

POUR LA SCIENCE

Juin 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

LES GRANDS ENSEMBLES

L'ÉVOLUTION
DES CELLULES

LA QUÊTE DE LA VIE
DANS L'UNIVERS

PIERO
DELLA FRANCESCA

L'ÉLASTICITÉ
DE L'ADN

LE SUICIDE
CELLULAIRE

LES PIÈCES
INTELLIGENTES



Canada \$ 8.75

FOSSILES DANS L'AMBRE

Bloc-notes de Didier Nordon

5

Tribune des lecteurs

6

Jeu-concours : Les sigles réinterprétés

7

Les impossibles en démographie

8

par Hervé Le Bras



Présence de l'histoire

12

L'oiseau géant Gastornis

par Éric Buffetaut

Science et gastronomie

14

Quelques conseils culinaires

Perspectives scientifiques :

La télévision interactive

16

La chute des cheveux

17

Anti-analgésique analgésique

20

Stratégies de chasse

21

Le sentiment du bonheur

22

Une image de neurones

24

Faune du Sahara

25

Un chronomètre pour les noyaux

26

Évolution

27

Le récent séisme des Pyrénées

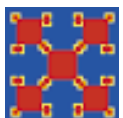
28

Cristaux de pentagones

32

Lézards intransitifs

33



Visions mathématiques

104

Trop Monopoly pour être honnête?

par Ian Stewart

L'image du mois

108

Ravitaillement en vol



Analyses de livres

110

– *Qu'est-ce que l'alchimie?*, par Pierre Laszlo

– *Orbitales frontières*, par Nguyễn Trong Anh

– *Les populations traditionnelles*

– *La contagion des idées, théories naturaliste de la culture*, par Dan Sperber

Une pièce douée de raison

34

par Alex Pentland

Afin d'élaborer des environnements capables de nous aider dans nos tâches, les informaticiens étudient des systèmes informatiques qui identifient les occupants d'une pièce et les actions de ceux-ci.



Prisonniers dans l'ambre

44

par David Grimaldi

Des insectes préservés dans l'ambre nous livrent des secrets de l'évolution.



Le suicide des cellules

52

par Jean-Claude Ameisen

Les cellules ne restent en vie qu'à condition de recevoir des signaux de survie émis par leur environnement. Des anomalies de ces mécanismes seraient responsables de diverses pathologies.



Des jeux infinis et des grands ensembles

60

par Jean-Paul Delahaye

Des relations inattendues entre les jeux, les systèmes informatiques et la théorie axiomatique des ensembles amènent les grands cardinaux.



Piero della Francesca, peintre mathématicien

68

par Enrico Gamba

Ce grand peintre était aussi l'un des plus grands mathématiciens de son époque. Il a adapté les mathématiques savantes aux besoins des techniciens.

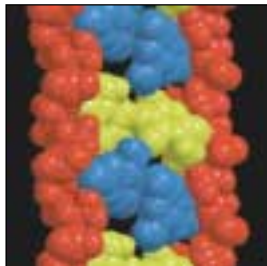


L'ADN, ressort moléculaire

76

par J.-F. Allemand, A. Bensimon, D. Bensimon, F. Caron, D. Chate-
nay, Ph. Cluzel, V. Croquette,
Ch. Heller, R. Lavery, A. Lebrun,
T. Strick et J.-L. Viovy

Les physiciens et les biologistes explorent les propriétés élastiques de l'ADN. Ils parviennent à manipuler des molécules d'ADN isolées.



À la recherche de la vie

84

par Roger Angel
et Neville Woolf

Nous ne connaissons que la vie sur Terre, mais un nouveau télescope sera lancé dans l'espace pour chercher des signes de vie sur d'autres planètes.



La naissance des cellules complexes

92

par Christian de Duve

L'homme, les animaux, les plantes et les champignons existent parce que de minuscules bactéries se sont, un jour, transformées en cellules de grande taille dotées d'une remarquable organisation.



Toujours plus grand...

Les moyens d'investigation affinés dans le tout petit amènent les chercheurs à considérer des ensembles de plus en plus grands. Ainsi, les possibilités de séquençage des bases de l'ADN ont conduit les chercheurs à déterminer l'ensemble du génome de la levure de bière (12 millions de bases). Le génome humain, 250 fois plus grand, est à portée de main.

Les chiffres astronomiques ne font plus peur : il y a 100 milliards d'étoiles dans une galaxie, mais cela n'empêche pas les astrophysiciens d'étudier leurs caractéristiques, leurs interactions, de rechercher des objets rares, de type trous noirs, et de scruter les signatures des signaux émis pour déterminer les étoiles qui seraient associées à une planète.

Ces chiffres dits astronomiques perfusent notre quotidien économique. Un déficit de plusieurs centaines de milliards de francs est monnaie courante : autant de francs que d'étoiles dans une galaxie...

La pas du très grand vers l'infini est du ressort du mathématicien : les mathématiques sont, dit-on, la science de l'infini. Cette phrase est-elle vraie? Peu importe, elle incite à penser. L'infini apparaît naturellement en mathématique, avec son cortège de paradoxes.

Ce mois, Jean-Paul Delahaye expose la théorie moderne des grands ensembles, (voir *Des jeux infinis et des grands ensembles*, page 60) qui sont nés de la théorie des jeux infinis. Existe-t-il, pour ces jeux infinis, une stratégie permettant de gagner à coup sûr? Si on désire répondre oui à la question, il faut imaginer des ensembles difficiles à construire.

Si l'existence de ces ensembles monstrueux est affaire de croyance en une harmonie unificatrice, les questions philosophiques pointent l'oreille. La philosophie peut-elle «aménager» les difficultés conceptuelles issues des mathématiques? Ou contribuerait-elle à une meilleure hygiène mentale personnelle? Henri Lebesgue, était dubitatif : «À mon avis, disait-il, un mathématicien, n'a pas besoin de se préoccuper de philosophie», opinion confirmée par nombre de philosophes.

Philippe BOULANGER

Une théorie sur les théories

Comprendre une théorie exige de percevoir les limites, les manques, les incertitudes, le caractère relatif et provisoire de cette théorie. Tant qu'on n'est pas arrivé à ce stade, c'est qu'on fait de la théorie en question un absolu : soit une méthode qu'on applique «sans se poser de questions», soit un acte de foi qu'on ne cherche pas à examiner, soit encore une simple «technique qui marche». Penser exige donc d'être cruel avec soi-même : faire un effort, parfois énorme, pour comprendre, tout en sachant que la récompense résidera dans la conviction que ce qu'on a compris est insuffisant, mal assuré.

«Je ne me suis jamais entêté à une idée, par crainte du désarroi où je tomberais sans elle», affirme Zénon, le héros de *L'œuvre au noir*. Cette formule magnifique devrait servir de maxime à quiconque aspire à penser. Mais qui peut se flatter d'avoir l'âme assez trempée pour se tenir à une règle aussi exigeante ? Tous autant que nous sommes, nous nous accrochons à nos pensées. Et c'est précisément cela qui nous empêche de vraiment penser.

Éternel Internet ?

La plus vieille illusion des hommes – la croyance en l'immortalité – est contemporaine de leur plus vieille angoisse – l'épouvante devant la mort. De ce point de vue, Internet est d'un archaïsme irréprochable. C'est en effet un dispositif «qui ne peut plus mourir», lit-on dans *La planète cyber* (Découvertes Gallimard, p. 78). «Internet peut résister à une attaque nucléaire parce qu'il ne s'agit pas d'un objet, mais d'un concept. Or il est très difficile de détruire un concept. Celui d'Internet [repose] sur une organisation sociale extraordinairement décentralisée.

Annihiler Internet serait aussi difficile que tuer le français ou l'espagnol.» Les soldats de Déroulède mouraient en murmurant «France». Nous mourrons en pianotant «Je meurs, mais Internet demeure».

Voir en peinture

D rôle d'idée, quand on a la vue faible, que de recourir à ses oreilles pour tenter de voir plus clair ! De fait, il a fallu attendre le ^{xx}e siècle pour qu'on pense à allonger les branches de lunettes et à leur faire prendre appui sur les oreilles. Les branches elles-mêmes datent du ^{xviii}e ; l'idée d'attacher deux loupes l'une à l'autre pour pouvoir utiliser les deux yeux, du ^{xiii}e. Cicéron, âgé, se faisait faire la lecture par ses esclaves, et la fameuse émeraude à travers laquelle Néron regardait les jeux de cirque ne lui servait pas de lunette de vue, mais de protection contre le soleil.

Vers le ^{xvi}e siècle, l'Espagne était le seul pays d'Europe dans lequel porter des lunettes soit considéré non comme une disgrâce, mais comme un signe de noblesse ou de fortune. D'où, par goût de la parade, le port d'immenses verres retenus par des rubans autour des oreilles. Les missionnaires espagnols ont contribué à l'expansion des lunettes en Chine. Et les Chinois ont innové à leur tour, en mettant des contrepoids au bout des rubans.

