*. De minuscules caméras numériques, produites en série par les techniques de la micro-électro-

nique, seront certainement le moyen le plus économique pour faire les millions de mesures nécessaires à la réalisation de cartes de haute résolution.

Nous envisageons ensuite d'équiper des véhicules industriels avec notre système de navigation, que nous voulons réduire à la taille d'un ballon. Il comporte plusieurs caméras stéréoscopiques, des logiciels de cartographie, de reconnaissance et de commande, un programme spécifique à l'application visée (par exemple, le nettoyage du sol) et des connexions physiques avec les détecteurs, les commandes et l'alimentation du véhicule. Les véhicules équipés de ce système de navigation apprendront de nouveaux itinéraires très facilement : on devra seulement les accompagner une fois ; pour les robots de nettoyage des sols, on leur montrera les limites de leur zone de travail.

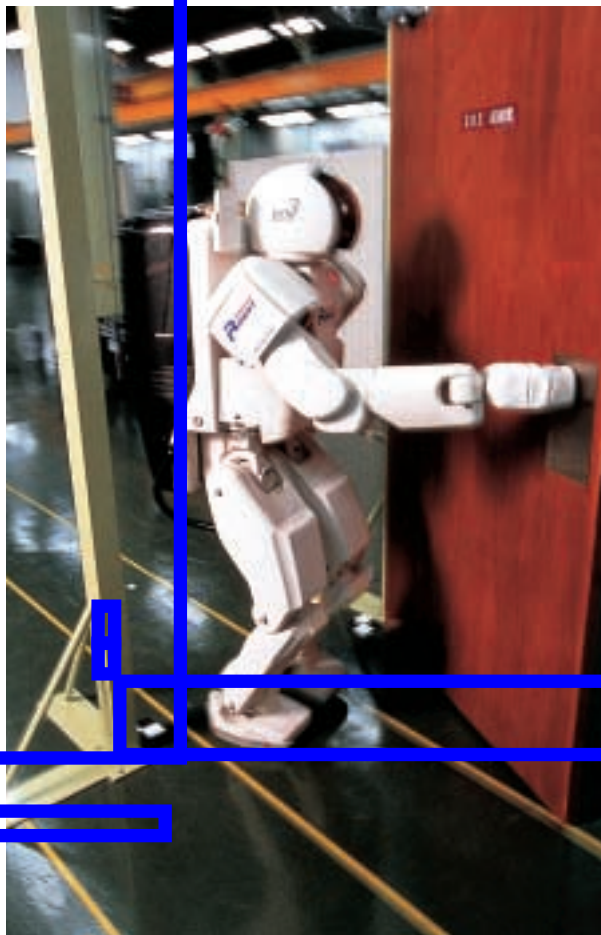
Une fois dans leur lieu de travail, ces robots tiendront compte des éventuelles modifications de l'environnement. Ils travailleront ainsi pendant plusieurs mois sans faire d'erreur grave. Des dizaines de milliers de VGA,

des centaines de milliers de machines de nettoyage et un million de chariots élévateurs pourront être équipés de la sorte. Le marché robotique s'élargira considérablement.

## La fin du travail humain

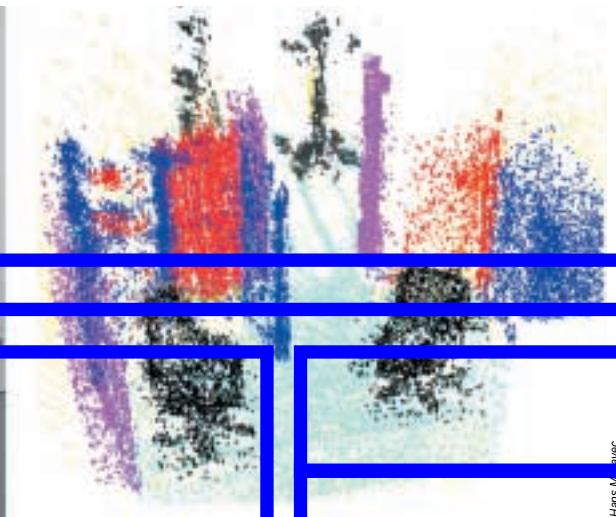
Grâce à l'entrée de ces robots industriels, les sociétés de robotique pourront investir dans la recherche de nouveaux robots plus intelligents et meilleur marché pour le grand public. Par exemple, des robots aspirateurs trouveront tout seul leur chemin dans la maison, afin de nettoyer les pièces si occupées et les endroits sales. Ils se faufileront sous les meubles, auront une brosse extensible et rejoindront eux-mêmes leur poste de recharge, où ils pourront, le plus, se débarrasser de la poussière qu'ils auront accumulée. Le marché potentiel de telles machines est considérable.

Après les premiers succès commerciaux, la concurrence industrielle favorisera les progrès ; le rythme des investissements pour la recherche, la conception et la fabrication de ces robots s'accéléra. Des aspirateurs intelligents, on passera à des robots plus performants, équipés de bras d'assemblage, de ramassage et de ramassage, suivis de robots multifonctions dont les capacités seront encore supérieures, avec des bras plus forts, plus agiles, et de meilleurs détecteurs. Ces machines ramasseront les affaires qui traînent, feront du rangement, retrouveront et livreront des objets, feront des inventaires, surveilleront les maisons, ouvriront les portes, tondront la pelouse, joueront avec les enfants... De nouvelles applications entraîneront à leur tour de nouveaux progrès en termes d'agilité, de précision, de force, de vitesse, de dextérité, d'habileté ou de capacité de traitement des robots. Le volume de production, le nombre de ventes, la qualité de la conception et de la fabrication, la rentabilité se renforceront mutuellement. Dès 2010, on disposera peut-être des premiers robots généralistes, de taille humaine, aussi intelligents que les lézards (5 000 MIPS),



Peter Menzel

4. LE ROBOT P<sub>3</sub> est l'un des plus performants du monde. Il sait marcher, monter et descendre les escaliers, mais son autonomie n'est que de 25 minutes. Il a été construit par la Société Honda.



Hans Moravec

**6. LES SYSTÈMES DE VISION des robots les plus perfectionnés établiront des plans en trois dimensions (au centimètre près) des pièces où ils se trouvent, pour s'y repérer et s'y déplacer. À droite, ce plan a été réalisé à l'aide de 20 caméras stéréoscopiques.**

ce qui suffira largement à la programmation des tâches simples.

Comme des reptiles gouvernés par leur instinct, ces robots de première génération ne fonctionneront correctement que dans les situations explicitement envisagées par leurs programmes. Ils ne s'adapteront pas aux changements de circonstances et rempliront leurs fonctions de façon médiocre. Néanmoins, tant de travaux les attendent dans les entreprises, dans les rues, dans les champs et dans les foyers que le chiffre d'affaires de la robotique pourrait être rapidement supérieur à celui de l'informatique.

La seconde génération de robots généralistes, aussi intelligents que les souris (100 000 MIPS), s'adaptera aux changements et sera même capable d'apprendre. Outre leurs programmes d'application, les robots seront dotés de systèmes d'autoperfectionnement, qui communiqueront des signaux positifs ou négatifs selon les performances : par exemple, l'exécution rapide d'une tâche ou la recharge des batteries à temps suscitera une sorte de récompense ; le bris d'un objet, une punition. Grâce à ces évaluations, les robots changeront leur fonctionnement afin d'éviter les punitions et d'être récompensés. Lentement mais sûrement, les robots de la deuxième génération apprendront à travailler de mieux en mieux.

Les robots de la troisième génération auront une intelligence proche de celle du singe (cinq millions de MIPS) : ils apprendront très vite, car ils s'instruiront à partir de répétitions mentales, s'appuyant sur des simulations où interviendront des facteurs physiques (la

forme, le poids, la force, la texture, l'apparence des choses, la façon de les manipuler, culturels (le nom des choses, leur valeur, leur emplacement normal et leur fonction) et psychologiques (les objectifs, les croyances, les sentiments et les préférences). La mise au point des simulateurs nécessitera des milliers de programmeurs et de robots cobayes. Le robot simulera les événements qui se produisent dans son environnement, puis ajustera les simulations pour les rendre conformes à la réalité. Il acquerra une nouvelle compétence par imitation, ce qui se traduira par une sorte de conscience. Si on lui demande pourquoi il y a des bougies sur la table, un robot de troisième génération consultera ses simulations de maison, de propriétaire et de lui-même. Puis il répondra qu'il les y a mises parce que son maître aime les dîners aux chandelles et qu'il aime faire plaisir à son maître. Si on lui pose des questions plus approfondies, ses réponses mettront en évidence une vie mentale rudimentaire, tournant autour de situations concrètes et de personnes côtoyées dans le cadre de son travail.

Les robots de quatrième génération (100 millions de MIPS) seront intellectuellement très proches de l'espèce humaine. Ils feront des raisonnements abstraits et des généralisations. On les construira en équipant des robots de troisième génération de puissants programmes de raisonnement. Ceux-ci seront les descendants des programmes actuels de démonstration de théorèmes et de systèmes experts, qui imitent le raisonnement humain pour faire des diagnostics médicaux, établir les horaires de trains, prendre

des décisions financières, configurer des systèmes informatiques, analyser des données sismiques afin de localiser des gisements de pétrole...

Bien éduqués, ces robots seront très efficaces. Je suis même persuadé qu'ils arriveront à faire mieux que les êtres humains dans tous les domaines, intellectuel et physiques. Une restructuration en profondeur de notre société s'imposera. Les entreprises utiliseront des robots et nos descendants auront toute la journée pour se consacrer à des activités sociales, artistiques et à des loisirs.

Telle que je l'ai décrite, l'évolution des robots sera dix millions de fois plus rapide que celle de l'espèce humaine. À ce rythme, les robots seront plus intelligents que nous bien avant 2050. Les scientifiques seront alors des robots, parfaitement instruits. Ils travailleront avec précision et rapidité. Leur efficacité ne cessera de s'améliorer. En 2050, l'essentiel des connaissances scientifiques aura été découvert par notre progéniture artificielle.

Hans MORAVEC travaille à l'Institut de robotique de l'Université Carnegie Mellon.

Valentino BRAITENBERG, *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*, MIT Press, 1984.

Daniel CREVIER, *AI : The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, Basic Books, 1993.

Hans MORAVEC, *Robot : Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford University Press, 1999.



# L'Empire de la constante un

IAN STEWART

*La protection efficace d'un empire requiert de solides connaissances en mathématiques.*

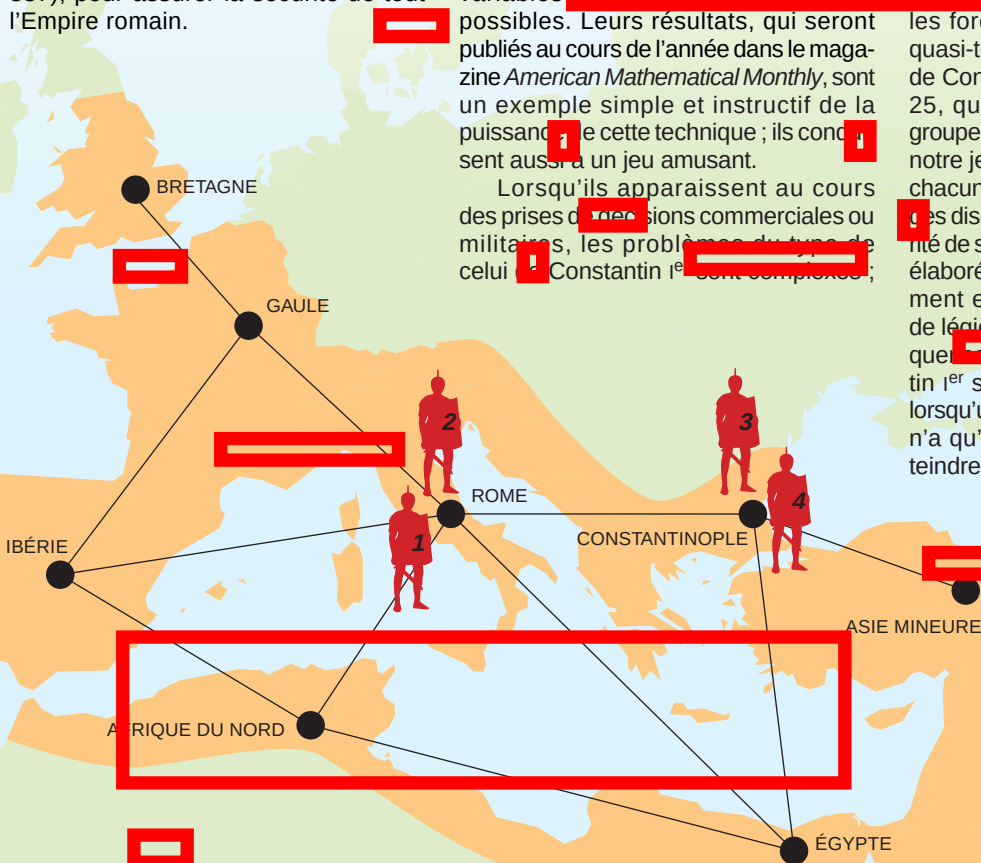
**P**endant la Seconde Guerre mondiale, le général Douglas MacArthur (1880-1964) commandait les forces du Pacifique Sud contre les Japonais. Il ne déplaçait ses troupes d'une île à une île voisine que lorsqu'il avait assez d'hommes pour laisser sur l'île qu'il quittait une garnison suffisante pour la défendre en cas d'attaque. Cette stratégie était déjà employée il y a 16 siècles par l'empereur Constantin I<sup>er</sup>, dit le Grand (270-337), pour assurer la sécurité de tout l'Empire romain.

Constantin I<sup>er</sup> avait choisi de placer deux groupes de légions à Rome et deux groupes de légions à Constantinople, la nouvelle capitale qu'il venait de donner à l'Empire : existe-t-il des déploiements de troupes plus efficaces ? En 1997, Charles ReVelle, de l'Université John Hopkins, et Kenneth Rosing, de l'Université Erasme de Rotterdam, ont étudié le problème de Constantin I<sup>er</sup> grâce à une technique qui transforme le problème en un problème de variables booléennes, c'est-à-dire des variables qui n'ont que deux valeurs possibles. Leurs résultats, qui seront publiés au cours de l'année dans le magazine *American Mathematical Monthly*, sont un exemple simple et instructif de la puissance de cette technique ; ils conduisent aussi à un jeu amusant.

Lorsqu'ils apparaissent au cours des prises de décisions commerciales ou militaires, les problèmes du type de celui de Constantin I<sup>er</sup> sont complexes ;

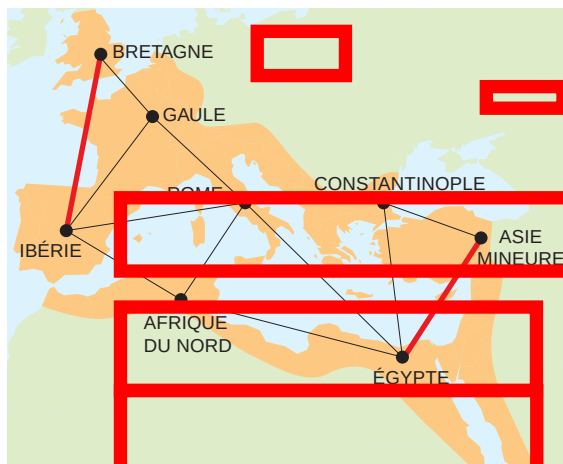
aussi, pour nous exercer, nous nous limitons d'abord à une carte simplifiée de l'Empire romain (voir la figure 1). Au début du IV<sup>e</sup> siècle, l'autorité de Constantin I<sup>er</sup> s'étendait sur les deux rives de la Méditerranée, de l'Asie Mineure (la Turquie et la Syrie actuelles) à la Bretagne (l'Angleterre et le Pays de Galles). Divisons cette zone d'influence en huit régions, représentées chacune par un disque noir (Rome, l'Asie Mineure, etc.) et reliées par des routes (segments).

Au I<sup>er</sup> siècle, fortes de 50 légions, les forces impériales régnaient sur la quasi-totalité de l'Europe. Sous le règne de Constantin I<sup>er</sup>, elles ne sont plus que 25, que l'empereur organise en trois groupes de six légions et un de sept. Dans notre jeu, les groupes sont représentés chacun par un jeton que l'on pose sur l'un des disques noirs. Pour optimiser la sécurité de son empire, Constantin I<sup>er</sup> a d'abord élaboré quelques lois simples de déploiement et de déplacement des groupes de légions, puis il en a inféré des conséquences stratégiques. Les lois de Constantin I<sup>er</sup> sont : une région est en sécurité lorsqu'un jeton l'occupe ou quand un jeton n'a qu'un mouvement à faire pour la atteindre, c'est-à-dire lorsqu'il est à l'est.



1. L'Empire romain du IV<sup>e</sup> siècle est divisé en neuf régions représentées chacune par un disque noir et reliées par des routes (segments). Les silhouettes (en rouge) indiquent l'emplacement des groupes de légions choisis par Constantin I<sup>er</sup>. Dans la matrice (à droite), qui est une représentation algébrique du problème, la présence d'un groupe dans une région est notée par le chiffre 1, l'absence par le chiffre 0.

|                 | ÉGYPTE | BRETAGNE | CONSTANTINOPLE | AFRIQUE DU NORD | ASIE MINEURE | IBÉRIE | GAULE | ROME |
|-----------------|--------|----------|----------------|-----------------|--------------|--------|-------|------|
| ÉGYPTE          | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| BRETAGNE        | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| CONSTANTINOPLE  | 0      | 0        | 1              | 1               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| AFRIQUE DU NORD | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| ASIE MINEURE    | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| IBÉRIE          | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| GAULE           | 0      | 0        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |
| ROME            | 1      | 1        | 0              | 0               | 0            | 0      | 0     | 0    |



## 2. Deux voies supplémentaires compliquent le problème de Constantin<sup>1er</sup> parce qu'elles augmentent le nombre de possibilités de déploiements des groupes de légions.

une région adjacente ; un jeton ne peut quitter une région que lorsqu'un autre jeton reste sur la région.

Muni de ces lois, comment disposer les quatre jetons afin de protéger soit tout l'Empire, soit la plus grande partie de celui-ci ? Avec la solution choisie par Constantin<sup>1er</sup> (deux groupes sont stationnés à Rome et deux groupes sont à Constantinople), la Bretagne n'est pas en sécurité, car il faut au moins quatre mouvements pour l'atteindre : par exemple, un groupe se déplace de Rome en Gaule, un autre part de Constantinople pour Rome, puis continue vers la Gaule et enfin vers la Bretagne (la Gaule semble avoir été plus importante pour l'Empire que la Bretagne, territoire distant, froid et humide).

**C**omment améliorer la stratégie de Constantin<sup>1er</sup> ? Toutes les régions peuvent être protégées avec au plus un mouvement si l'on place deux jetons à Rome, un en Bretagne et un en Asie Mineure. Pourtant, bien que cette solution protège bien Rome (deux groupes de légions), Constantin<sup>1er</sup> ne l'a pas retenue, peut-être parce qu'il craignait un affaiblissement de l'Empire en cas de troubles sur deux fronts différents : un seul mouvement de troupes de Rome vers une autre région est possible, aucun second déplacement n'est permis.

Le problème se complique (voir la figure 2) quand deux nouvelles voies relient respectivement l'Ibérie à la Bretagne et l'Égypte à l'Asie Mineure. La solution améliorée protège toujours l'Empire tout entier avec un seul mouvement au plus. Cependant, les nouvelles connexions autorisent d'autres mouvements et je vous propose de chercher d'autres solutions (nous résoudrons le problème en fin d'article).

Pour étudier ce type de problèmes dans des cas réels, donc complexes, on

utilise des programmes informatiques fondés sur une formalisation algébrique. Dans une de ces formalisations, on établit un tableau, ou matrice, dont les lignes correspondent aux régions et les colonnes aux jetons. La matrice du problème de Constantin<sup>1er</sup> a donc quatre colonnes et huit lignes. On note la présence d'un jeton dans une région par le chiffre 1, son absence par le chiffre 0 (voir la figure 1). Les stratégies sont alors des règles de transformation des coefficients de la matrice. Les problèmes de ce type sont nommés problèmes à

variables booléennes, car les variables n'ont que deux valeurs possibles : zéro ou un. Sans considérer les détails techniques, notons que la méthode de C. Revelle et de K. Rosing divise le problème en deux. Dans le premier, on ignore la contrainte de quatre jetons et l'on cherche le nombre minimal de jetons pour assurer la sécurité de toutes les régions en un mouvement au plus. Lorsque la réponse est supérieure à quatre, le problème de Constantin<sup>1er</sup> est sans solution. Puis le programme cherche le plus grand nombre de régions que l'on peut protéger en un mouvement au plus avec quatre jetons.

Les deux problèmes encadrent celui de Constantin<sup>1er</sup> et indiquent d'une part l'existence d'une solution avec quatre pièces (dans notre exemple, elle existe) et, d'autre part, la possibilité de recourir à moins de jetons (dans notre exemple, c'est impossible). Elles résolvent ainsi n'importe quel problème de déploiement de ce type. Pour la seconde version du problème de Constantin<sup>1er</sup>, il existe six solutions (le nombre de jetons à placer dans la région citée est indiqué entre parenthèses) :

1. Ibérie (2) ; Égypte (2).
2. Ibérie (2) ; Constantinople (2).
3. Ibérie (2) ; Asie Mineure (2).
4. Bretagne (1) ; Rome (1) ; Asie Mineure (2).
5. Bretagne (2) ; Égypte (2).
6. Gaule (2) ; Égypte (2).

En 407, les successeurs de Constantin<sup>1er</sup> ont perdu la Bretagne. Cette perte ne s'explique certainement pas par notre modèle simple, mais on ne peut s'empêcher de penser qu'avec de meilleures connaissances en mathématiques, Constantin<sup>1er</sup> aurait été meilleur stratège et l'Empire romain aurait duré un peu plus longtemps !

## Ce magazine vous intéresse !



### Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actuelles
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral de conférences et séminaires
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la Découverte

### Je vous pris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA  
**DÉCOUVERTE**

### Je joins mon règlement pour passer à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE  
(CEP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)  
Tarif étranger : 200 F  
par mandat international uniquement  
(par avion, supplément de 80 FF)  
Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

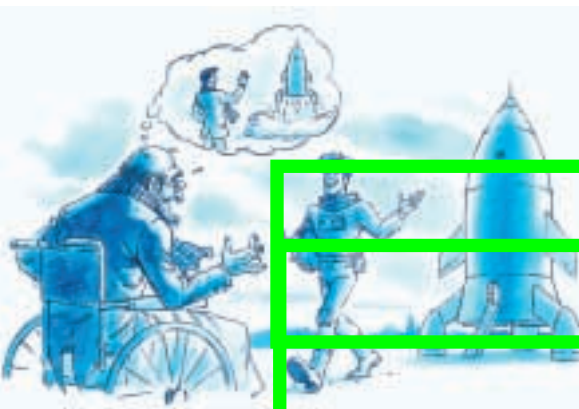
.....

Ville : .....

Code postal : .....

Profession : .....

à retourner avec votre règlement à  
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE  
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.  
Tél. : 01 40 74 80 0



# Des tunnels dans l'espace-temps

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-PHILIPPE UZAN

*En déformant l'espace-temps, un vaisseau pourrait se déplacer «plus vite que la lumière» par rapport aux étoiles lointaines, sans violer la relativité générale.*

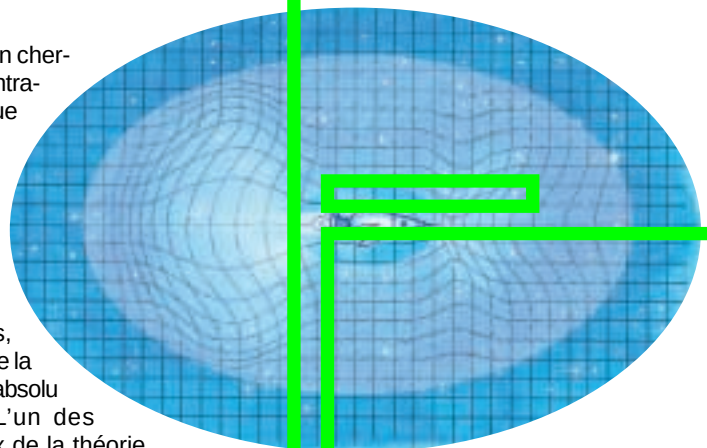
**S**ans voyage supraluminique, comment rendre crédible une saga galactique dont les personnages se déplacent sur 100 000 années-lumière? La science est pourtant formelle : pas moyen de dépasser la vitesse de la lumière. Alors, sommes-nous définitivement contraints à une vitesse d'escargot?

Le voyage vers les étoiles paraît ardu quand on songe aux distances colossales qui nous séparent des astres les plus proches. Réduisons le Soleil, dont le diamètre est de 1,4 million de kilomètres, à la taille d'une bille d'un centimètre de diamètre. À cette échelle, la Terre n'est qu'un point d'imprimerie, d'un dixième de millimètre, en orbite à environ un mètre de notre bille. Pluton, la plus lointaine planète du Système solaire, est alors à 42 mètres de la bille et l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, distante de 4,3 années-lumière du Soleil, en est éloignée de 292 kilomètres. À l'évidence, le franchissement de telles distances nécessitera des moyens de déplacement rapides...

La difficulté d'un tel voyage réside en la limite de la vitesse de déplacement.