Ces renseignements sont tirés du petit livre délectable de Michael Pasco, *L'histoire des lunettes vue par les peintres* (éd. Boubée, 1995). Méritent également le détour, dans ce livre, quelques savoureuses reproductions de tableaux datant de l'âge classique : saint Pierre plongé dans la lecture, maintenant des lunettes sur le bout de son nez ; sainte Anne, mère de la Vierge, ayant délaissé les siennes le temps de se reposer les yeux ; un compagnon de saint Thomas recourant à des bécasses pour

s'assurer des blessures du Christ ; ou encore Virgile tenant avec une délicatesse de poète des bécasses clouantes qui existaient à l'époque du peintre, non à la sienne...

Impressions

Dans un de ces brusques élans unanimistes d'autoflagellation dont ils ont le secret, les journaux, depuis quelque temps, multiplient les articles expliquant que, à force d'y lire des mensonges, les gens ne croient plus ce qu'ils lisent dans les journaux.

Il ne m'appartient pas de dire si cette information-là mérite d'être crue, ni de discuter le problème déontologique qu'elle pose. Mais le problème logique, si. Et là, je dois dire que, à mes yeux, la presse a réussi un exploit. Jamais je n'aurais pensé que le paradoxe du menteur, qui n'a cessé de défrayer la chronique depuis qu'un certain Crétois a dit : «Je mens», pourrait refaire surface sans que personne s'avise de le reconnaître !

Il y a des longueurs...

A llons au fond des choses : un volume apparaît comme une surface. Et une surface, en fin de compte, n'est rien de plus qu'une longueur.

Un volume, j'entends naturellement : un volume de bibliothèque. À part pour certains bibliophiles, l'épaisseur des pages n'a rien de significatif ; elle n'influe guère que sur le volume dudit volume, pas sur son contenu. Ce qui compte, c'est la surface des pages. Et encore même pas – gare aux marges trop larges ! Seule importe en définitive la longueur totale des lignes imprimées. Exemple. Quel est le volume, exprimé en mètres, de mon exemplaire des *Misérables* ? L'ouvrage comporte mille cinq cents pages, de cent soixante-dix centimètres carrés chacune, soit un total de vingt-cinq mètres carrés environ. Cela peut paraître beaucoup, mais attention ! L'essentiel de cette surface consiste en place gaspillée. Chaque page en fait contient au plus quarante-trois lignes, chaque ligne ayant une longueur maximum de huit centimètres. En multipliant mille cinq cents par quarante-trois et par huit, nous obtenons toute nue la réalité littéraire de l'objet. Elle est de l'ordre de cinq mille mètres.

C'est un peu décevant : même pas de quoi aller d'ici jusqu'à Pontoise !

Raconte-nous, grand-mère

Décidément, plus c'est nouveau, plus c'est la même chose... Malgré la puissante barbe sans laquelle il ne serait que ce qu'il est, Hubert Reeves ne donne généralement pas l'impression d'un macho. Voilà pourtant que, dans l'ouvrage collectif *La plus belle histoire du monde* (Seuil, 1996), il se laisse aller à déclarer (p. 162) : «Nos grands-mères voyageaient à 50 kilomètres à l'heure maximum tandis que nous disposons aujourd'hui de vaisseaux atteignant 50 000 kilomètres à l'heure.»

Espérons que cette curieuse formulation ne fait que trahir un retour du refoulé chez Hubert Reeves. Car je ne veux pas imaginer – ce serait trop triste pour l'harmonie des couples dont nous sommes issus – je ne veux pas imaginer que nos grands-pères aient joui de moyens de transports d'une rapidité inconnue de nos grands-mères.

Comité critiqué

Les comités d'éthique servent-ils la démocratie ? s'interroge Philippe Lazar (voir *Pour la Science*, avril 1996). Rappelant que la possibilité de légiférer est réservée au Parlement, Elisabeth Badinter estimait, en 1986, que doter le Comité d'éthique du moindre pouvoir législatif serait «un détournement de la démocratie» (*Journal int. de médecine*, 15 décembre 1986). Robert Edwards, père du premier «bébé-éprouvette» mondial, a qualifié, en 1987, le Comité national d'éthique français d'«anti-démocratique». Même si sa réponse est bien enveloppée, P. Lazar paraît de cet avis.

Un Comité national d'éthique ainsi conçu constitue une atteinte caractérisée à la liberté individuelle : la liberté du chercheur de chercher, la liberté des couples d'avoir des enfants comme ils l'entendent et la liberté fondamentale de chacun de choisir sa propre morale. Un Comité d'éthique de ce type est une Bastille, ça se prend et ça se rase.

S. GELLER, Marseille

L'ère du plastique

Dans l'article *Plastique et environnement* (voir *Pour la Science*, février 1996), Pierre Avenas prône l'incinération propre des plastiques. Il ne dit rien toutefois des fumées nocives émises lors d'incendies, ni de l'encombrement des mers par les sacs plastiques flottant entre deux eaux, qu'avalent les tortues.

De plus, la valeur marchande nulle de ces produits après utilisation complique l'éducation du consommateur. Les jouets en plastique sont dans ce domaine une calamité ; cassés, ils ne sont pas réparables, et l'enfant moderne n'accorde aucune valeur sentimentale à ces objets sans grand intérêt. Sans prôner un retour en arrière, j'espère que nous dépasserons les errements du début de l'ère du plastique.

Jean-Claude LUCAS, Plougasnou

Réponse de Pierre Avenas

La plupart des matières plastiques dégagent essentiellement du gaz carbonique et de l'eau lors de leur combustion. D'autres ne dégagent pas plus de fumées toxiques que certains produits naturels, tels le cuir ou la laine. Enfin, des matériaux plastiques difficilement inflammables, comme le PVC, ont été reconnus plus sûrs que des métaux (non inflammables) par la Direction de la sécurité civile, car ils propagent moins

bien la chaleur. La plupart des asphyxies observées au cours d'incendies sont en fait liées à la présence d'oxyde de carbone, inodore et incolore, alors que certaines fumées acides, pouvant contenir de l'acide chlorhydrique, constituent un révélateur. En tout état de cause, la réglementation très stricte sur la sécurité incendie s'applique avec la même rigueur aux matières plastiques qu'aux autres matériaux.

En ce qui concerne l'encombrement des mers par les sacs plastiques, ce n'est pas parce que certains automobilistes brûlent un feu rouge, circulent à une vitesse excessive dans des régions urbaines ou jettent le contenu de leur cendrier par la portière que l'on interdit l'automobile et que l'on met en cause les fabricants de celle-ci. Les jouets en plastiques, quant à eux, posent le problème de notre civilisation qui ne prend plus la peine de réparer quoi que ce soit pour des raisons de coûts ; même certaines poupées «de collection» ou jouets en bois terminent dans des décharges ou dans des incinérateurs. Les matières plastiques, dans ce dernier cas, apportent au moins leur valeur énergétique !

Toutefois dans le cas du jouet comme dans les autres domaines, l'apport des matières plastiques est évident : légèreté, sécurité, résistance, bruit (patins à roulettes). Les multiples facettes de ce matériau ont permis l'éclosion, à faible prix, de jouets auxquels l'enfant s'attache, tout aussi performants que ceux en matériaux dits «traditionnels». Les jouets du type *Lego*, par exemple, ont remplacé en grande partie le *Meccano* et se transmettent maintenant de génération en génération. D'autres marques ont adapté leur gamme à toutes les nouvelles fonctions offertes par les matières plastiques. Après quelques errements de jeunesse, les matières plastiques deviendront, à leur tour, traditionnelles.

Atelier quantique

Un simple atelier de mécanique a des comportements quantiques. «Vas me chercher le marteau rouge, dit le mécanicien à son apprenti.

– Où est-il ?, demande l'apprenti.
– Là-bas.»

Dans la conscience de l'apprenti, le marteau est partout dans l'atelier, sauf là... Dès que l'apprenti l'aura trouvé, la fonction d'onde du marteau se réduira en un lieu bien précis.

Soudain le mécanicien interpelle : «Ne cherche plus, il était resté là.» Usant de sa liberté d'observateur, il a d'un coup fortement perturbé le système physique.

Rémy FERRON, Olivet

JEU-CONCOURS

N°24

PIERRE TOUGNE

LES SIGLES RÉINTERPRÉTÉS

Tout le monde connaît l'interprétation déformée du sigle RATP : Rentre Avec Tes Pieds...

Nous vous proposons ce mois de trouver de nouvelles réinterprétations des sigles tels que CNRS, CEA, INRA, CERN ou tout autre sigle pour lequel vous découvrirez des sens cachés...

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de juin 1996, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Les abeilles*, Collection Univers des Sciences.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°22

Pour résoudre ce jeu, il faut «déplier» la trajectoire de la bille (et non de la boule, comme me l'a fait remarquer un lecteur).

Considérez la trajectoire $APQR$ sur le billard carré de la figure 1 ; par symétrie autour de BC (la première bande), la partie PQ de la trajectoire devient PQ' aligné avec AP et QR devient $Q'R'$. Une deuxième symétrie autour de CD' (la deuxième bande) transforme $Q'R'$ en $Q''R''$ aligné avec AP . Ainsi toutes les trajectoires issues de A et frappant dans l'ordre les bandes BC et CD sont les droites reliant A et un point du billard $CD'A''B''$ coupant BC et CD' . Dans ce cas, les seuls points de $CD'A''B''$ atteignables en coupant BC et CD' sont ceux du triangle bleu $CA''D'$, soit 50 pour cent du billard. Dès lors, en examinant les différentes possibilités sur des bandes (toutes différentes), on obtient facilement les meilleures solutions pour le billard carré montré sur la figure 2, soit en pourcentage de surface atteignable 100 (1b), 100 (2b), 75 (3b) et 50 pour cent (4b) pour 1, 2, 3 et 4 bandes respectivement.