En 1905, Albert Einstein cherchant à résoudre les contradictions entre la physique galiléenne, où les vitesses s'ajoutent, et l'électromagnétisme de James Maxwell, où les ondes lumineuses se déplacent toujours à la vitesse de la lumière, ni plus ni moins, postule que la vitesse de la lumière est un invariant absolu et infranchissable. L'un des aspects fondamentaux de la théorie d'Einstein en découle : le temps n'est pas absolu et dépend du mouvement de

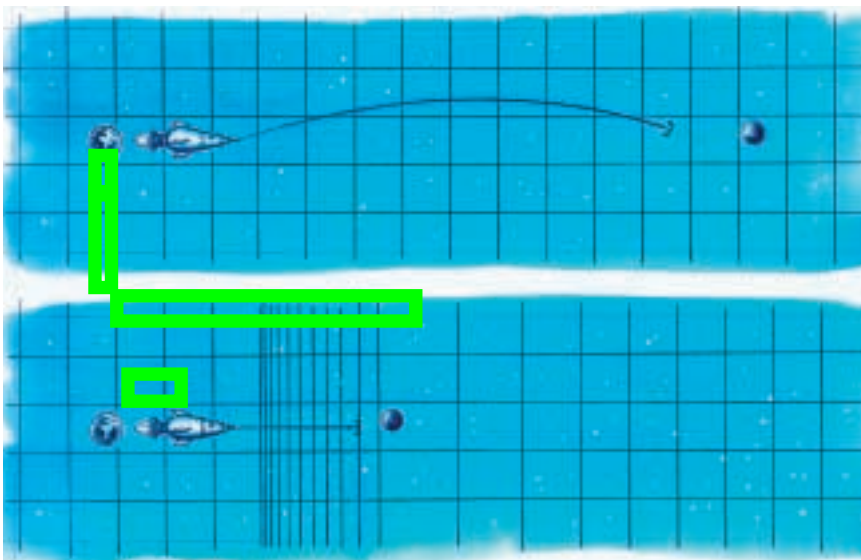
celui qui le mesure. Vu de la Terre, un vaisseau spatial voyageant à une vitesse inférieure de 0,005 pour cent de celle de la lumière atteindra Proxima du Centaure en à peine plus de 4,3 ans. Pour atteindre Deneb, l'étoile la plus brillante de la constellation du Cygne distante de 1 630 années-lumière, il faudra compter un peu plus de 1 630 ans. Toutefois, la durée du voyage Terre-Deneb mesurée par les passagers



Bulle d'espace-temps

du vaisseau n'est que de 16,3 ans, c'est-à-dire 100 fois inférieure à la durée mesurée par un observateur resté sur Terre. Le déplacement à une vitesse proche de celle de la lumière résout donc le problème du voyageur qui souhaite atteindre sa destination en un temps raisonnable, de son point de vue, mais pas de celui des personnes qui attendent son retour sur Terre (à condition toutefois de trouver un moyen de propulsion efficace).

Dans sa seconde théorie de la relativité, dite relativité générale, élaborée en 1915, Einstein montre comment la présence de matière modifie l'espace-temps. Dans cette théorie, l'espace-temps devient une entité déformable et les corps s'y déplacent d'un point à un autre en suivant une trajectoire de plus court chemin. Par exemple, dans un espace-temps courbé par un objet massif, la trajectoire d'un corps lancé ou d'un rayon lumineux épouse la courbure de l'espace-temps. Augmenter la vitesse n'est alors plus le seul moyen pour diminuer le temps de parcours, qu'il soit mesuré par un observateur terrestre immobile ou par le voyageur : avec un espace-temps élastique, on peut aussi diminuer la distance à parcourir. Pour ce faire, il «suffit» de déformer l'espace-temps. En imaginant un espace-temps élastique, on peut imaginer rapprocher de nous,



Dessins de Bruno Vacaro

Contraction de l'espace-temps.

non pas Deneb elle-même, mais l'espace-temps qui l'entoure. Ainsi, le trajet de la Terre à Deneb peut prendre un temps aussi court que voulu, en rétrécissant suffisamment l'espace-temps de la Terre et celui de Deneb. Est-ce envisageable dans le cadre de la physique actuelle ?

## SURF SUR BULLE

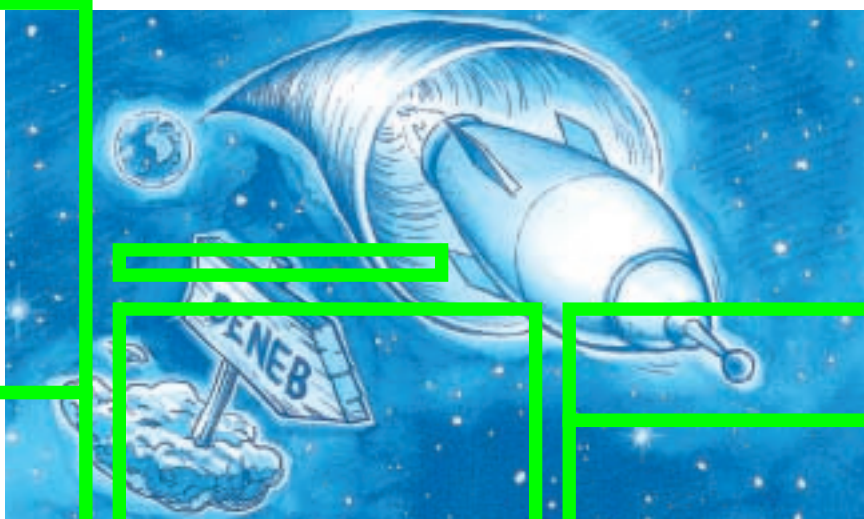
En 1994, le physicien britannique Miguel Alcubierre a proposé une méthode de déplacement originale. Fondée sur une solution des équations de la relativité générale, elle décrit une bulle en mouvement sans modification de l'espace extérieur situé à grande distance : l'espace-temps est contracté juste devant la bulle et dilaté juste derrière. En effet, si l'espace se dilate derrière le vaisseau, le lieu que vous venez de quitter se trouve soudain loin derrière ; de même si l'espace se contracte devant vous, votre objectif est rapproché d'autant.

Cette bulle transporte le contenu de son espace-temps intérieur à des vitesses qui peuvent être supérieures à celle de la lumière du point de vue d'un observateur lointain et extérieur à la bulle, alors que, *localement*, le voyageur ne se déplace jamais plus vite que la vitesse de la lumière. Le vaisseau est ainsi transporté à la manière d'un surfeur sur une vague : bien que la vague se déplace, le surfeur reste quasi immobile par rapport à la vague, mais pas par rapport à la plage. De la même façon, le vaisseau est entraîné à grande vitesse par rapport aux étoiles lointaines.

Il subsiste une différence notable : la vitesse du surfeur est imposée par le déplacement de la vague, limité par les lois de l'hydrodynamique ; pour notre vaisseau dans une bulle, rien de tel, car les lois de la relativité générale ne s'applique que localement et ne limitent pas la vitesse de déplacement de la bulle, à condition d'y mettre l'énergie nécessaire. Notre bulle d'espace-temps peut ainsi se mouvoir aussi vite que l'on veut, 100, 1 000 ou un million de fois plus vite que la lumière.

Cependant, hors toute considération d'énergie, notre bulle a un défaut dans sa cuirasse : le physicien russe Sergueï Krasnikov a noté que la déformation de l'espace-temps est telle qu'un signal lumineux envoyé par le voyageur situé au centre de la bulle n'atteint jamais sa surface. De l'intérieur de la bulle, il est donc impossible d'exercer une influence sur cette dernière et, en particulier, on ne peut ni la créer ni l'arrêter à partir du vaisseau.

Pour remédier à cette difficulté, S. Krasnikov a imaginé un «métré supraluminique». Partant de la Terre, un vaisseau déforme l'espace-temps dans son sillage, à mesure qu'il progresse vers sa destination à vitesse subluminaire. Au cours



Formation d'un tube de Krasnikov

de ce voyage, il laisse derrière lui un tube où l'espace-temps est déformé. Son but atteint, le vaisseau retourne sur Terre en empruntant le tube créé à l'aller. Pour un observateur terrestre, le vaisseau peut arriver à un instant arbitrairement proche de son instant de départ, sans toutefois pouvoir revenir avant d'être parti. Le voyageur, quant à lui, mesurera un temps de parcours qui sera d'autant plus court qu'il se déplacera à une vitesse proche de celle de la lumière. En ajustant la déformation de l'espace-temps mise en œuvre lors du voyage aller, le voyageur peut même rendre le temps de voyage mesuré par un observateur terrestre égal par lui-même à zéro ! Du point de vue terrestre, le tube de Krasnikov est analogue à un tunnel qui permet de remonter le temps : le vaisseau part de la Terre, met 1 600 ans pour rejoindre Deneb, puis revient juste après son moment de départ, comme s'il avait remonté le temps lors du retour.

## UNE MACHINE TEMPORELLE

Pourrait-on aller encore plus vite que ce déplacement instantané du point de vue de l'observateur terrestre ? Reprenons notre vaisseau au retour de Deneb qui, au lieu d'emprunter le tube créé à l'aller, construit un second tube allant en sens opposé. Le voyage aura duré 32,6 ans en temps du vaisseau et 3 260 années terrestres. Un voyageur malin empruntant le deuxième tube pour aller vers Deneb puis le premier pour retourner sur Terre arrivera 3 260 années terrestres avant sa date de départ ! Avec deux tubes de Krasnikov joignant deux points dans deux directions opposées, il est en principe possible de voyager dans le temps et donc de violer le principe de causalité, imposé par la logique (les physiciens résolvent ce

paradoxe en estimant que la création d'une telle machine temporelle engendrerait des fluctuations quantiques qui détruiraient les tubes).

En théorie, le physicien dispose donc d'un moyen de déplacement rapide, mais est-ce envisageable en pratique ? La dilatation de l'espace-temps nécessite l'utilisation de matière exotique qui, contrairement à la matière ordinaire, aurait une énergie négative. Conséquence : au lieu de contracter l'espace-temps comme la matière que nous connaissons, la matière exotique le dilate. De nombreux cosmologistes pensent que, lors de son évolution précoce, l'Univers a subi une phase d'expansion accélérée au cours de laquelle son contenu en matière était dominé par une telle matière exotique. Par ailleurs, des observations récentes indiquent que l'expansion de notre Univers s'accélère. Comme la matière ordinaire d'énergie positive a tendance à ralentir l'expansion, une accélération de l'expansion n'est explicable que s'il existe une quantité non négligeable de matière exotique, cachée comme son nom l'indique, aux confins de l'Univers. Comme quoi, le métré interstellaire est peut-être pour bientôt...

**Roland LEBOUCQ** est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA et Jean-Philippe UZAN, chargé de recherche au CNRS, travaille au Laboratoire de physique théorique de l'Université d'Orsay.

**M. ALCUBIERRE**, *The Warp Drive, in Classical and Quantum Gravity*, vol. 11, L73-L77, 1994.

**S. V. KRASNIKOV**, *Hyperfast Interstellar Travel in General Relativity*, in *Physical Review*, D 57, 4760, 1998.

**J.-P. LUMINET**, *Trou noir*, édition du Seuil, collection Points Sciences.





Le coffre de HMS Titanic

# La cryptographie RSA vingt ans après

JEAN-PAUL DELAHAYE

*Comme tout le monde, par l'intermédiaire du système RSA quasi universel, vous utilisez des nombres premiers pour payer vos achats.*

Le système de cryptage RSA a été inventé en 1977 par Ron Rivest, Adi Shamir et Len Adleman (dont les initiales forment RSA). Ces trois auteurs avaient décidé de travailler ensemble pour établir un nouveau système de codage révolutionnaire, dénommé «système à clef publique» que W. Diffie et M. Hellman venaient d'inventer, était une impossibilité logique (autrement dit, que tout système de cryptage de cette nature présentait des failles). Ils ne réussirent pas dans leur projet mais, au contraire, découvrirent un nouveau système à clef publique qui supplanta vite celui de W. Diffie et M. Hellman.

Nous expliquerons le fonctionnement du système RSA en gardant en tête une dissymétrie qui sous-tendra notre compréhension : il est facile (une seule opération) de multiplier deux nombres premiers ayant un nombre important de chiffres, 100 pour fixer les idées, et il est

très difficile de déterminer les facteurs premiers d'un autre nombre de cette taille. Si l'on s'y prend naïvement, il faut diviser ce nombre par beaucoup de nombres plus petits et déterminer le reste : si celui-ci est nul, on a déterminé ainsi un diviseur. Les mathématiciens ont mis au point des méthodes plus rapides que les divisions successives, mais le nombre d'opérations à effectuer reste considérable pour des nombres de cette taille importante. Ainsi il est actuellement impossible, pour des nombres appartenant à certaines catégories, de «factoriser» ceux de plus de 200 chiffres, même avec les ordinateurs les plus rapides et les algorithmes les plus performants.

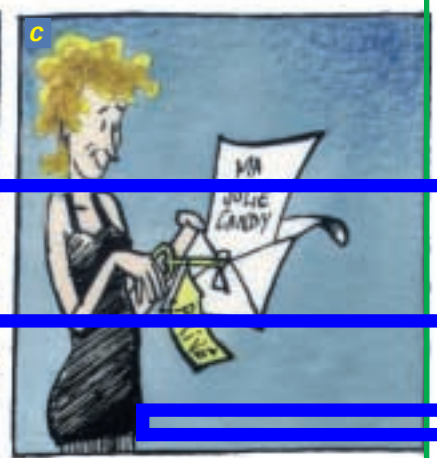
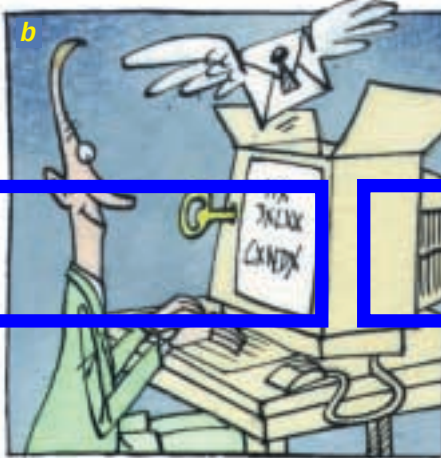
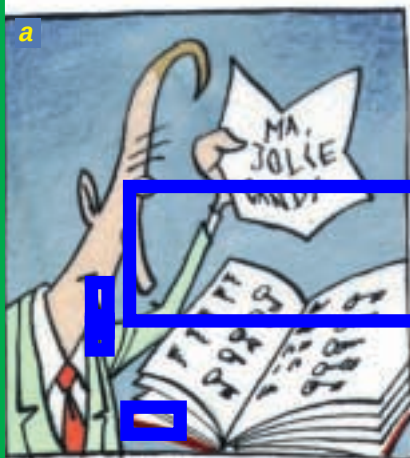
Le système RSA est utilisé à la fois pour crypter des messages et pour les signer. Le message est envoyé par *Émetteur* et reçu par *Destinataire*. C'est un système à clef publique, ce qui signifie que : – l'algorithme de calcul n'est pas caché,

ni la clef de codage (appelée de ce fait clef publique) ; – la connaissance de la clef publique de *Destinataire* permet à tous les *Émetteurs* de crypter les messages qu'ils destinent à *Destinataire*, mais seul ce dernier peut décrypter les messages qu'il reçoit des *Émetteurs*, grâce à sa clef de décodage privée, qu'il cache soigneusement. Les clefs publiques des *Destinataires* qui souhaitent recevoir des messages peuvent être publiées dans un annuaire ou sont obtenues, à la demande,

en contactant préalablement celui à qui l'on veut faire parvenir un message.

Ce type de systèmes possédant une clef de décodage différente de la clef de codage (le système est dissymétrique) présente un avantage sur les systèmes classiques (dits symétriques, car une seule et même clef sert à la fois au codage et au décodage) : avant un échange, les deux interlocuteurs n'ont pas besoin de

## 1. CODAGE DES MESSAGES



Pour coder, *Émetteur* consulte un annuaire où il trouve la clef publique **Pub** de *Destinataire* (a). *Émetteur* code son texte avec cette clef publique **Pub** de *Destinataire* et l'envoie (message secret A). Tout le monde peut envoyer un tel message crypté à *Destinataire* (b). *Destinataire* décode,

avec sa clef privée **Pri**, le message d'*Émetteur* (c). Seul *Destinataire* peut décoder les messages qui lui parviennent. Le cryptage-décryptage est fondé sur la propriété : **Pri(Pub(texte)) = texte**. Aucune méthode rapide pour avoir **Pri** à partir de **Pub** ne semble exister.

se rencontrer pour convenir d'une clef secrète, qui devra rester connue d'eux seuls, ni n'ont besoin de faire circuler – sur un réseau informatique ou autre – une clef secrète, transmission qui bien sûr engendre un risque. Seule la clef publique, insuffisante pour le décryptage, est connue préalablement aux échanges cryptés entre les deux interlocuteurs.

Le RSA est un système à clef publique qui permet de signer – on dit aussi authentifier – des messages : pour cela, *Émetteur* transforme, avec sa clef privée, le texte à signer en un message codé. *Destinataire* reçoit le message et la signature qu'il peut décoder avec la clef publique d'*Émetteur* (le fait de pouvoir décoder la signature assure que c'est bien *Émetteur* qui a signé le message). On peut combiner les méthodes de codage et d'identification, comme indiqué sur la figure 2.

L'algorithme RSA est moins rapide que les algorithmes classiques à une seule clef, ce qui est un handicap lorsque l'on doit coder des messages volumineux. Aussi est-il fréquemment utilisé en combinaison avec un algorithme classique. Dans une première phase, le RSA (avec ses deux clefs) permet à *Émetteur* de transmettre secrètement à *Destinataire* une troisième clef secrète qu'ils seront seuls à connaître : *Émetteur* la fait parvenir à *Destinataire* en la cryptant avec la clef publique de *Destinataire*, qui, à l'arrivée, la décrypte avec sa clef secrète.

Dans un second temps, la troisième clef est utilisée avec un algorithme symétrique convenu pour envoyer rapidement à *Destinataire* le long message. Les algorithmes à clefs symétriques étant de cent à dix mille fois plus rapides que RSA (selon

qu'il s'agit de versions matérielles ou logicielles), ce procédé à deux étages est aujourd'hui d'utilisation très commune.

## VOUS L'UTILISEZ... SANS LE SAVOIR

Insistons sur le fait que ce jeu numérique élémentaire est aujourd'hui un système universel servant dans une multitude d'applications. Au cours des années, il a supplanté tous ses concurrents, qui sont abandonnés (au profit du RSA) soit parce qu'on y a trouvé des points faibles, soit parce qu'ils n'ont pas été assez étudiés pour qu'on soit convaincu de leur solidité.

La technologie RSA est protégée par un brevet dans certains pays (aux États-Unis, ce brevet expire en septembre 2000 ; en France il n'y a pas de brevet). Elle a été commercialisée par plus de 350 entreprises, et l'on estime que plus de 300 millions de programmes installés utilisent le RSA : votre ordinateur contient sans doute de tels programmes, qui sont activés – sans même que vous le sachiez – lorsque, par exemple, vous souhaitez mener des transactions sécurisées sur l'Internet.

Le RSA est inclus dans de nombreux standards informatiques, dont le *Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication Standard* ou le *French Financial Industry's ETEBAC-5 Standard*, ou encore le *X9.44 draft Standard for the U.S. Banking Industry*. Le RSA est programmé aussi dans les systèmes d'exploitation de Microsoft, d'Apple, de Sun et de Novel. Il est intégré dans les cartes Ethernet et dans certaines cartes à puce

bancaires. Un très grand nombre d'institutions gouvernementales, universitaires ou militaires l'utilisent de façon interne. Le réseau Internet en fait un usage systématique pour assurer la confidentialité du courrier électronique et authentifier les utilisateurs. Bref, le RSA est partout.

Nous avons vu que le système RSA est fondé sur la particularité qu'une opération inverse est plus difficile que l'opération directe. Examinons alors les opérations arithmétiques de RSA qui ont cette propriété.

*Procédure RSA pour envoyer un message crypté :*

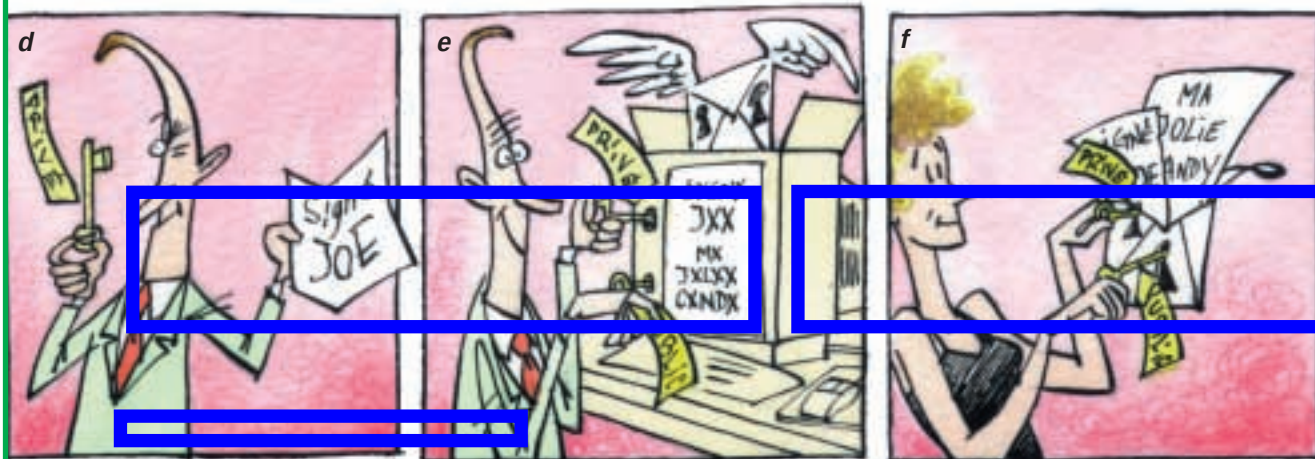
(a) Création des clefs. *Destinataire* construit un quadruplet de nombres  $(p, q, e, d)$  tel que :  $p$  et  $q$  sont deux nombres premiers ; on pose  $n = pq$  ;  $e$  est un entier premier avec le produit  $(p-1)(q-1)$  ;  $d$  est un entier positif tel que  $ed-1$  est un multiple de  $(p-1)(q-1)$ , c'est-à-dire tel que  $ed \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$ .

On sait alors d'après l'énoncé du théorème d'Euler que, si  $A$  est un entier quelconque alors :  $A^{ed} \equiv A \pmod{n}$ , et c'est cette identité qui va tout faire fonctionner.

Grâce aux algorithmes probabilistes, on sait engendrer des nombres premiers de plusieurs milliers de chiffres de long en peu de temps : le calcul de  $p$  et  $q$  est

donc rapide. Trouver  $e$  et  $d$  est aussi une opération rapide, car l'algorithme d'Euler qui permet de calculer ces deux nombres est un algorithme peu coûteux à exécuter. Au total, la constitution d'un quadruplet  $(p, q, e, d)$  est donc une opération rapide pour un ordinateur, même si l'on souhaite que  $p$  et  $q$  aient quelques centaines ou quelques milliers de chiffres.

## 2. SIGNATURE ET CODAGE SIMULTANÉS



Si *Émetteur*, non content d'envoyer un message, désire aussi le signer, de manière que *Destinataire* soit certain que c'est *Émetteur* qui l'a écrit, il code un texte de signature avec sa clef secrète **Pri'** et obtient le message codé B (d). Il adjoint alors le message B au texte initial et il code le tout

avec la clef publique **Pub** de *Destinataire* (e). Il obtient ainsi le message A'. *Destinataire* décode le message A' avec sa clef privée **Pri**, puis le message B avec la clef publique d'*Émetteur* **Pub'**. Cette technique de codage repose sur la propriété : **Pub'(Pri(Pub(Pri'(texte)))) = (texte)**.

### 3. LE THÉORÈME DU RSA

Le protocole RSA se fonde sur le théorème suivant.

Soient  $p$  et  $q$  deux nombres premiers. On pose  $n = pq$ . Si le nombre  $e$  est un entier premier avec le nombre  $(p-1)(q-1)$ , alors il existe un entier  $d$  positif, tel que  $ed = 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$ , et, pour cet entier  $d$  et un entier  $A$  quelconque, on a :  $A^{ed} = A \pmod{n}$ .

La démonstration utilise des mathématiques parfaitement connues depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. Il est amusant de voir que les mathématiques du RSA attendaient depuis deux siècles qu'on leur trouve une application : les mathématiques étaient en avance. Ce n'est pas toujours le cas, et, aujourd'hui, en matière de preuve de complexité, la cryptographie attend des résultats mathématiques qui ne viennent pas (concernant les liens entre RSA et factorisation, ou concernant la difficulté de la factorisation) : les mathématiques sont en retard !

(b) *Destinataire* rend publics  $n$  et  $e$ , qui constituent la clef publique. Il la publie dans un annuaire ou la communique à *Émetteur*, qui la lui demande. Il ne communique surtout pas  $p$ ,  $q$  ou  $d$ . Les nombres  $p$  et  $q$  peuvent être oubliés, car ils ne serviront plus à personne. Le nombre  $d$  constitue la clef secrète de *Destinataire*.

(c) *Émetteur*, qui veut transmettre une information secrète à *Destinataire*, transforme son information en un nombre entier  $A$ , inférieur à  $n$  (ou en plusieurs si nécessaire, en utilisant des conventions connues de tous (provenant, par exemple, des codes numériques des caractères typographiques, ou en prenant  $a = 01$ ,  $b = 02$ , etc)).

(d) *Émetteur* calcule (voir la figure 4) grâce à la méthode d'exponentiation rapide,  $B = A^e \pmod{n}$ , envoie  $B$  à *Destinataire* par un canal qui n'a pas besoin d'être protégé (par exemple, le courrier électronique).

(e) *Destinataire*, pour décoder  $B$ , calcule  $B^d \pmod{n}$ , ce qui lui redonne  $A$ , car, d'après le théorème du RSA, on a  $B^d = A^{ed} = A \pmod{n}$ .