Pour le billard hexagonal, les meilleures solutions sont celles de la figure 3, et un peu de géométrie permet d'obtenir les pourcentages, soit $5/6 = 83,3$ (une bande, 1b), $7/9 = 77,8$ (deux bandes, 2b) et $19/30 = 63,3$ (trois bandes, 3b).

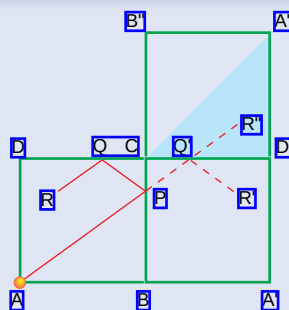


Figure 1

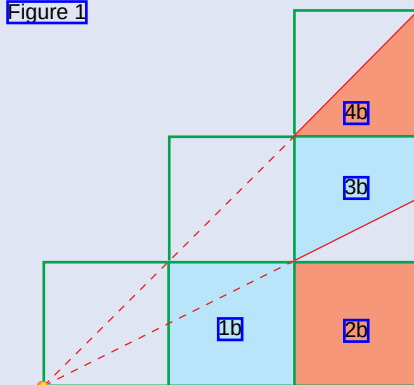


Figure 2

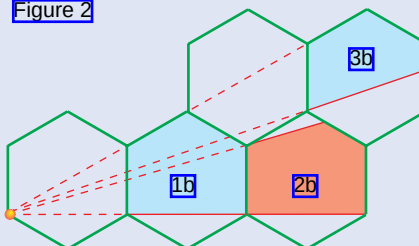


Figure 3

EDISCIENCE
international

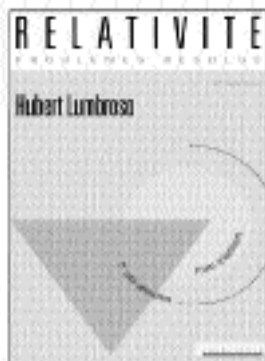
Nouveautés

Hubert LUMBROSO

► RELATIVITÉ

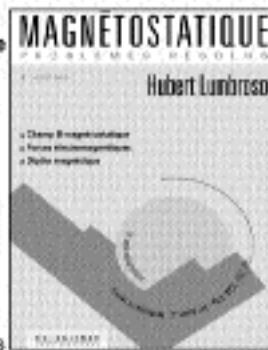
Problèmes résolus, 2^e éd.

Cette nouvelle édition entièrement revue recouvre les principales notions et applications de la relativité restreinte dans les divers domaines de la physique.



Broché
Jan. 96
286 pages
165 F

Nouveau
Programme
1995



Broché
Mai 96
284 pages

◀ MAGNÉTOSTATIQUE

Problèmes résolus, 4^e éd.

Ce tome de magnétostatique (ou électromagnétisme en régime stationnaire - indépendant du temps) est conforme au nouveau programme de 1^{re} année des prépas scientifiques.



EDISCIENCE
international

23, rue Beunier 75014 Paris
Tél. : (1) 45 40 94 38
Télécopie : (1) 45 40 77 05

Les impossibles en démographie

HERVÉ LE BRAS

La démographie fascine. Aux scientifiques, elle apparaît comme la plus mathématique des sciences sociales ; aux politiques, elle semble fournir le socle de la société. Malheureusement, les populations ne sont pas constituées de particules matérielles interchangeables, mais d'hommes plongés dans une histoire sociale, qui déjoue prévisions des démographes et attentes des politiques.

Les démographes se définissent le plus souvent comme des artisans mesureurs, des arpenteurs de la population guidés par le seul souci de fournir des données objectives. Entre leurs mains, ce qui fait bouillonner nos vies, naissances, unions, décès, sexe, jeunesse, famille, reproduction, vieillesse, se transmue en tableaux de chiffres et en séries d'indices.

Un tel refroidissement est indispensable pour comprendre nos sociétés, mais il permet aussi aux moralistes, aux politiques et aux idéologues de décider et de prophétiser sur ces sujets incandescent en se parant des voiles de la science. Car si le chiffre est évidemment objectif, la catégorie qu'il représente résulte de choix partisans qui incorporent une vision du pouvoir, de l'État ou de l'inégalité des races et des conditions.

Soulevons ici légèrement les voiles et, pour commencer, découvrons les trois démons originels, car, au cours de trois naissances successives, la science démographique a été marquée par les intentions de ses utilisateurs, qui étaient aussi ses commanditaires.

LES TROIS ORIGINES DE LA DÉMOGRAPHIE

Tous les démographes font remonter l'origine de leur science à la parution des *Observations naturelles et politiques* de J. Graunt, à Londres, en 1662. Ce marchand drapier de la City étudia, pour la première fois au monde, la répartition des décès par causes (fièvres tierces et quarts, ballonnements, pierre, mais

aussi «chagrin», ou «foudroyé par une planète») et confectionna la première table de mortalité. On peut s'émerveiller, comme il est d'usage dans les cercles démographiques, sur son «arithmétique de boutiquier», mais on doit aussi rappeler que l'ami de Graunt, W. Petty, fondateur de l'arithmétique politique, savant politique, courtisan et financier, secrétaire de Thomas Hobbes et médecin général pour l'Irlande, a tenu la main du fondateur. Les chiffres devaient servir le souverain et n'étaient pas à mettre entre toutes les mains, est-il indiqué dans la conclusion des *Observations*.

Graunt et surtout Petty seront immédiatement entendus. Durant un siècle, au nom de la table de mortalité et de la population, les conseils politiques seront prodigués par des hommes aussi divers que Vauban ou Condorcet, sans oublier Mirabeau, Franklin, Hume et Voltaire.

Deuxième naissance de la démographie, au moins pour son nom actuel avec les *Éléments de statistique humaine ou démographie comparée* d'Achille Guillard, en 1855. Nous sommes là sous le règne de l'hygiène sociale, qui s'amplifiera avec la révolution pastoriennne : en observant le comportement des populations, leurs conditions de vie, leurs professions, leurs localisations, on doit, pense le démographe, déterminer les causes de leur développement ou de leur stagnation et donc remédier aux maux sociaux.

Cette démographie reste conseillère du prince, mais, au lieu d'épauler le pouvoir, elle l'étend dans la direction d'une politique sociale. Elle amorce les débats

sur les accidents de travail de la fin du siècle, où F. Ewald a vu la naissance de l'État providence.

Troisième naissance avec le darwinisme social, c'est-à-dire avec l'interprétation populationniste et raciste des travaux de Darwin qui se répand après les années 1870. En contradiction avec le maître qui avait abaissé les barrières de l'espèce, logé le principe de variabilité dans l'individu et dénié tout objectif à l'évolution, les disciples de Galton, de Vacher de Lapouge et de Chamberlain insistent sur la séparation de l'humanité en races, équivalentes à des espèces distinctes, et sur la sélection à rebours qui régit leur développement.

Comme l'écrira dans sa *Théorie génétique de la sélection naturelle*, Ronald Fisher, le fondateur de la statistique mathématique et l'un des plus grands généticiens des années 1930 : «Nous devons faire face au paradoxe suivant : les membres de notre société qui réussissent biologiquement se recrutent essentiellement parmi les ratés sociaux et, symétriquement, ceux qui sont prospères et réussissent socialement sont principalement des ratés biologiques, les inadaptés de la lutte pour l'existence, voués plus ou moins rapidement selon l'importance de leur rang à être éradiqués du stock humain.»

Qu'on ne se méprenne pas, Fisher n'était pas un fasciste, mais un savant anglais très engagé à gauche, et encore très respecté. Seulement il baignait dans le jus eugéniste et darwiniste social qui est une caractéristique majeure de l'époque. Pour mesurer le succès d'une espèce, on calculait son pouvoir de reproduction, sa fécondité. De la même manière, pour connaître le succès ou l'échec biologique des groupes humains, on se mit à mesurer leur fécondité par des taux de reproduction ; ceux-ci, à un multiplicateur près, sont exactement les indices de fécondité que mesurent les démographes actuels et qui fournissent l'argumentaire sur le crépuscule de l'occident, sur le non-renouvellement de la population française ou européenne, voire sur son «suicide par dénatalité».

Du pouvoir absolu de l'État aux classes sociales, de ces classes sociales aux races ou, comme on dit pudiquement aujourd'hui, aux ethnies, la démographie n'a fait que suivre l'histoire politique ou plutôt l'histoire des représentations politiques de ces trois derniers siècles.

Est-ce à dire que toute démographie se limite à l'idéologie ? Ce serait trop simple. Il existe d'abord quelques équilibres troublants, puis quelques évolutions remarquables. Et surtout, pour peu que l'on démonte – on dirait aujour-

d'hui, déconstruise – les mesures et les indices des arpenteurs-démographes, la démographie offre un point de vue remarquable sur de nombreux débats actuels.