### UTILISATION ET SÉCURITÉ DU RSA

Avec les techniques utilisées aujourd'hui pour programmer les systèmes RSA, les spécialistes estiment que doubler la longueur des clefs multiplie le temps de création des clefs par 16 (croissance en  $L^4$ ,  $L$  étant la longueur des clefs) et multiplie, en revanche, le temps des opérations de codage, de codage, signature et authentification seulement par 4 (croissance en  $L^2$ ). En se fondant sur l'hypothèse que casser le RSA nécessiterait des algorithmes non polynomiaux, c'est-à-dire plus longs, certains déduisent que, plus les machines seront puissantes, plus on pourra utiliser facilement de longues clefs, et que donc plus l'écart entre la puissance disponible et celle nécessaire pour casser le RSA sera grand. Autrement dit, plus le temps

passé, plus RSA serait robuste et sûr. Nous verrons plus loin que cette présentation des choses est très optimiste et loin d'être mathématiquement établie.

Sur le plan pratique, les experts recommandent aujourd'hui d'utiliser des nombres  $n$  de 768 bits (232 chiffres décimaux) pour mettre en œuvre le RSA dans le cas de données pas trop importantes, mais ils conseillent 1 024 bits (309 chiffres décimaux) pour un usage commercial et 2 048 bits (617 chiffres décimaux) pour avoir une garantie se prolongeant sur une longue période de temps. Les clefs de 512 bits (155 chiffres décimaux), encore très utilisées, ne devraient plus l'être, car on a réussi, en août 1999, à factoriser un nombre  $n$  (produit de deux grands nombres premiers) de 512 bits.

La confiance dans la sécurité du RSA n'est pas due à la démonstration théorique que ce système est sûr, car une telle démonstration n'existe pas (nous allons y revenir). La confiance affichée provient du succès, répété depuis plus de 20 ans, de toutes les tentatives entreprises pour casser ce système, tentatives qui n'ont conduit qu'à la formulation de quelques recommandations pour le choix des paramètres  $p$ ,  $q$ ,  $e$ ,  $d$ . D'autres systèmes concurrents du RSA sont peut-être aussi bons ou même meilleurs, mais aucun ne bénéficie de la validation par l'usage et la robustesse aux attaques dont le RSA peut se prévaloir. Le fait d'avoir été l'un des premiers lui a donné un avantage qui, puisqu'il résiste aux tentatives d'effraction, le maintient en tête.

Sur le plan théorique, la situation est décevante et le restera certainement longtemps. Celui qui sait factoriser  $n = pq$  retrouve ensuite facilement  $d$ . Inversement, les mathématiques montrent que celui qui connaît  $n$ ,  $e$  et  $d$  peut trouver rapidement  $p$  et  $q$ . La robustesse du RSA apparaît donc liée à la difficulté de la factorisation. Malheureusement, il n'est pas exclu que quelqu'un, sans réussir à

obtenir  $d$  ni  $p$  ni  $q$ , puisse décrypter un message. Autrement dit, il n'a pas été prouvé que la difficulté du RSA est équivalente à celle de la factorisation. Deux attaques théoriques du RSA sont donc envisageables. Celle passant par la factorisation : quiconque sait factoriser les nombres de la taille de  $n = pq$  sait lire comme à livre ouvert tous les messages cryptés par le RSA. Celle contournant la factorisation : dont personne ne peut établir qu'elle était impossible. Pour laquelle, au contraire, on a proposé récemment des arguments indiquant qu'elle devait être sérieusement crainte. Dan Boneh et Ramarathnam Venkatesan ont en effet établi en 1998 que casser le RSA, lorsqu'il est utilisé avec des exposants  $e$  trop petits, n'est pas équivalent à factoriser  $n$ .

### TENTATIVES POUR BRISER LE RSA

D'autres consignes et mises en garde sont d'ailleurs formulées à destination des utilisateurs du RSA. Certains nombres premiers  $p$  et  $q$  doivent être évités : on conseille de prendre  $p$  et  $q$  de taille proche, et d'éviter que les nombres  $p+1$ ,  $p-1$ ,  $q+1$ ,  $q-1$  soient faciles à factoriser (car alors on risquerait de l'être aussi par l'utilisation d'algorithmes spécialisés de factorisation qui savent tirer parti des factorisations de  $p+1$ ,  $p-1$ ,  $q+1$ ,  $q-1$ ). Un conseil évident, mais à ne pas oublier, est que le nombre  $n$  ne doit pas être choisi par plus d'une entité : sinon, l'utilisation des diverses clefs publiques des utilisateurs du même nombre  $n$  risquerait de donner accès aux facteurs de  $n$ .

Plus subtil mais très important, il ne faut jamais accepter de signer un message et d'apparence aléatoire soumis par un inconnu. En effet, en choisissant bien ce message, l'inconnu peut en déduire la signature d'un message qu'il aura choisi lui-même à l'avance, et vous vous retrouveriez donc à devoir assumer une signature que vous n'avez pas donnée.

L'utilisation d'exposants  $e$  trop petits doit être évitée.

Il faut compléter les textes, avant de les coder, par des bouts choisis aléatoirement et surtout pas par de longues séries de blancs ou de zéros.

Une attaque astucieuse proposée par P. Kocher consiste à mesurer minutieusement le temps de calcul (ou la consommation électrique) demandé pour le

codage, ce qui permet, si l'on dispose de suffisamment de données, de retrouver les clefs utilisées. Appliquée aux cartes à puce, cette méthode se révélerait catastrophique. Heureusement, se prémunir contre cette attaque est assez facile : il suffit de s'arranger pour que le temps de calcul (ou la consommation électrique)

apparent doit faussé, en opérant des calculs supplémentaires inutiles une fois le codage réalisé, avant d'envoyer l'information que le codage est terminé.

## ON NE S'IMPROVISE PAS CRYPTOGRAPHE

De nombreuses erreurs dans la gestion imprudente ou maladroite des clefs sont aussi à l'origine de décryptages inopinés des messages considérés inviolables, car obtenus avec RSA. Une prudence à tous les niveaux est indispensable pour en arriver à des systèmes fiables. Dans un article paru en 1999, Dan Boneh, qui est le grand spécialiste des attaques du RSA proposait cette conclusion rassurante : « En ce moment, il apparaît que l'on peut avoir confiance dans la sécurité que procure le RSA au monde numérique. » Bruce Schneier, un autre spécialiste international de la cryptographie très préoccupé des réalisations opérationnelles insiste sur le fait que la plupart des systèmes de cryptographie qu'on a réussi à casser l'ont été, non par l'attaque réussie du noyau mathématique du système, mais à cause de faiblesses dans la mise en œuvre : mauvaise génération des clefs, mots de passe mal choisis ou mal protégés, contournement possible de l'algorithme mathématique, etc.

L'idée défendue que le noyau mathématique du RSA est inviolable est seulement une conclusion expérimentale tirée de l'échec des tentatives connues d'attaques du RSA (lorsqu'on l'utilise en respectant les consignes formulées par les spécialistes... dont la liste s'allonge chaque année). Cette conclusion n'interdit pas que le risque théorique lié au RSA puisse être jugé grand, puisqu'on n'a ni réussi à montrer que la factorisation est difficile (aucun espoir n'existe à court terme qu'on y arrive), ni même réussi à montrer que le RSA est aussi difficile que la factorisation.

À l'évidence, si une agence de renseignements a découvert quelque chose concernant la factorisation ou s'appliquant directement au RSA sans passer par la factorisation, elle ne rendra pas publique sa découverte et, au contraire, fera tout pour la maintenir secrète le plus longtemps possible. Dire cela n'est pas faire preuve d'une méfiance maladroite, mais du simple bon sens. La tranquille assurance exprimée par les spécialistes à propos de la sécurité du RSA apparaît incohérente, voire possible, et parfois même assez louche.

Dix fois, dans l'histoire des services d'espionnage, un système de codage a été considéré cent pour cent sûr et inviolable par ceux qui l'utilisaient, alors qu'au même moment un service ennemi ayant percé le secret du système lisait tran-

## 4. LE CALCUL DE L'EXPONENTIATION RAPIDE

Dans la mise en œuvre aussi bien des algorithmes probabilistes pour engendrer des nombres premiers que pour l'implémentation du RSA, on a besoin de calculer rapidement  $A^e \bmod n$ . Voici une méthode (dont le principe général est emprunté à la multiplication égyptienne) qui permet ce calcul.

Calcul de  $A^e \bmod n$

- partir de triplet  $(A, e, 1) = (A, 0, R)$  puis :
- si  $J$  est pair, passer à  $(P^2 \bmod n, J/2, R \bmod n)$
- si  $J$  est impair, passer à  $(P^2 \bmod n, (J-1)/2, R \times P \bmod n)$
- s'arrêter si  $J = 1$ , le résultat est  $R = P \bmod n$

Exemple :

$A^{13} \bmod n \rightarrow (A, 13, 1) \rightarrow (A^2 \bmod n, 6, A) \rightarrow (A^4 \bmod n, 3, A) \rightarrow (A^8 \bmod n, 1, A^5) \rightarrow R = A^{13} \bmod n$ . Avec  $n = 217$  et  $A = 2$  :

$2^{13} \bmod 217 \rightarrow (2, 13, 1) \rightarrow (4, 6, 2) \rightarrow (1, 3, 2) \rightarrow (1, 1, 2) \rightarrow R = 2$

quillement tous les messages qui tombaient entre ses mains. Cela s'est produit pendant la Première Guerre mondiale : les services français décodaient chaque nuit les messages destinés aux U-boot tapis au fond de la Méditerranée, ce qui permettait de modifier avant l'aube les programmes de navigation des bateaux menacés. À nouveau, pendant la Seconde Guerre mondiale, cela s'est produit avec la fameuse affaire de la machine *Enigma*, où s'illustra Alan Turing. Signalons aussi l'extraordinaire secret qui a entouré cette aventure impliquant les centaines de personnes qui ont travaillé au Bletchley Park, près de Londres, qui toutes sont restées muettes pendant trente ans : le sens patriotique est une motivation suffisante pour faire taire même le mathématicien le plus sûr. Il ne semble que, si un mathématicien canadien (même s'il est universitaire) découvre quelque chose d'important sur la factorisation, il le gardera pour les militaires canadiens, de même qu'un mathématicien français réservera ses théorèmes cryptographiques cruciaux pour les militaires français, etc.

Pourquoi donc, alors que des moyens considérables sont consacrés à la cryptanalyse – et donc à toutes les mathématiques et techniques qui y sont liées – par les agences spécialisées de renseignements puissantes et fortunées, ne pas envisager sérieusement, qu'ignorée des circuits

de la recherche universitaire (et provenant peut-être d'un universitaire patriote), une découverte fondamentale faisant tomber le RSA ait été faite et reste cachée ?

Même si l'on n'est pas paranoïaque, en l'absence de résultats mathématiques établissant la sécurité du RSA, il est sage de ne pas trop lui faire confiance. Réalise-t-on quand on utilise la méthode de cryptage à deux étages évoquée plus haut (RSA pour communiquer une clef, puis algorithme symétrique), que si un seul des deux étages est percé c'est tout le système qui coule ? Comment ne pas penser à de la désinformation quand on lit, en contradiction avec tout bon sens, que le système à deux étages est d'autant plus solide qu'il utilise deux méthodes cryptographiques !

A. M. Odlyzko a publié un bilan sur le cryptosystème à double clef de Merkle et Hellman fondé sur le problème du sac à dos, un problème combinatoire de rangement. Grâce à certaines propriétés mathématiques le reliant à d'autres problèmes assez bien compris, ce cryptosystème fut considéré un temps comme

plus prometteur que le RSA. Malheureusement, il fut cassé, et les variantes qui ont été proposées aujourd'hui de ce système se sont révélées pour l'essentiel aussi fragiles que la version originale, tant et si bien que du système le plus prometteur d'il y a 15 ans il ne reste rien aujourd'hui. N'en sera-t-il pas de même pour le RSA dans 15 ans, et tout ce qui

## 5. EXEMPLE NUMÉRIQUE SIMPLIFIÉ DE CODAGE RSA

$p = 47, q = 71, n = pq = 3337, (p-1)(q-1) = 3220, e = 79, d = 1019$

On vérifie que  $ed = 80501 = 25 \times 3220 + 1 = 1 \bmod 3220$

Pretons un message préalablement transformé en un nombre :

$m = 6882326879666683$

On découpe  $m$  :  $m_1 = 688 \quad m_2 = 232 \quad m_3 = 687 \quad m_4 = 966 \quad m_5 = 668 \quad m_6 = 3$

Le premier bloc est chiffré par le nombre  $c_1 = 688^{79} \bmod 3337 = 1570$  ;

de même :  $c_2 = 2756 \quad c_3 = 2091 \quad c_4 = 2276 \quad c_5 = 2423 \quad c_6 = 158$ .

Le déchiffrement du message se fait en calculant :

$c_1 = 1570^{1019} \bmod 3337 = 688$ , etc.

aura été crypté avec lui ne sera-t-il pas alors accessible à chacun facilement ?