QUELQUES RÉGULARITÉS

La plus simple est aussi celle qui a fasciné un grand nombre de mathématiciens : c'est la constance de la proportion de naissances masculines dans l'ensemble des naissances, 105 garçons pour 100 filles. À toutes les époques et sous toutes les latitudes, on a retrouvé cette valeur qui a excité l'imagination des grands mathématiciens. Poisson, Quetelet, Babbage ont cherché une explication – ou une exception –, et, plus près de nous, Malinvaud et Marcel Paul Schützenberger ont scruté ce mystère. Conséquence importante : dans une région, quand les statistiques donnent une valeur différente, on subodore une intervention humaine : en Inde, où le coût de la dot des filles est prohibitif, et en Chine, où l'enfant unique doit être un garçon qui prendra en charge votre vieillesse, des petites filles manquent à l'appel dans les pyramides des âges.

Au début du XIX^e siècle, B. Gompertz découvre un autre invariant, la croissance exponentielle des risques de décéder avec l'âge à partir de 35 ans : de quelque dix millièmes par an à 35 ans, le risque annuel de décès passe ainsi à plusieurs dixièmes après 90 ans, dans une progression que rien ne semble devoir arrêter.

PROGRÈS DE LA LONGÉVITÉ OU PROBLÈME SOCIAL ?

La mortalité est sans doute le facteur démographique qui bouge le plus rapidement aujourd'hui. Pourtant, les yeux fixés sur la ligne bleue de la fécondité (à 2,1) et de l'immigration (objectif solde nul), les Français sont en train d'oublier la plus grande surprise des 20 dernières années.

Alors qu'il était courant de dire, dans les années 1960, que la mortalité ne diminuerait plus guère (les prévisions démographiques de cette époque, en France, furent établies avec une espérance de vie des hommes stabilisée à 68 ans), l'espérance de vie progresse maintenant à peu près d'un an tous les cinq ans. L'espérance de vie masculine a dépassé 73 ans, celle des femmes se rapproche de 82 ans, et rien ne laisse présager un arrêt, au point que le démographe américain J. Vaupel vient de donner pour titre à un de ses articles : «Pourquoi les bébés français qui naissent cette année vivront 95 ans en moyenne.»

Au lieu de s'en réjouir, on s'en lamente en craignant une hausse vertigineuse des dépenses de santé à cause de «l'envahissement des vieillards», pour citer Alfred Sauvy, et à cause des retraites à verser.

Or, tandis que les progrès de l'espérance de vie, du XVIII^e siècle jusqu'en 1960, étaient presque uniquement dus au recul de la mortalité aux jeunes âges, particulièrement de la mortalité infantile passée de 250 pour mille sous Louis XIV à 7 pour mille aujourd'hui, les progrès des dernières années tiennent au recul de la mortalité aux âges élevés. En fait, on meurt de plus en plus tard. En mesurant un vieillissement de la population par la proportion de personnes âgées de plus de 65 ans, on confond la catégorie, ou l'indice, avec la réalité. Les per-

sonnes d'âge donné ont une santé et un état général très supérieurs à ceux qu'elles avaient 50 ou 100 ans auparavant. À 58 ans, Boileau se décrivait comme un vieillard à la tête «toute che nue». À 63 ans, Chirac est considéré comme un jeune président.

Aussi est-il préférable, pour étudier le vieillissement, de remplacer l'espérance de vie classique par une espérance de vie «sans incapacités». La plupart des études qui adoptent cet angle montrent d'ailleurs que cette espérance de vie «sans incapacités» s'accroît au même rythme que l'autre. Autrement dit, on n'est pas vieux plus longtemps, mais on devient vieux plus tard.

Cette distinction n'empêche pas l'augmentation de la charge des retraites, dirait-on. Ici la confusion entre biologique et



1. Parmi les appelés, les non-élus surpeuplaient les enfers. La surpopulation contribuait au supplice des damnés qui grouillaient dans un univers bruisant de souffrances.

social atteint son comble. L'évolution de l'âge au départ en retraite et celui de l'espérance de vie divergent depuis un siècle : le premier diminue, le second augmente. Ainsi, au recensement français de 1936, 50 pour cent des hommes âgés de 75 ans étaient encore en activité. En 1990, cet âge médian de départ en retraite est tombé à 58 ans, soit 17 ans de moins. Dans le même temps d'ailleurs, l'âge médian d'entrée dans la vie active a augmenté d'environ 10 ans, à cause de la prolongation des études et du chômage. Le problème des retraites est devenu une question générale de partage des revenus dans une existence où l'on passera 25 ans ou plus en formation, 25 ans en retraite et une petite trentaine d'années en activité réelle.

On ne peut espérer de miracles comparables qui ramèneraient les coûts d'éducation et de retraite à ceux qui prévalaient à l'époque où la formation durait moins de 15 ans, la retraite moins de 10 ans et la vie active, une quarantaine d'années... quand on ne mourrait pas avant son terme.

On ne doit pas non plus accuser l'augmentation de l'espérance de vie d'être à l'origine de ce problème. Conséquence du progrès économique et social, elle accompagne l'évolution de la société, mais ne la détermine pas.

LE MYTHE DE LA SURPOPULATION

Sous l'influence d'une opinion française nataliste souhaitant une France toujours plus peuplée, on oublie que le reste du monde, malthusien, craint au contraire la surpopulation. On accuse cette dernière des pires maux, la disparition de la diversité biologique, le trou de l'ozone et le réchauffement climatique. Sur-tout, on attribue à la croissance démographique le déséquilibre entre population et subsistances, dont des centaines de millions d'affamés souffrent dans le monde.

L'erreur fondamentale de ces imputations vient de l'idée abstraite d'une «population mondiale» ou même d'une «population indienne» qui rend fictivement égaux tous les humains ou tous les Indiens. Or certains pays riches (Australie, États-Unis par exemple) émettent 50 fois plus de gaz à effet de serre par tête d'habitant que les pays pauvres (et peuplés, comme le Bangladesh ou l'Inde) et certains riches des pays pauvres émettent 100 fois plus de ces gaz que les innombrables pauvres de leur propre pays.

Il en est de même pour la nourriture, moins souvent mentionnée. En effet, depuis 30 ans, bien que la progression

de la production de vivres ait été nettement plus rapide que celle de la population, la faim continue à tourmenter un nombre considérable d'humains. Or si les disponibilités en céréales permettent, en principe, de nourrir la population actuelle du monde, elles sont, elles aussi, partagées entre riches et pauvres. Ainsi 40 pour cent de la production mondiale des céréales ne sont pas consommées par les hommes, mais par des animaux, vaches, poules, cochons, qui termineront à leur tour dans l'assiette du consommateur fortuné. Or, sur dix calories de céréales fournies à un animal d'élevage, l'homme n'en retrouve qu'une dans son assiette. Selon le type de nourriture, de l'uniquement végétale à l'uniquement animale, la population maximale que peut nourrir la Terre varie alors dans un rapport de 1 à 10.

Toute évaluation de population maximale supportable par la planète, comme celles qui inspirent les évaluations de «carrying capacity» ou de développement durable, doit donc d'abord définir un style d'alimentation. On s'aperçoit alors, comme l'avait fait remarquer Alfred Sauvy, que les vrais concurrents des affamés des pays pauvres ne sont pas les repus des pays riches, mais leurs animaux domestiques.

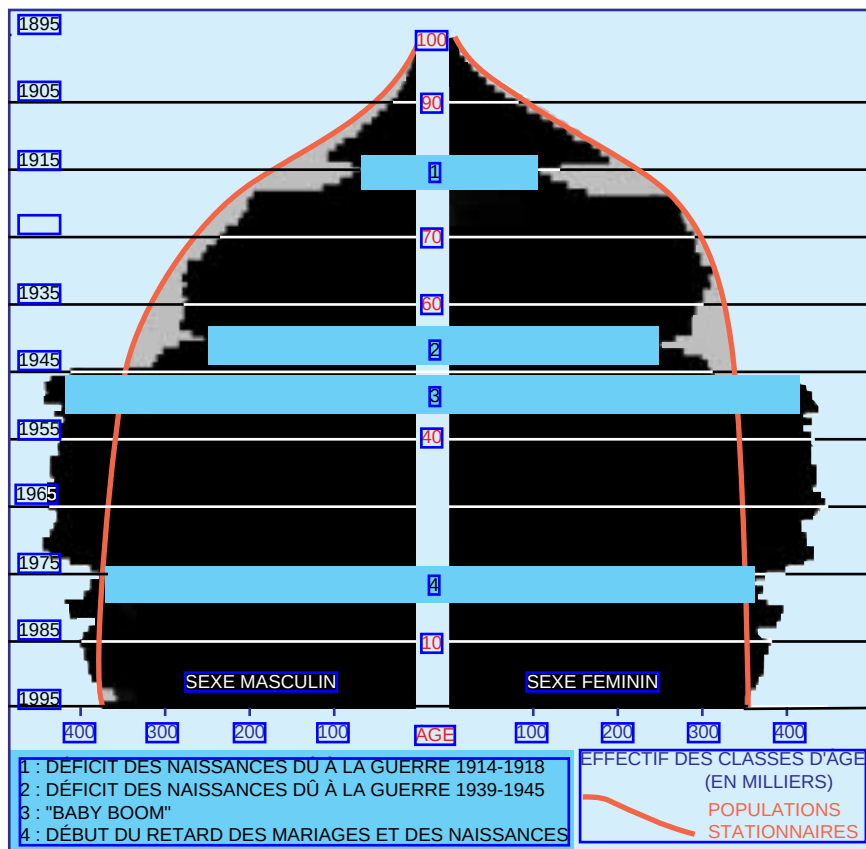
Le mythe d'une population mondiale construit donc le mythe de la surpopulation en masquant les aspects gênants de l'inégalité sociale. On peut parler de «naturalisation de la société», c'est-à-dire de transformation des faits sociaux en faits biologiques, tendance assez fréquente en démographie.

LES GRANDES INVASIONS

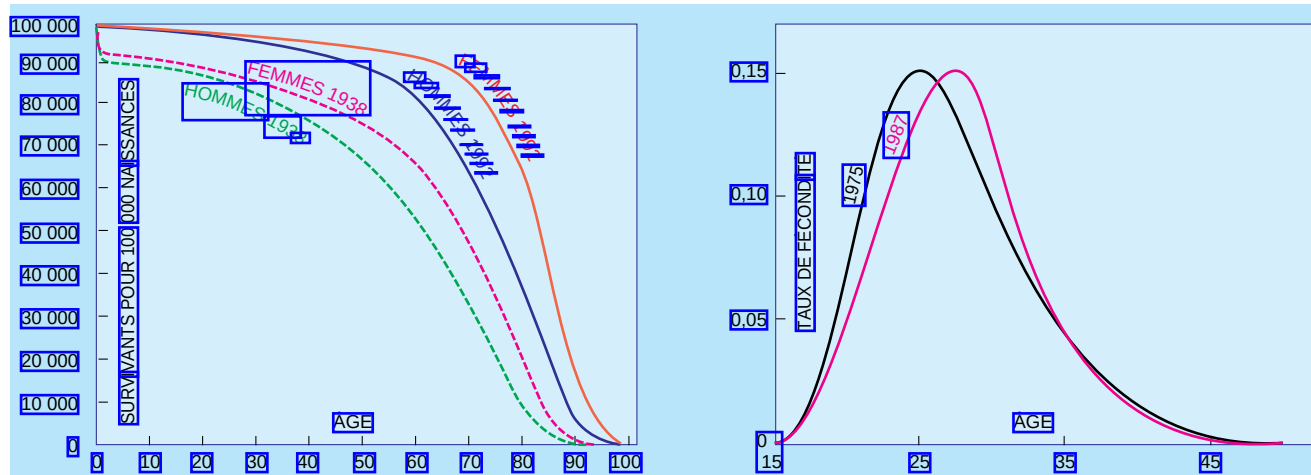
S'il est un domaine de la démographie où l'on retrouve le fantasme biologique et même physique, c'est celui de la migration internationale. Les métaphores les plus courantes sont d'ordre météorologique ou hydraulique : les basses pressions sont soumises à l'irruption des hautes pressions, deux vases communicants se remplissent inéluctablement par déversement de l'un dans l'autre. On a craint l'invasion allemande, puis celle d'Afrique du Nord. On s'oriente vers une peur de l'Afrique noire.

Il est vrai que les populations animales règlent en général leurs populations par dispersion plus que par territorialité. Toutefois, presque dès l'origine, l'espèce humaine s'est comportée différemment. On peut même soutenir qu'elle n'a connu de migrations importantes qu'à de brefs moments de son histoire.

Ainsi, lors de la grande phase d'extension de l'agriculture, le modèle de



2. Les générations adultes sont plus nombreuses que dans la population stationnaire en raison de l'immigration et du «baby-boom».



3. Evolutions du taux de mortalité et du taux de fécondité par âge en France. La courbe de fécondité se déplace vers les âges plus élevés, car les femmes retardent le moment où elles auront des enfants.

«vague d'avancée» de L. Cavalli-Sforza et M. Ammermann, repris par la nouvelle archéologie de Colin Renfrew, est préféré à une hypothèse d'invasion. Dans la vague d'avancée, les populations agricoles dont la densité atteint au moins dix habitants au carré se répandent en tache d'huile depuis leurs foyers proche-orientaux à l'ensemble de l'Eurasie en trois ou quatre millénaires, avec une progression d'environ 30 kilomètres par génération, en refoulant les populations très peu denses (moins d'un habitant pour dix kilomètres carrés) de chasseurs-cueilleurs.

Plus tard, ces peuples du Nord et de l'Est, Goths, Vandales, Huns heptaliques, puis Vikings, Hongrois et Turcs qui affolent notre imaginaire, n'ont jamais été bien nombreux : quelques dizaines de milliers de personnes ont dominé des millions d'agriculteurs sédentaires. Plus près de nous, il a fallu attendre l'extension européenne du XIX^e siècle pour assister à des migrations significatives. Cependant elles ont peu duré et, de plus, les migrations actuelles sont dérisoires en comparaison : ainsi dans les premières années du XX^e siècle, chaque année, un pour cent de la population italienne partait s'établir dans les pays neufs ou en France. Si, aujourd'hui, un pour cent des populations indiennes et chinoises quittait son pays, nous devrions recueillir plus de 20 millions de personnes. Même en majorant la clandestinité, nous sommes loin de ces chiffres.

A la même époque, les immigrants qui s'installaient chaque année aux États-Unis représentaient deux pour cent de leur population totale. L'équivalent dans la France actuelle serait une immigration annuelle de un million cent mille personnes. Les chiffres sont au moins dix fois plus faibles.

L'UTOPIE DE LA STABILITÉ

La stabilité dans l'espace semble se payer d'instabilité dans le temps. Or, la naturalisation, la biologisation, la réification des populations les assujettit à des lois immuables, telles celles qui président à la théorie des populations stables, le paradigme majeur de la démographie formelle. Une grande partie des infortunes de la démographie provient de là, tant dans l'analyse que dans la prévision. Par exemple, l'idée d'une croissance indéfinie, fondement des craintes malthusiennes, provient du postulat de stabilité des comportements et non de l'observation.

Le démographe italien C. Gini a comparé ces extrapolations à la croissance d'un jeune enfant. En généralisant l'augmentation de sa taille, cinq à six centimètres par an, à l'ensemble de sa vie, l'adulte aurait plus de cinq mètres de hauteur lorsqu'il atteindrait 100 ans. Plus sérieusement, mais dans la même veine, cette stabilité des comportements est à la base de la construction des indices démographiques de fécondité et de mortalité. L'espérance de vie, autant que l'indice de fécondité annuel, reposent sur l'hypothèse que les risques ou chances futurs de fécondité ou de mortalité par âge demeureront les mêmes que ceux observés durant l'année considérée. Or ces risques ont toujours beaucoup varié d'une année à la suivante dans le passé et, de surcroît, la nature de la variation (par exemple le retard de certains événements comme la natalité) influe sur la quantité mesurée, un peu comme le mouvement du train d'Einstein influe sur les mesures du temps et de l'espace relativiste.

Inutile alors de s'étonner de la faiblesse des projections démographiques.

Elles accentuent les tendances rigides que nous venons de passer en revue. Leur histoire traduit l'impossibilité de prévoir l'évolution des sociétés humaines, ce qui est désolant pour nos facultés d'analyse, mais rassurant pour notre sentiment de liberté.

Paradoxalement, ces défauts n'arrêtent ni les démographes ni les hommes politiques dans l'exploitation de thèmes natalistes ou xénophobes. Au contraire, dirait-on, car les deux professions échangent leur rôle. Presque chaque fois que j'ai discuté de démographie avec un homme politique, il m'a administré un cours magistral, et presque chaque fois qu'un démographe s'adresse à un politique, c'est pour lui indiquer les mesures urgentes à prendre. L'échange est à l'avantage des deux. L'homme politique paraît quitter l'arène des affaires mesquines en exprimant son attachement à des valeurs durables, la famille, transcender les intérêts socio-économiques en les associant dans de larges classes d'âge, les jeunes, les actifs, les vieux et, finalement, manifester l'attachement qu'il porte à sa patrie en l'assimilant à sa population. De même, le démographe apparaît comme un chercheur responsable dont les résultats sont immédiatement appliqués, et comme un précieux auxiliaire du politique. La farce serait amusante si elle ne contribuait pas à entretenir une masse d'idées fausses, de métaphores incorrectes et de contresens.

Hervé LE BRAS, Directeur de Recherche à l'INED, dirige le laboratoire de démographie historique. Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 5 juin 1996, à 9 heures.

L'oiseau géant *Gastornis*

ÉRIC BUFFETAUT

Quand l'imagination des paléontologues est source de reconstitutions imaginaires.

Le 12 mars 1855, le géologue français Constant Prévost signale à l'Académie des sciences une découverte paléontologique surprenante faite tout près de Paris, dans le conglomérat de Meudon, une formation géologique datant du début du Tertiaire. Il s'agissait d'un tibia ayant appartenu à un oiseau gigantesque, qui avait été trouvé par «un jeune homme studieux et plein de zèle», alors préparateur de physique au Conservatoire des arts et métiers. Gaston Planté – le jeune homme studieux – devait devenir un physicien renommé, qui mit au point, en 1859, les accumulateurs électriques au plomb, encore utilisés sur les automobiles aujourd'hui.