Citons encore le cas du *RSA for paranoids* proposé par A. Shamir (le «S» du RSA) en 1995. Il s'agit d'une variante du RSA, destinée à rassurer les utilisateurs inquiets du RSA classique en leur permettant d'utiliser, sans trop augmenter les coûts de codage, des nombres  $n$  plus longs. Trois ans après, ce prétendu renforcement du RSA était cassé par H. Guilbert, D. Gupta, A. Odlyzko et J.-J. Quisquater, qui en identifiaient de graves points faibles. Ainsi, l'un des inventeurs du RSA, croyant renforcer sa méthode dans le but de satisfaire les paranoïaques, a renforcé leurs craintes. Si

nous souhaitons protéger des données pour une longue période de temps, soyons conscients que tout s'appuie, en cryptographie mathématique, sur un état de l'art qui peut changer rapidement et dont la réalité est peut-être déjà totalement autre que celle présentée au public.

Le grand nombre de systèmes nouveaux inventés chaque année et qu'on exhibe dans le but de calmer les inquiets («de toutes les façons, si tel système est cassé vous pourrez toujours utiliser celui-là») ne résout en rien le problème, qui est de disposer d'UN système prouvé robuste. Rien ne ressemble plus à un système cryptographique solide qu'un système cryptographique faible, et aujourd'hui

personne ne dispose vraiment des moyens de garantir sérieusement aucun des systèmes largement utilisés.

## ALTERNATIVE QUANTIQUE ?

L'usage de la cryptographie quantique, dont la garantie ne repose pas sur des conjectures mathématiques, mais sur des principes de physique fondamentale, résoudra peut-être ce problème. La maturité de cette technique la rend utilisable aujourd'hui pour les applications où l'émetteur et le récepteur ne sont pas éloignés de plus de cent kilomètres.

Un autre résultat lié aussi à la mécanique quantique contribue à rendre encore plus méfiant vis-à-vis de la cryptographie mathématique. Peter Shor a montré en 1994 qu'avec un ordinateur quantique on peut factoriser efficacement des nombres entiers. Si l'on réussit à construire de telles machines, tout un pan de la cryptographie mathématique sera définitivement compromis. Les ordinateurs quantiques aujourd'hui sont de simples fictions théoriques dont la difficile mise au point devrait demander des années (si elle se révèle possible) ; cependant, là encore, l'avance possible de certains services secrets n'est pas à exclure et, si elle est réellement possible, alors il se peut que pour eux la factorisation des clefs de 1 024 bits ou de 2 048 bits du RSA soit devenue un jeu d'enfants. Gilles Brassard, chercheur canadien renommé, passe de la cryptographie mathématique à la recherche sur les techniques quantiques, remarque que la mécanique quantique non seulement fait percevoir la fragilité fondamentale de la cryptographie mathématique, mais propose une solution pour échapper aux incertitudes dont elle ne réussit pas à se libérer.

### 6. LE RECORD DE FACTORISATION DU 22 AOÛT 1999

Le travail nécessaire aux grandes factorisations est complexe : voici quelques détails sur le calcul mené pour venir à bout du RSA-155. Le 22 août 1999, une équipe de l'Institut national de recherche en mathématiques et en science informatique d'Amsterdam annonçait avoir cassé la clef numérique de 512 bits (155 chiffres décimaux), problème connu sous le nom du RSA-155. Le résultat trouvé tient en quelques lignes ; c'est la factorisation d'un nombre de 155 chiffres en deux nombres premiers de 78 chiffres :

109417384415705274218097073220403576120037329454492059909138  
421314764499842889347847179972578912673324976257528997818337  
9707653744027146743531593354333897  
= 10263952829741105772054196573991675900716567808038066803341  
933521799711307779 × 10660348838016845482092722036001287867  
920795855989291522270608237193062808643

Trois cents ordinateurs divers (stations de travail et PC) ont travaillé à ce résultat cumulant un total de calcul évalué à 8 000 Mips année (1 Mips = un million d'instructions par seconde). Le déroulement des opérations s'est étalé sur une période de trois mois et demi. La primalité des facteurs a été évaluée par deux méthodes différentes. L'algorithme utilisé est le GNFS (*General Number Field Sieve*), qui déjà avait permis de battre le précédent record de factorisation, le RSA-140, en février 1999.

Une légère amélioration de la méthode utilisée pour le RSA-140 a été utilisée. Si la méthode du RSA-140 avait été reprise sans modification, 14 000 Mips années auraient été nécessaires. Ainsi, en six mois, les progrès théoriques ont économisé 40 pour cent du calcul. En y ajoutant les progrès technologiques des microprocesseurs et la capacité accrue des réseaux pour faire coopérer des ordinateurs, la puissance a été doublée en six mois.

Le travail s'est déroulé en une série complexe de phases nécessitant des ordinateurs et des combinaisons d'ordinateurs variées. La première phase a consisté à rechercher un bon jeu de paramètres pour la méthode. On évalue à 100 Mips année la quantité de calculs faite pour cette phase, qui a duré neuf semaines en utilisant une seule machine (de type 250 Mhz *GI Origin* 2000). Cette partie du calcul ne se laisse pas distribuer sur un réseau.

La seconde phase, qui a été distribuée sur un réseau de 300 machines réparties dans le monde entier, est aussi la plus coûteuse en calcul. Elle a fourni des relations qui sont au cœur de la méthode. Un total de 124 millions de relations a ainsi été engendré, dont 39 millions apparaissaient en double (à cause de la méthode de calcul distribué).

Le tri des relations et la préparation de la matrice du système linéaire à résoudre ont été réalisés au cwi, ce qui a demandé un mois de travail. La matrice résultante comportait 6 699 191 lignes et 6 711 336 colonnes.

La résolution du système d'équations a alors demandé 224 heures et 2 gigaoctets de mémoire centrale à un ordinateur *Cray C916*, un ordinateur vectoriel destiné à mener de très gros calculs (par exemple en météorologie), calculs impossibles à répartir sur un réseau de machines moyennes.

D. BOHEH, *Twenty Years of Attacks on the RSA Cryptosystem*, in *Notice of the AMS American Mathematical Society*, pp. 203-213, février 1999.

D. BOHEH et R. VENKATESAN, *Breaking RSA May Be Easier Than Factoring*, *Eurocrypt* 1998, LNCS 1403, Springer-Verlag, p. 59-71.

P. C. KOCHER, *Timing Attacks on Implementations of Diffie-Hellman, RSA, DSS and other Systems*, *Crypto* 1996, LNCS 1109, Springer-Verlag, pp. 1-13.

A.M. ODLYZKO, *The Rise and Fall of Knapsack Cryptosystems*, ATT Bell Laboratories, Murray Hill, 1990.

B. SCHNEIER, *Cryptographie appliquée*, Thomson Publishing France, Paris, 1995.

J. STERN, *La science du secret*, Odile Jacob, Paris, 1998.



# Botanique

## Guide de l'amateur de cactus

Pierre-Louis Fröling. Éditions Belin, 1998.

Dans tout western de la grande époque, un personnage muet, géant, à la rigide et menaçante silhouette en chandelier, se dresse au moment décisif : il s'agit, bien entendu, d'un *Carnegiea* multiséculaire, auprès duquel les héros du film trouvent un précaire repos, ignorant leurs poursuivants tapis derrière l'entrelacs d'*Opuntia* hérissés d'épines... Les deux plantes citées, dites grasses («succulentes» est le terme approprié), cactées dans le langage courant, neurent avec beaucoup d'autres «épineux» les semi-déserts du Sud-Ouest des États-Unis, contribuant à l'étrange beauté d'un paysage végétal sans équivalent dans le monde. Mais sait-on que certaines cactées fréquentent les forêts humides d'Amérique centrale ? Que d'autres vivent à des altitudes atteignant 6 000 mètres, dans les Andes péruviennes ?

Ce superbe ouvrage nous convie à beaucoup d'autres découvertes, à propos de l'une des deux grandes familles végétales (nom officiel : cactacées, de *cactus* qui signifie «épineux»), famille relativement récente, à l'échelle de l'évolution, puisque quasi exclusivement américaine à l'état spontané (le seul genre *Rhipsalis*, ayant tardivement gagné l'Afrique, constituant une remarquable exception). Parmi les plantes suscitant dans le public le plus d'intérêt et de curiosité, les cactées sont en tête, avec les orchidées et les plantes carnivores. En témoigne le nombre de visiteurs du Jardin exotique de Monaco, fascinés par la fragile splendeur de fleurs surgies d'organismes redoutablement armés, dont l'étrange géométrie pourrait laisser douter de leur nature végétale.

Parmi les nombreuses espèces de cactées (environ 1 400, nous dit Aline Raynal-Roques, dans une préface inspirée), l'auteur a retenu les «cent plus belles», choix parfaitement justifié au vu des

splendides photographies qui présentent chacune d'entre elles (souvent par plusieurs images de grand format : la plante dans son milieu, ses fleurs...). Elles sont l'objet d'une monographie parfaitement claire, où se succèdent l'étymologie des noms scientifiques de genre et d'espèce (éventuellement les synonymes latins, les noms vernaculaires), son habitat, sa répartition géographique, sa morphologie et sa biologie florale, ses conditions de culture (avec un tableau résumé très pédagogique), les espèces voisines... Outre les floraisons présentées, spectaculaires par leurs dimensions ou leurs coloris délicats, souvent éphémères chez la reine de nuit, *Selenicereus grandiflorus*, la floraison coïncide avec la période nocturne, l'ouvrage nous révèle l'étonnante diversité des formes que ces plantes ont su réaliser à partir de modèles simples (cylindre, sphère, ballon de rugby, raquette...). Malgré leur morphologie typique des régions sèches,

certaines croissent dans les forêts tropicales humides, parfois en épiphytes, comme des *Epiphyllum*, dont certains supportent les climats pluvieux.

Après l'éblouissante partie monographique, d'autres chapitres sont d'une grande richesse d'information et n'intéresseront pas seulement les amateurs de cactées. Certains, didactiques et parfaitement illustrés, traitent de la culture,

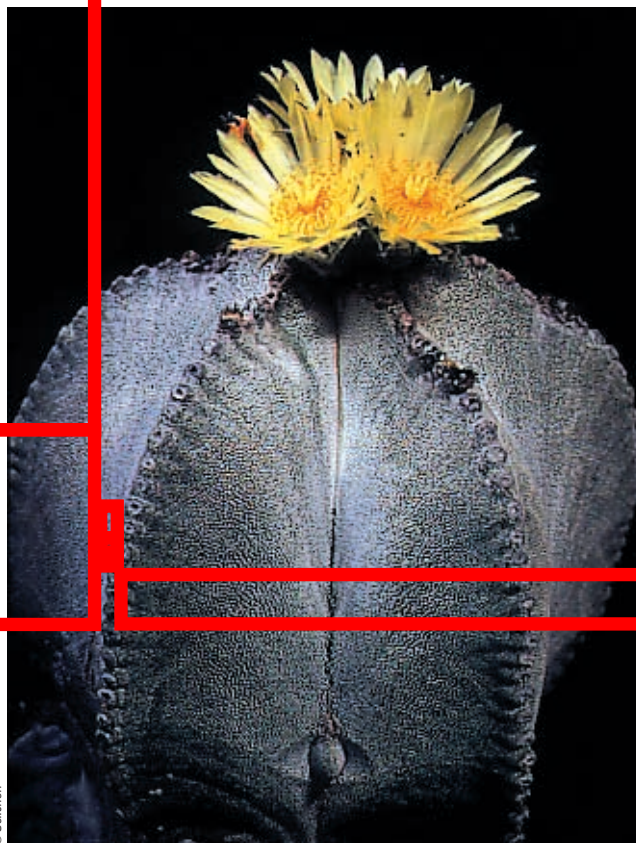
des maladies et des multiples adaptations morphologiques, anatomiques et physiologiques des cactées liées à leurs milieux de vie. À côté des procédés de reproduction, sexuée et végétative, relativement classiques, l'auteur présente avec soin une des originalités de ces plantes : leur étonnante possibilité de xénogreffes. Celles-ci, dont les techniques sont précisées, peuvent même être pratiquées entre certaines cactacées et des dicotylées (une étrange famille endémique des milieux semi-arides de Madagascar), cas sans doute unique qui révèle les affinités systématiques entre les deux familles.

Notons aussi la confrontation de la taxinomie des cactées (dont les étapes, de Linné à aujourd'hui, sont précisées) avec la classification «indienne» (précolombienne) illustrée notamment de dessins tirés du célèbre *Codex Mendoza*, l'analyse de l'origine géographique, des mécanismes de l'évolution, de la répartition des cactées sur plus de 10 000 kilomètres en latitude (des montagnes de Colombie britannique, où *Opuntia polyacantha* supporte des températures aussi basses que -30 °C, jusqu'à la Patagonie). À côté de données sur les utilisations actuelles du cactus (notamment l'élevage de la cochonille), l'auteur a pris visiblement plaisir à rassembler documents historiques et anecdotes folkloriques sur

les multiples pratiques religieuses ou magiques d'Amérique du Sud, et dont on retrouve l'écho dans les tentatives actuelles de démontrer les facultés sensorielles de ces plantes énigmatiques : une cactée (venue en France) serait particulièrement apte à protéger les micro-ordinateurs de toute panne informatique ! En revanche, les espèces rares de cactées ne savent pas se protéger elles-mêmes de l'avidité mercantile des collecteurs. Outre un utile rappel des règles déon-

tologiques que tout amateur doit avoir à l'esprit, l'auteur précise les mesures légales permettant la survie des plus menacées : création de réserves naturelles, lourdes sanctions contre les pillards, interdiction des cactées visées au titre du commerce international par la CITES, convention ratifiée par 120 nations.

Par le nombre considérable d'informations qu'il contient, ce livre dépasse largement ce que pourrait suggérer son titre. Il ne s'adresse pas seulement au collectionneur de cactées, mais aussi



*Astrophytum myriostigma* pousse à plus de 2 000 mètres d'altitude, sur le sol calcaire des hauts plateaux du Mexique.

à un public vaste, du naturaliste amateur, cherchant à comprendre comment se maintient la vie sous les climats arides, au touriste sensible à l'insolite beauté et à la diversité des paysages végétaux, les montagnes et de semi-déserts du Nouveau Monde, qui pourra sans doute identifier à son retour les cactées spectaculaires fixées par son appareil photographique, au cours de ses voyages aux Amériques.

Marcel BOURNÉRIAS

## Sociologie

### Les Français et leurs animaux

Jean-Pierre Digard. Éditions Fayard, 1999 (282 pages, 120 francs).

Certains de nos contemporains qui vivent dans l'urgence, le stress, l'abandon ou la misère s'isolent ou s'agrègent à des groupes de pression militants. On médiatise à l'envi, on s'indigne, et toutes les revendications sociales trouvent leurs porte-parole, leurs justifications, leurs exutoires ou leurs boucs émissaires.

Face à cette exclusion ou à cette agitation, les animaux subissent les excès des humains. La France arrive au deuxième rang mondial pour le nombre d'animaux de compagnie, derrière les États-Unis. Pourquoi cette place ? Chiens, chats ou animaux exotiques à la mode deviennent des signes extérieurs de richesse, des enfants de substitution surmaternés, des bouche-trous affectifs. Peu importent les dépenses, les pollutions urbaines (des tonnes de déjections canines par jour à Paris !)... L'animal favori fait partie de la famille ou la remplace : le maître peut même se couper de toute relation sociale en faveur d'un monologue affligeant face à son animal miroir.

À l'opposé de cet excès d'amour, de cette zoomanie ou zoolâtrie, certains exercent une dominance pathologique sur un animal qui est leur esclave et l'exécuteur de leurs pulsions. C'est par exemple le «surdressage» d'un chien à l'attaque par un individu faible, qui passe à l'acte par pitbull interposé. Pour lutter contre ces croisements de terriers et de molossoïdes, qui accumulent les facteurs de dangerosité par la sélection et le dressage, et pour légiférer sur tous les animaux assimilés à une «arme par destination» (loi du 22 juillet 1996), les arrêtés municipaux et préfectoraux, les

nouveaux lois, les articles du Code civil et du Code rural deviennent si nombreux et si complexes qu'ils sont quasi inapplicables.

D'autres animaux sont relégués à un rôle subalterne dans un élevage ou dans un troupeau. Ils finiront dans une assiette. Le bétail ou la volaille sont méprisés, et leurs conditions de vie épouvantables. Le gène ne joue que dans la mesure où la qualité de la viande risque d'en être amoindrie.

Entre les animaux de compagnie et les animaux de profit, le cheval a un statut particulier, qui a évolué au cours de l'histoire : il a travaillé, il a servi de nourriture, il a été sélectionné et il est devenu une noble conquête de l'homme, s'illustrant dans le sport, la compétition ou les loisirs. Autrefois domaine exclusivement masculin, l'équitation est devenue un sport à forte connotation féminine : l'auteur rapporte que des nuées de petites filles bichonnent inlassablement leur poney et qu'elles sont si nombreuses, dans les clubs équestres britanniques, que la virilité des rares garçons amateurs de chevaux vient même à être mise en doute.

Enfin la faune sauvage fait rêver le citadin à une nature pure, originelle, préservée, symbole d'une liberté qu'il faudrait respecter jusqu'au déraisonnable. Les militants de l'«animalitaire» sont souvent les représentants intolérants d'une écologie d'opacitité, incompatible avec la législation et avec une gestion équilibrée de l'environnement. Les réintroductions d'animaux dangereux comme le lynx l'éclair ou le loup sont souvent catastrophiques et contradictoires avec une vie pastorale, fondée sur le développement durable. La création, en 1998, d'une Commission loup dans le département de l'Isère n'a réglé aucun problème, et les bergers, lassés du massacre répété de leurs brebis, préfèrent désertar les estives pour conserver intacts leurs troupeaux.

Cet ouvrage a le grand mérite de montrer les absurdités et les dérives comportementales de certains Français vis-à-vis des animaux. Il était courageux de faire un tel constat pour servir la cause animale. Il fallait de l'audace pour appliquer un électrochoc aux maîtres abusifs ou aux adeptes de la «déclaration universelle du droit de l'animal», inapplicable puisque les animaux ne peuvent être titulaires de droits ni exercer des responsabilités et encourir des sanctions.

Protéger les animaux sans verser dans l'anthropomorphisme demande une prise de conscience éloignée des attitudes actuelles. Jean-Pierre Digard en fait une démonstration magistralement convaincante.

Michèle FEBVRE

## Agronomie

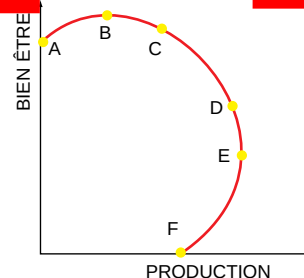
### L'homme et l'animal : un débat de société

Sous la direction de A. Ouedrago et P. L. Nègre. Éditions de l'INRA, Paris, 1999.

Ce livre rassemble une partie des communications présentées à une table ronde organisée par l'INRA en 1995. Ces communications, regroupées en trois parties («Les philosophes et leurs animaux : idée et enjeux», «De l'économie politique à l'éthologie : règlement et réalité», «Homme, bêtes et sociétés : usages et représentations»), veulent faire réfléchir sur les problèmes de bien-être animal et sur les relations entre l'homme et l'animal, plutôt que de fournir des informations déjà présentes ailleurs (*Comportement et bien-être animal* de M. Picard, René H. Porter et J.-P. Simonet, INRA Édition, Paris, 1994).

Tout d'abord, les philosophes discutent du problème des droits de l'animal : les seuls droits que puissent avoir les animaux semblent être ceux que l'homme est prêt à leur accorder. En outre, il semble très ardu de parler de l'animal comme s'il n'existait qu'un. Nous réagissons aux animaux selon un code complexe de proximité (affective ou systématique), plutôt que logiquement. L'expérimentation sur le chien ou le chat est beaucoup plus critiquée que celle qui se fait sur le rat. De même, les campagnes de protection de l'éléphant ou des dauphins (animaux sociaux, «sympathiques», les dauphins ayant même une bouche qui semble sourire en permanence) semblent plus faciles que les campagnes de protection des rhinocéros (animaux territoriaux et agressifs, pourtant plus menacés). La proximité systématique est également importante : les grands singes sont plus mobilisateurs que les araignées, qui ont de nombreux handicaps.

Les causes des relations que l'homme entretient avec les animaux tiennent parfois à des contingences :

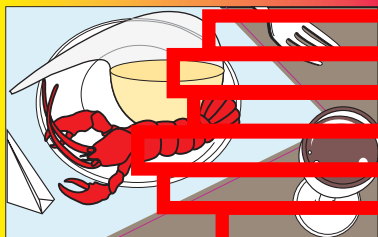


## FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent  
à écouter la chronique  
de Marie-Odile Moncheieurt.

## Info Sciences

Tous les jours  
sur **France Info**  
à 15 heures 41,  
17 heures 10,  
20 heures 12,  
22 heures 12,  
et 23 heures 42



Les prochains  
résultats présentés  
dans la rubrique  
Science et Gastronomie  
seront annoncés sur  
**France Info**  
le 25 janvier 2000.



quand F. Burgat écrit que «les animaux les plus proches de l'homme ne sont pas nécessairement les mieux traités», elle oublie qu'il est plus facile de tuer un moustique qu'un chien. Finalement, nous semblons classer les animaux en quatre catégories : les animaux sauvages, de compagnie, de rente et de laboratoire. Les droits que la plupart d'entre nous sont prêts à accorder à un animal dépendent beaucoup de la catégorie de cet animal ; ils dépendent aussi des liens affectifs que nous entretenons avec lui.

Des problèmes éthiques ne se posent avec les animaux sauvages que dans la mesure où l'homme perturbe leur milieu, menaçant la survie de l'espèce ou la favorisant excessivement (jusqu'au point où cette espèce menace les productions humaines ou d'autres espèces animales). Il est admis que la survie des espèces sauvages doit être assurée et que, à l'inverse, les effectifs des autres espèces doivent être régulés. Pour les animaux de compagnie, au moins leurs propriétaires sont prêts à leur accorder une protection maximale, même s'ils les font parfois souffrir ou s'ils les abandonnent. On doit toutefois distinguer l'espèce et le but de l'élevage. J'ai entendu récemment, sur *France Inter*, la plupart des invités d'une émission se réjouir des protestations des habitants d'un village où devait s'installer un chenil qui produirait des animaux de laboratoire. Pourtant, de même que nous sommes indirectement responsables de la mort des animaux que nous mangeons, nous utilisons des animaux de laboratoire quand nous prenons un médicament. On ne peut simultanément se réjouir des progrès de la médecine et refuser l'expérimentation animale en pharmacie ou en médecine.

Pour les animaux de rente, le problème est différent, et les contraintes économiques sont très fortes. Par exemple, l'élevage des poules en batteries devrait être interdit à partir de 2012 en Europe : on peut discuter longuement des avantages et des inconvénients de la batterie, du seul point de vue du bien-être animal, mais on aurait alors la vue courte. Que se passera-t-il ? Aujourd'hui, dix pour cent environ des consommateurs acceptent de payer plus cher pour avoir des œufs produits hors des batteries. À partir de 2012, seuls ces œufs seront produits en Europe : le choix sera alors soit de payer plus cher des œufs européens, soit d'acheter des œufs importés de pays tiers, où ils auront été produits dans des conditions moins bonnes que celles des cages européennes actuelles. Nous aurons donc, comme la Suisse l'a déjà fait, exporté à la fois la production d'œufs et les problèmes de bien-être des poules, mais nous n'aurons rien résolu.

Sur ces problèmes de bien-être et d'économie, j'ai trouvé particulièrement intéressante la figure de l'article de D. Vermersch (voir la figure). Elle montre que bien-être et production ne sont pas indépendants, et que les deux ne peuvent pas être simultanément optimaux. Dans les zones *AB* et *EF* de la courbe, les deux aspects sont dégradés, et aucun éleveur ne devrait placer les animaux dans ces conditions. Pour un éleveur principalement motivé par la rentabilité de son exploitation, la situation idéale est celle qui est décrite par le point *E*, où la production est maximale. Pour le protecteur, le point idéal est le point *B*, où le bien-être est maximal. Toutefois, l'éleveur accèptera éventuellement de pratiquer un élevage caractérisé par le point *D*, puisque la perte économique est faible, alors que l'avantage en bien-être est net. De même, le protecteur admettra le point *C*, parce que la perte en bien-être est faible. La discussion politique porte sur l'endroit où la loi doit placer la production animale, entre *C* et *D*. Un accord devrait être facile à trouver, car la zone *CD* est étroite.

La deuxième partie du livre, classique, présente les aspects législatifs et quelques résultats sur les problèmes de bien-être. La troisième partie est plus hétérogène, avec quelques articles dérangeants, tel celui de N. Gialles sur les méthodes d'abattage. La discussion sur les différents noms utilisés (assomage, étourdissement, insensibilisation, anesthésie) est passionnante, et la question évoquée (ces méthodes veulent-elles protéger l'animal ou l'homme ?) fait utilement vaciller nos certitudes.

Le livre m'a suggéré bien d'autres réflexions : ceux qui m'auront suivi jusqu'ici seront sans doute passionnés par cet ouvrage intéressant.

Jean-Michel FAURE

## Anthropologie

### L'art rupestre dans le monde. L'imaginaire de la préhistoire

Emmanuel Anati. Éditions Larousse.  
(424 pages, 680 francs).

L'ouvrage d'Emmanuel Anati présente un panorama de 40 000 ans d'histoire d'art rupestre. Il constitue la première mise au point sur l'évolution de la conceptualisation et du comportement analytique de l'espèce humaine.