En 1855, ses activités de paléontologue amateur suscitent un grand intérêt dans la communauté scientifique. Le géologue Edmond Hébert, qui étudie l'os de Meudon, crée pour lui le nouveau genre *Gastornis*, l'«oiseau de Gaston», en l'honneur du découvreur. *Gastornis parisiensis* surprend d'abord par ses dimensions : le tibia mesure plus de 40 centimètres de long, et Prévost déduit de ces dimensions que l'oiseau devait peser 200 kilogrammes. Ce n'était pas le premier oiseau géant découvert à l'état fossile, puisque l'on avait signalé, quelques années auparavant, des oiseaux gigantesques dans des dépôts récents de Nouvelle-Zélande (*Dinornis*) et de Madagascar (*Aepyornis*). Pourtant, *Gastornis*, qui datait du début de l'Éocène, était, en 1855, un des plus anciens oiseaux connus.

Pendant longtemps, outre de maigres débris trouvés à Passy lors de la construction d'un gazomètre, *Gastornis* ne fut guère connu que par

deux os, le tibia découvert par Planté et un fémur trouvé peu après à Meudon par Hébert, ce qui était peu pour préciser sa position parmi les oiseaux. Hébert le rapprochait des «palmipèdes lamellirostres» (des oiseaux palmés), suivi en cela par l'expert en oiseaux fossiles Milne-Edwards, mais le paléontologue Lartet le trouvait plus proche des échassiers, et son collègue Valenciennes le comparait à l'albatros. Le prince Charles Bonaparte, ornithologue éminent, n'avait que mépris pour ces interprétations, car il voyait dans *Gastornis* un oiseau incapable de voler, proche de l'*Aepyornis* malgache. Ces divergences d'opinion n'empêchèrent pas l'oiseau de Gaston Planté de connaître une notoriété certaine, même au-delà des cercles scientifiques. Ainsi, il est mentionné dans de nombreux ouvrages de vulgarisation de la seconde moitié du XIX^e siècle.

C'est en 1878 que de nouveaux restes de *Gastornis* furent signalés. Un médecin rémois, Victor Lemoine, les avait trouvés près de Cernay, un village situé à quelques kilomètres de

Reims, dans des couches un peu plus vieilles que celles de Meudon et qui contenaient une faune de vertébrés ; cette faune fut longtemps la plus ancienne connue dans le Tertiaire d'Europe. Lemoine signala d'abord des os des membres de *Gastornis*, dont un tibia ressemblant fort à celui de Meudon. Puis, en 1881, il décrit d'autres restes, parmi lesquels des os qu'il interprétait comme étant des éléments du crâne et de la mandibule. Ils étaient surprenants : non seulement les os crâniens, contrairement à ceux des autres oiseaux, n'étaient pas fusionnés, mais les mâchoires portaient des sortes de dents.

UN CHAÎNON... FRAGILE

Selon Lemoine, *Gastornis* était un oiseau qui présentait d'intéressantes ressemblances avec les reptiles. En soulignant ces ressemblances, il inscrivait ses découvertes dans le cadre de la paléontologie transformiste, qui se développait alors, après l'acceptation de plus en plus répandue de la théorie de l'évolution. Le médecin rémois subissait l'influence des recherches du paléontologue américain Marsh sur les oiseaux à dents qui venaient d'être découverts dans l'Ouest américain, et où Darwin voyait l'une des plus belles preuves de l'évolution : *Gastornis* pouvait être considéré comme un «chaînon» manquant entre les reptiles et les oiseaux modernes.

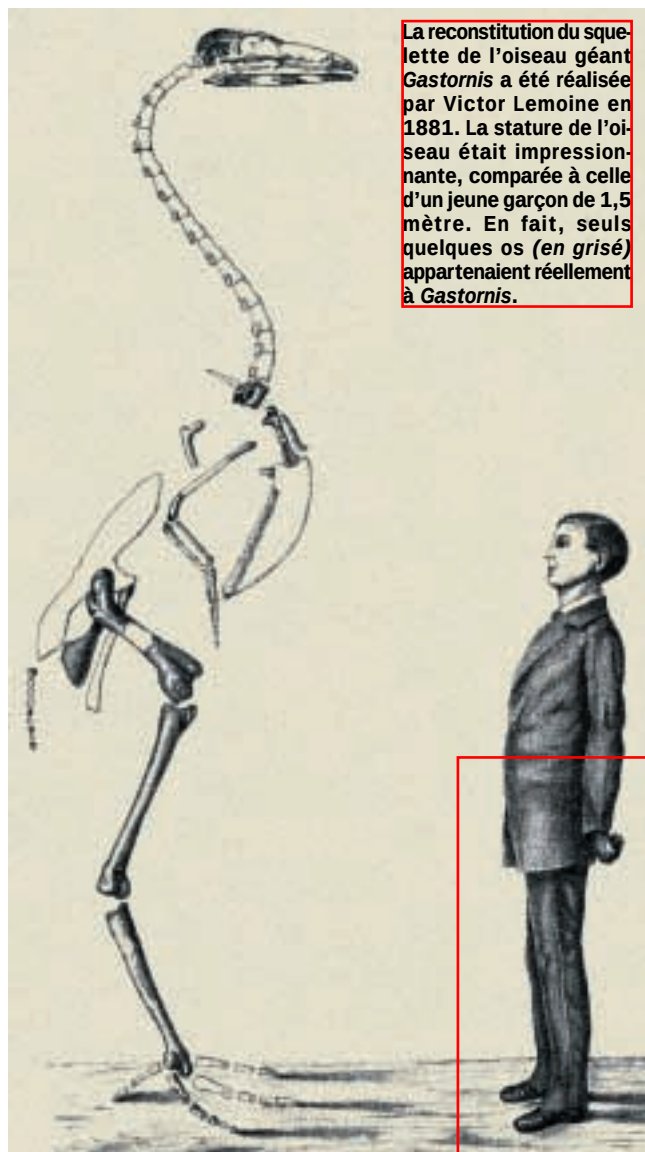
Fort de ses découvertes faites à Cernay, Lemoine entreprend de reconstituer l'ensemble du squelette de *Gastornis*. En 1881, il publie une lithographie montrant l'imposant squelette, haut de 2,7 mètres, d'un grand oiseau aux ailes atrophiées, au long cou et au bec denté. Cette reconstitution reposait sur de nombreuses

hypothèses, mais elle fut abondamment citée. Ainsi l'image du *Gastornis* de Lemoine se fixa pour un siècle dans l'esprit des paléontologues. Les éléments nouveaux susceptibles de modifier cette représentation firent longtemps défaut, et les quelques os découverts en Belgique et en Angleterre dans les années 1880 s'intégraient aisément dans la reconstitution de Lemoine.

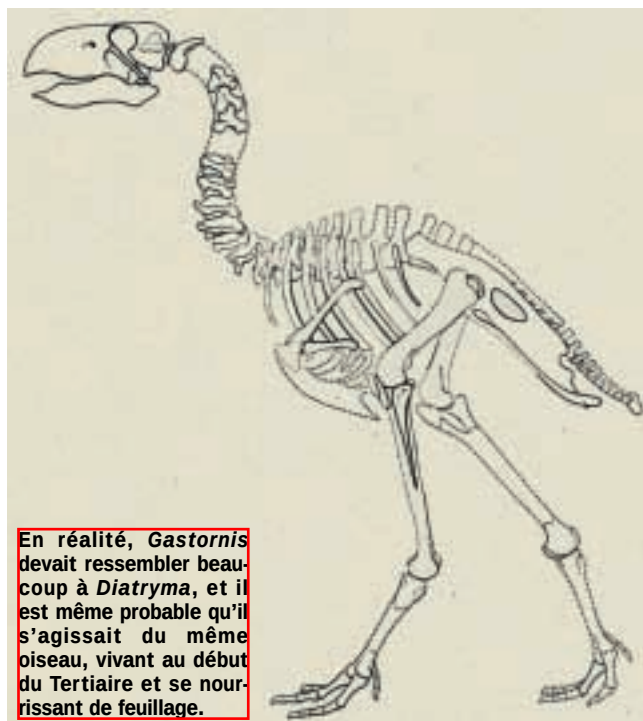
C'est d'Amérique du Nord qu'auraient pu venir des données nouvelles. Dès 1876, le paléontologue E. Cope décrit sous le nom de *Diatryma* des restes si fragmentaires



L'oiseau géant *Diatryma* vivait en Amérique du Nord ; un spécimen a été reconstitué d'après les os qui y ont été retrouvés. *Gastornis*, son cousin européen, devait lui ressembler.



La reconstitution du squelette de l'oiseau géant *Gastornis* a été réalisée par Victor Lemoine en 1881. La stature de l'oiseau était impressionnante, comparée à celle d'un jeune garçon de 1,5 mètre. En fait, seuls quelques os (en gris) appartenaient réellement à *Gastornis*.