Sur tous les continents, l'art rupestre constitue d'immenses archives de l'histoire humaine : un ensemble de signes, de figures, de symboles, d'idéogrammes, de pictogrammes, que l'homme a laissés sur les roches, à l'intérieur et à l'extérieur des grottes.

L'art des peuples sans écriture est le miroir de leur âme, de leur esprit, de leur intellect. Il constitue une source documentaire essentielle pour comprendre les fondements conceptuels ; et les paradigmes de l'homme préhistorique sont à la racine même de notre être et s'y trouvent profondément ancrés.

En Algérie (Tassli-n-Ajjer), dans le Neguev israélien et dans la chaîne voisine du Sinaï égyptien, dans la chaîne alpine, en France, en Italie, en Suisse et en Autriche, plusieurs centaines de milliers de gravures rupestres préhistoriques ont été répertoriées. Qu'est-ce qui pousse l'homme préhistorique à une créativité artistique d'une telle envergure ?

Tant par l'importance du corpus documentaire déjà existant que par l'ampleur de sa répartition géographique dans le monde, l'art rupestre constitue plus de 90 pour cent des représentations préhistoriques connues aujourd'hui.

On peut se demander quelle signification particulière pouvait bien avoir, pour ceux qui l'ont fréquentée, une zone où plus d'un million de figurations subsistent encore. Pour qu'une tribu ou une population entière s'engage à réaliser des œuvres d'une telle envergure, ses motivations devaient être très fortes...

Remonter l'histoire de l'homme dans le temps, redécouvrir et analyser sa production artistique, en tirer des enseignements et des suggestions nous permet de grandir, d'évoluer. Cela signifie aussi retrouver les traces primitives d'une iconographie et d'un graphisme qui sont encore la base de notre culture contemporaine.

Le livre d'E. Anati essaie ainsi de retrouver et d'interpréter nos racines en remontant 40 000 ans d'aventure de l'intellect humain. La redécouverte des archétypes de nos mécanismes mentaux intéresse bien sûr les archéologues, les anthropologues, les sémiologues, les sociologues et les psychologues, mais elle nous permet aussi d'accéder aux racines de notre inconscient. Afin de mieux comprendre l'importance de l'art rupestre, il suffit de penser qu'il se conserve à l'endroit même où il fut créé, immobile, toujours orienté comme le voulurent ses auteurs.

Sans équivalent, cet ouvrage, construit de manière érudite et souvent vécue, s'appuie sur une immense information, claire et pénétrante. Il participe à la grande tradition de l'histoire de l'humanité. La

contribution d'E. Anati est remarquable : outre les photographies, superbes, des dessins, des cartes, des tableaux chronologiques complètent un texte toujours clair, très au fait des dernières découvertes et allant à l'essentiel.

C'est une synthèse encyclopédique de l'art rupestre mondial.

Henry de LUMLEY

## Histoire des sciences

### Le rendez-vous de Vénus

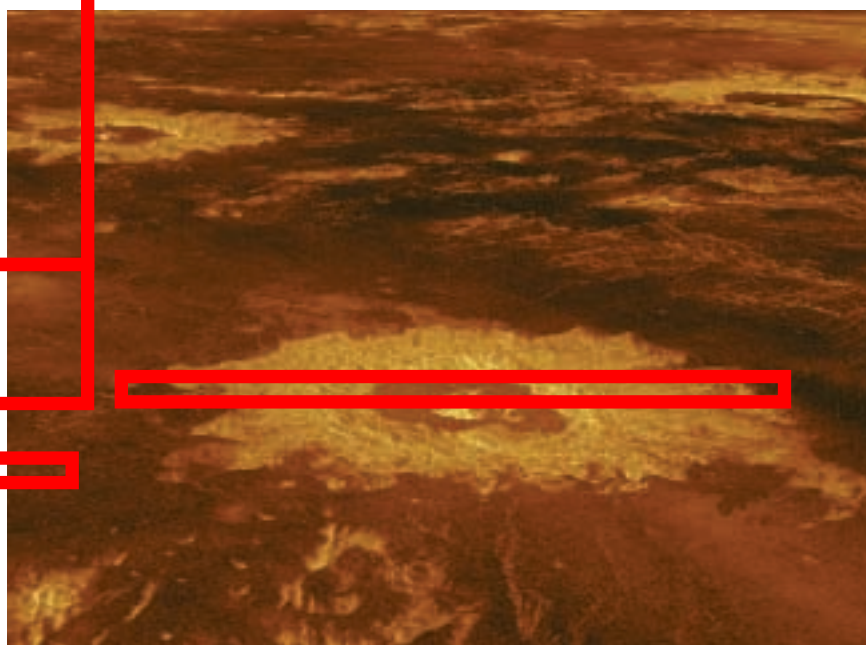
Jean-Pierre Luminet.  
Éditions Jean-Claude Lattès, 1999  
(366 pages, 125 francs).

À son début du XVII<sup>e</sup> siècle, l'astronome allemand Johannes Kepler établit des lois géométriques des mouvements planétaires à partir de nombreuses observations du Danois Tycho Brahe : les ellipses keplériennes succèdent aux cercles d'Apollonius (du I<sup>er</sup> siècle avant notre ère), modèle déjà amélioré par Copernic en 1543 avec le Soleil central.

Kepler met au point des tables de calcul des positions planétaires en 1627 : les *Tabulae rodomphines*. Bien plus exactes que toutes les tables précédentes, elles lui permettent de prévoir un phénomène encore jamais observé : le pas-

sage de Mercure devant le Soleil le 7 novembre 1631 et un autre, de Vénus, un mois plus tard, le 7 décembre 1631. Hélas, Kepler meurt en novembre 1630 sans pouvoir apprécier l'exactitude de ses tables. Le passage de Mercure sera effectivement observé, à Paris, par Pierre Gassendi (1592-1655), mais celui de Vénus n'était pas visible de l'Europe. Peu après, l'Anglais Jeremiah Horrocks (1619-1641) prévoit un autre passage de Vénus le 4 décembre 1639, et il a la chance de l'observer, peu avant le coucher du Soleil.

Ces prévisions réalisées traduisent la grande qualité du modèle planétaire de Kepler, mais il convient d'y joindre les nouvelles possibilités d'observation dues à la lunette astronomique, perfectionnée par Galilée puis par Kepler lui-même, car ces phénomènes ne sont pas spectaculaires à l'œil nu : avec une petite lunette, on n'observe qu'une tache noire se déplaçant très lentement sur le Soleil (la planète Mercure est 150 à 200 fois plus petite que le disque solaire, Vénus est 30 fois plus petite). Un tel passage peut durer six à huit heures quand il est diamétral, mais, à cause de l'inclinaison des plans orbitaux de Mercure (7 degrés) ou de Vénus (3,4 degrés), ces durées sont souvent réduites. De plus, la périodicité n'est pas simple. Pour Mercure, le phénomène a lieu en moyenne 13 à 14 fois par siècle, en novembre ou en mai : 6 novembre 1993, 15 novembre 1999 (non visible en Europe), 7 mai 2003, 8 novembre 2006... Pour Vénus, c'est encore plus rare. La périodicité a lieu selon le cycle suivant : 8 ans, 121,5 ans, 8 ans, 105,5 ans (en juin ou en décembre), soit quatre fois en 243 ans, ou moins d'une fois par siècle.



La région Lavinia Planitia, de Vénus, observée par la sonde Magellan.

# POUR LA 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 Cincin (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Ledercq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Luc Mangin, Claire Le Poullennec (Rédacteurs). Secrétaire de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Meunier et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gessdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine L. Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assisté de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : M. Allard, Ch. Atanassov, G. Cohen-Tannoudji, Ph. Coiffet, M. de Bonis, B. Debié, P. Decaix, É. Host-Platret, Ch. Jeanmougin, M. Lachièze-Rey, M.-T. Landousy, M. Lefeuve, V. Martin-Rolland, Cl. Olivier, L. Orluc, Ch. Pichon, J. M. Robine, R. Talbot, P. Tambourin, S. Udry.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyll, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nevecek, 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, 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** : Servis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bâle

**Belgique** : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oides - 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.

Mis à part celui de 1631, les derniers passages (et les seuls observés) ont eu lieu en 1699, 1761, 1769, 1874, 1882. Les prochains auront lieu en 2004 et 2012.

La distance de la Terre au Soleil avait été déterminée en 1672 par Cassini, Richer et Picard, qui avaient observé précisément la position de la planète Mars à partir de deux lieux très éloignés sur la Terre (Paris et Cayenne, en Guyane) : vue de ces deux sites, la planète ne se projetait pas au même point du ciel (l'écart de parallaxe était de 24 secondes d'arc), et cela leur avait permis de déterminer par trigonométrie la distance Terre-Soleil à 22 000 rayons terrestres (la valeur correcte est environ 23 500).

L'astronome anglais Edmond Halley, qui avait observé le passage de Mercure devant le Soleil en 1677 à l'île de Sainte-Hélène, proposa en 1716 d'utiliser les passages de Vénus pour améliorer cette détermination : en observant ce passage à partir d'endroits très éloignés les uns des autres, les durées de passage sur le disque solaire seraient légèrement différentes en raison de la parallaxe. On pourra en déduire la distance du Soleil par quelques calculs trigonométriques (méthode de triangulation). C'est pourquoi ces observations seront si importantes.

Aux XVII<sup>e</sup> siècle, en effet, l'astronomie avait essentiellement pour but de mieux connaître le mouvement de la Lune afin de se positionner correctement en mer, de faire le point par la méthode des distances lunaires entre la Lune et certaines étoiles brillantes ou le Soleil. L'intérêt de l'astronomie est avant tout commercial : améliorer la cartographie des côtes et des océans afin de raccourcir les trajets et de diminuer les durées de transport des épices... ou des esclaves. L'astronomie est toute au service de la navigation.

Le passage de Vénus de 1761, très attendu des astronomes, sera ainsi la première campagne scientifique internationale réalisée, malgré les guerres entre les nations européennes, y compris en mer. Les sites d'observation étaient l'île de Sainte-Hélène, Tobolsk, en Sibérie, l'île Rodrigue dans l'océan Indien, en Norvège, près du cap Nord, et Pondichéry, en Inde. Le passage de 1769 sera davantage observé, y compris sur le continent américain, notamment en Basse-Californie, à Saint-Dominique et même à Tahiti.

C'était compter sans les aléas des voyages ou sur le phénomène de diffraction (rayons inexprimés) dit de la «goutte noire», où l'image circulaire de Vénus semble se détacher avec retard du bord brillant du Soleil comme une goutte de liquide. C'est la principale cause de l'incertitude expérimentale de la méthode : la durée totale du passage ne peut être déterminée qu'à quatre minutes près,

ce qui empêche toute évaluation précise des distances entre la Terre, Vénus et le Soleil : on ne pourra faire mieux que de x pour cent, ce qui améliorera toutefois la détermination de 1672.

Le livre de Jean-Pierre Luminet est un roman historique qui relate ces grandes aventures scientifiques du XVIII<sup>e</sup> siècle : d'abord le retour prévu et recalculé de la comète de Halley en 1759 (confirmant ainsi la théorie de la gravitation de Newton encore mise en doute à l'époque par les «lucassiniens»), puis les expéditions lointaines pour observer les passages de Vénus en 1761 et 1769. Ce roman très agréable à lire se présente comme les «Mémoires» du grand astronome français Jérôme Lalande (1732-1807), qui écrirait la dernière année de sa vie. Utisant des faits réels, l'auteur raconte les aventures romanesques de

ses amis savants qui ont contribué, comme lui, aux progrès de la science du XVIII<sup>e</sup> siècle : on y rencontre le naturaliste Compton, les astronomes Delisle, Pingré, Clairaut, Le Monnier, Chappe d'Auterive, ainsi que Le Gentil, ce dernier ayant entre une vie très mouvementée, pendant onze ans, dans tout l'océan Indien, à attendre deux rendez-vous avec Vénus, qui manquera, hélas !

Une autre Vénus (l'expression est de l'auteur) est présente dans tout le livre : la mathématicienne Reine L'enaut (1723-1788) a été pionnière, dans un domaine scientifique où les femmes étaient plutôt rares ; elle a calculé le retour de la comète en 1759 avec Clairaut et Lalande. Ce dernier avait aussi un talent reconnu de vulgarisateur (il avait écrit une *Astronomie des Dames*, en 1786). L'auteur aurait pu ajouter ici quelques compléments scientifiques simples sur les méthodes utilisées par ces astronomes.

Le Soleil aura bientôt rendez-vous avec Vénus. Le 8 juin 2004, la planète passera devant le disque solaire. Ce phénomène très rare sera entièrement visible de la France, de 5h 20 à 11h 24 (en temps universel). Le passage suivant n'y sera vu que partiellement, le matin du 6 juin 2012, au cours de la dernière heure du phénomène quand le Soleil sera levé sur notre pays. Le prochain rendez-vous de Mercure visible de France aura lieu le matin du 7 mai 2003, de 5h 12 à 10h 33 (temps universel). Conservons donc nos lunettes en Mylar que nous avons utilisées lors de la dernière éclipse.

MICHEL LUMINET

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>