En réalité, *Gastornis* devait ressembler beaucoup à *Diatryma*, et il est même probable qu'il s'agissait du même oiseau, vivant au début du Tertiaire et se nourrissant de feuillage.

que ses liens avec l'oiseau européen restent douteux. Lorsqu'un squelette presque complet de l'Éocène du Wyoming est décrit par W. Matthew et W. Granger en 1917, on doit se rendre à l'évidence : *Diatryma* diffère notablement de *Gastornis*, du moins tel que l'avait reconstitué Lemoine. L'oiseau américain était plus massif, avec un cou plus court, et une grosse tête pourvue d'un bec édenté évoquant celui d'un perroquet. Les relations entre ces deux oiseaux géants contemporains, vivant de part et d'autre de l'Atlantique, étaient douteuses.

NOUVELLES D'AMÉRIQUE

Pendant longtemps, on se contentait d'y voir différents «essais» de colonisation des continents par les grands oiseaux coureurs, après la disparition des dinosaures et avant le développement des grands mammifères. Puis, à partir des années 1920, les paléontologues européens semblent avoir

n'est pas surprenant, puisqu'au début du Tertiaire les faunes de l'Europe et celles de l'Amérique du Nord se ressemblaient, car une connexion terrestre existait dans l'Atlantique Nord (dans les années 1970, on a trouvé des restes de *Diatryma*, témoins de cette voie de passage, dans l'Arctique canadien).

Gastornis sortit de l'oubli lorsque le paléontologue américain Larry Martin entreprit, dans les années 1980, de reprendre l'examen des fossiles de Meudon et de Cernay, auxquels s'étaient ajoutés, dans les années 1950, de nouveaux os fossiles trouvés dans la région de Reims. Ses conclusions furent sans appel : la reconstitution de Victor Lemoine, qui avait fait autorité pendant plus de 100 ans, était presque totalement erronée. Emporté par son enthousiasme, Lemoine avait «fabriqué» en toute bonne foi un crâne de *Gastornis* avec des morceaux de poissons, de tortues et de divers reptiles. Le reste du squelette ne valait guère mieux, et contenait une bonne part

d'os de reptiles. Les intrus éliminés, il ne restait plus grand-chose du squelette reconstitué. En revanche, un examen attentif des os appartenant vraiment à un grand oiseau révélait beaucoup de ressemblances avec *Diatryma*, au point que Martin décida de placer *Gastornis* et *Diatryma* dans la même famille, les *Gastornithidae*.

Simultanément, un autre paléo-ornithologue américain, Allison Andors, étudiait à nouveau *Diatryma* et concluait à des ressemblances notables avec *Gastornis*, qui méritaient d'être confirmées par une comparaison approfondie. Ainsi, la reconstitution de Lemoine, qui avait connu un vif succès, avait empêché pendant une centaine d'années que les ressemblances entre *Gastornis* et *Diatryma* ne soient reconnues.

Aujourd'hui, on s'interroge : *Gastornis* et *Diatryma* ne sont-ils pas le même oiseau ? Le nom dédié à Gaston Planté aurait alors l'antériorité sur *Diatryma*, plus récent. Quelques restes inédits conservés à l'Université de Reims étayaient cette hypothèse, mais seule l'étude comparative détaillée, qui est en cours, la confirmera ou l'infirmera.

Ainsi, les paléontologues doivent garder une attitude critique à l'égard des reconstitutions, même (et peut-être surtout) quand elles sont devenues classiques. La seule source fiable reste l'analyse des fossiles eux-mêmes.

Eric BUFFETAUT est directeur de recherche au CNRS, dans le laboratoire de Paléontologie des vertébrés de l'Université Paris VI.

Quelques conseils culinaires

Les dictons culinaires en tout poils fleurissent dans les livres de cuisine. Lesquels sont exacts et lesquels sont faux? Des tests rigoureux le révèlent.

On dit que les fruits rouges ne doivent pas être mis dans un récipient en cuivre étamé, c'est-à-dire recouvert intérieurement d'étain. Mais l'expérience qui consiste à placer des groseilles ou des framboises dans de tels récipients ne montre aucun effet gênant. Le conseil serait-il faux?

Ou bien les métaux incriminés interviennent-ils par leurs sels? Sur des fruits rouges, versons une pincée de divers sels métalliques : d'argent, d'aluminium, de fer, de cuivre ou d'étain. Immédiatement les sels d'étain provoquent l'apparition d'une désagréable couleur violacée, parce que les pigments des fruits rouges se lient aux atomes métalliques ; les électrons qui assurent cette liaison sont alors différemment répartis dans les molécules des pigments, qui absorbent différemment la lumière. C'est la cause du dicton, qui doit donc être légèrement amendé : les fruits rouges ne doivent en aucun cas être déposés dans des récipients en cuivre étamés et sales.

Les bassines en cuivre : on dit qu'il faut cuire les confitures dans des bassines en cuivre ; est-ce justifié?

Deux expériences nous donnent la réponse : d'une part, quand on cuit une confiture dans une bassine en cuivre, on découvre que le cuivre est mis à nu là où il était en contact avec la confiture. Autrement dit, du cuivre passe dans la confiture. Puis, une autre expérience, qui consiste à diviser une confiture préalablement cuite dans un récipient inerte chimiquement (pyrex, par exemple), puis à ajouter un sel de cuivre dans une des deux moitiés, montre que la confiture est plus ferme quand elle contient du cuivre. Conclusion : le cuivre des bassines à confiture est utile parce qu'il contribue à leur fermeté, en se liant à deux molécules de pectine (la confiture est un gel, c'est-à-dire une sorte de filet à trois dimensions, les mailles du filet étant des molécules de pectine).

Toutefois, la toxicité du cuivre poussera à s'en méfier. Ne pourrait-on remplacer le cuivre par un autre ion divalent, tel le calcium, en ajoutant à la confiture de la craie, ou, mieux, du citrate de calcium?

Les œufs : les œufs dits «hamine», préparés dans certaines communautés

juives séfarades, telle celle de Grèce, sont réputés pour leur tendreté, alors qu'ils sont cuits pendant plusieurs heures. Comment les cuisinières juives évitent-elles l'odeur de sulfure d'hydrogène des œufs durs trop cuits et pourquoi le jaune ne prend-il pas la teinte verte qu'a le jaune des œufs durs après une cuisson excessive?

Des expériences de cuisson d'œufs dans l'eau à différentes températures donnent la clé du mystère : quand un œuf est cuit dans l'eau bouillante, à la température de 100 degrés, sa masse diminue progressivement, parce que de l'eau est éliminée. Mais quand un œuf est cuit à une température peu supérieure à la température de coagulation de ses protéines (par exemple, vers 80 degrés), il coagule en conservant son eau, gage de tendreté et de moelleux.

Or la cuisson des œufs hamine s'effectue traditionnellement «dans la cendre», où l'on mesure une température comprise entre 50 et 90 degrés seulement. Il n'y donc pas de paradoxe de l'œuf hamine, mais une bonne compréhension empirique de la coagulation des protéines lors de la cuisson des œufs.

La béarnaise au fromage : une recette pour finir! La sauce béarnaise est formée par une réduction d'échalotes dans du vinaigre, à laquelle on ajoute un jaune d'œuf et du beurre que l'on fouette à mesure qu'il fond. Ne pourrait-on se fonder sur la compréhension de cette préparation pour inventer une nouvelle sauce?

La béarnaise est une émulsion : le jaune d'œuf sert à apporter des molécules tensioactives, avec une partie soluble dans l'eau et une partie insoluble. Ces molécules se disposent autour des gouttelettes de beurre fondu, qu'elles séparent. On comprend qu'une émulsion serait également obtenue si l'on mélangeait une solution aqueuse, des molécules tensioactives et une autre matière grasse que le beurre. Partons donc du jus que libèrent des champignons lors de leur cuisson. Ajoutons un jaune d'œuf ou une feuille de gélatine (également tensioactive), puis du roquefort ou tout autre fromage. Si l'on fouette, la matière grasse du fromage s'émulsionne en une... béarnaise au fromage. Notons que, selon le même principe, on peut obtenir une béarnaise de chocolat.



Des framboises additionnées de sels d'étain (à droite) prennent une teinte violacée.

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science*, le 26 juin 1996, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

La télévision interactive

Des programmes de télévision sont couplés au réseau Internet.

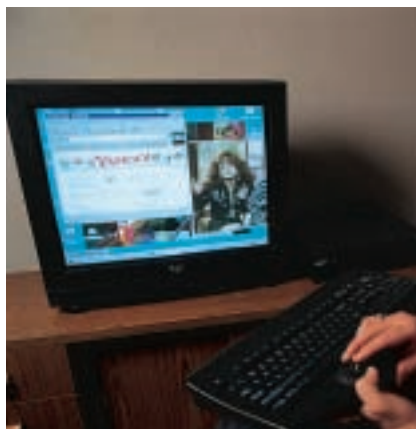
Un jour prochain, toutes les informations, tous les médias seront accessibles par les réseaux. La télévision pourrait être l'étape suivante. Aux États-Unis la Société *Intel* a mis au point le procédé *InterCast* qui permet d'entremêler les pages de la «toile d'araignée mondiale», le *Web*, avec les programmes de télévision. À l'aide de cette technique, les producteurs de l'audiovisuel enrichiront en temps réel leurs émissions avec toutes les ressources du réseau *Internet*. Lors de la retransmission des Jeux olympiques, par exemple, un spectateur pourrait obtenir des informations sur les athlètes ou sur les performances d'une équipe. Ces nouveaux programmes de télévision fourniront quantités d'informations de fond à ceux qui souhaitent aller au-delà d'émissions parfois superficielles. De surcroît, les annonceurs pourront proposer aux téléspectateurs de commander leurs produits.

La chaîne de télévision locale KGW à Portland dans l'Oregon, située à proximité de l'usine *Intel* de Hillsboro, a fait une démonstration réussie de cette technique l'an passé. Les constructeurs d'ordinateurs *Gateway* et *Packard Bell* ont prévu de commercialiser, courant 1996, des machines équipées de la technique *InterCast*. Ils misent sur une expansion rapide des émissions spécifiques dès que les machines adaptées seront disponibles.

La technique est simple : les signaux de télévision contiennent des pauses nommées signaux de synchronisation de ligne et de trame, de manière à laisser le temps au faisceau électronique qui balaye l'écran pour créer l'image, de revenir après chaque ligne et de retourner d'un angle de l'écran à l'angle opposé. Aux États-Unis ces pauses sont déjà utilisées pour transmettre des données qui servent à créer des sous-titres pour les malentendants ; en Europe, durant ces pauses, on transmet des informations de télétexte. *InterCast* utilise environ la moitié de la capacité restante pour transmettre des pages *Web* à la vitesse de 96 000 bits par seconde, soit trois fois plus vite que le modem commercial le

plus rapide. Ces pages, reçues en même temps que le signal de télévision, sont stockées sur le disque dur de l'ordinateur-télévision et peuvent alors être affichées sur une fenêtre à l'écran. Outre un ordinateur recevant la télévision, le seul élément spécifique requis est un circuit intégré valant 250 francs qui décode les pages *Web*.

Dans le cas le plus simple, ces pages contiennent des informations générales sur l'émission regardée, ce que fait déjà tout programme de télévision. Le procédé dévoile toute sa richesse si, au lieu de regarder passivement l'écran, le spectateur est relié, via les pages *Web* reçues, au réseau *Internet* : c'est de la télévision interactive qui utilise une infrastructure et une technique déjà en place.



Le procédé *InterCast* permet aux chaînes de télévision de transmettre des pages *Web* en même temps que leurs programmes. Le spectateur utilise alors les ressources du réseau *Internet* tout en regardant une émission.

Vous voulez en savoir plus sur le film que vous êtes en train de regarder ? Sur la page reçue avec le film, un lien peut vous connecter à une base de données qui contient des informations allant de la biographie des acteurs aux critiques parues sur le film. Vous voulez participer à un jeu télévisé ? Vous pouvez répondre directement sur votre ordinateur. La seule limite à l'interactivité est le débit du lien entre votre ordinateur-télévision et le réseau. En

pratique, les particuliers auront pour la plupart des modems rapides, capables de transférer 28 800 bits par seconde, ce qui est suffisant pour du texte et des images fixes. Les sociétés de télévision par câble commercialiseront cette année des modems qui transmettent plus d'un million de bits par seconde, ce qui suffit pour de la vidéo rudimentaire.

DES PROGRAMMES SPÉCIFIQUES

Pour que le procédé *InterCast* donne toute sa mesure, les producteurs de programmes de télévision devront réfléchir à la complémentarité entre ce nouveau média et l'ancien. Cette technique prendra son essor si on utilise ses spécificités. Tout d'abord il faudra utiliser la richesse de l'information disponible sur le *Web* : on y trouve plus d'informations que tout ce qui pourrait être émis à la télévision durant des décennies. Dès lors, si une télévision généraliste reste nécessaire, la télévision interactive devra accueillir des programmes spécialisés.

Ensuite, les programmes devront utiliser l'interactivité. Le réseau est une voie à double sens qui permet aux personnes de communiquer avec ceux qui font la télévision. Ce serait la participation aux programmes plutôt qu'une simple ingurgitation d'images. Enfin, les spectateurs pourront interagir les uns avec les autres aussi facilement qu'avec ceux qui créent les programmes. Des communautés de personnes avec des centres d'intérêts communs pourraient ainsi se former.

D'autres techniques qui enrichissent la télévision sont à l'essai. La Société danoise ITE vient de mettre au point un procédé qui combine la télévision, le CD-ROM et le réseau. Dans ce cas, la chaîne de télévision ne transmet pas des pages *Web* mais des signaux qui mettent à jour des fichiers ou activent le lecteur de CD-ROM. La Société *Philips* lance un produit de télévision interactive fondé sur le télétexte.

Il n'y aucune raison pour qu'on ne puisse connecter d'autres appareils au réseau comme le matériel électroménager. Le four pourrait être relié à un serveur qui contient des recettes de cuisine. Le photocopieur serait relié au service après-vente du fabricant et à un manuel d'utilisation. Tout ce que vous avez un jour cogné, insulté, ou éteint parce que vous le jugiez irrémédiablement stupide améliorerait ses performances si on lui fournissait plus d'informations. Si le réseau peut rendre la télévision intelligente, imaginez ce qu'il pourrait faire pour un aspirateur ! ☐

La chute des cheveux

Une molécule préservant la souplesse du collagène permet au cheveu de rester bien implanté, et freine la chute.

Rapunzel, Rapunzel, laisse descendre tes longs cheveux d'or. Et le prince rejoignait, grâce à cette échelle, sa bien-aimée emprisonnée dans une haute tour dépourvue de porte et dont la seule issue était la fenêtre située à plus de dix mètres du sol... À l'évidence, les frères Grimm ignoraient tout de la biologie du cheveu : d'après les résultats obtenus par l'équipe de Monique Courtois des Laboratoires L'Oréal, une chevelure ne pourrait dépasser 1,5 mètre. On déduit ce chiffre de l'étude menée pendant 14 ans sur une dizaine de volontaires, et qui a précisé le cycle pileux. La croissance des cheveux se divise en trois phases : une phase de croissance, ou phase anagène, suivie d'une phase catagène où les mécanismes de croissance «s'éteignent» progressivement, et enfin une phase télogène où la croissance cesse totalement ; à l'issue de cette dernière phase, le cheveu tombe.

Tous les cheveux croissent-ils à la même vitesse ? Tombent-ils au bout du même laps de temps ? Repoussent-ils aussi rapidement ? Pourquoi le vieillissement s'accompagne-t-il d'une perte accentuée des cheveux ? Certaines questions restent ouvertes, mais le cheveu livre quelques-uns de ses secrets.

Pendant la phase anagène, qui dure de quelques mois à plusieurs années, le follicule produit la tige pileuse de façon continue. Pendant cette phase, la «racine», ou follicule pileux, est solidement implantée dans le derme. Au cours de la phase catagène, qui dure environ trois semaines, le follicule pileux régresse, c'est-à-dire que la base du cheveu remonte dans l'épiderme, vers la surface. Cette

phase est suivie d'une phase de repos, qui dure environ trois mois. À la fin de cette phase le cheveu tombe. Ensuite, le cycle reprend plus ou moins vite à partir du même follicule. L'étude a montré que la phase anagène dure en moyenne trois ans et que 90 pour cent des cheveux sont en phase anagène alors que les 10 pour cent restant sont au repos.

On estime que le quart environ de la chevelure se renouvelle chaque année, bien que quelques cheveux aient une durée de vie supérieure à 10 ans (ils poussent d'environ 0,3 millimètre par jour). Le cycle dépend de l'état général, de facteurs génétiques et hormonaux, de l'environnement et de l'âge : avec le vieillissement, il raccourcit, et les cheveux sont de plus en plus fins. La phase de repos s'allonge. L'étude a montré que beaucoup de cheveux sont en phase de repos en été. Deux mois plus tard, les cheveux tombent : la chute est maximale en automne.

INHIBER L'ALOPÉCIE

Ces résultats ont été complétés par des études *in vitro*. Pour étudier les facteurs qui influent sur la pousse des cheveux, ou tester l'effet de substances thérapeutiques, on dispose d'un modèle *in vitro*. Dans un milieu de culture approprié, les cheveux se développent comme des entités autonomes pendant environ 45 jours. Certains facteurs, telle l'insuline, sont nécessaires à la croissance des cheveux *in vitro*, inversement d'autres inhibent la prolifération. Ce modèle permet d'étudier les facteurs de l'alopecie, ou raréfaction des cheveux, laquelle résulte d'une phase de croissance accélérée suivie d'une phase de repos prolongée, voire d'un arrêt de la phase de croissance.

Coupe longitudinale d'un cheveu, montrant la répartition d'une protéine d'adhérence (en brun rouge) dans la gaine interne du follicule pileux.



Pour évaluer la durée des phases de croissance et de repos des cheveux, on rase une zone d'environ un centimètre carré et l'on observe à quelle vitesse repoussent les cheveux ; par des observations rapprochées, on repère les cheveux qui poussent régulièrement et ceux qui sont en phase de repos.

Dispose-t-on d'un traitement contre la chute des cheveux ? Le minoxidil est un vasodilatateur puissant, développé comme anti-hypertenseur, et qui a pour effet secondaire de stimuler la pousse des cheveux, car il améliore l'afflux sanguin autour du follicule. Toutefois, ce médicament n'est pas spécifique de la chute des cheveux. Or, l'équipe de Bruno Bernard, des Laboratoires L'Oréal, a montré que la gaine de collagène qui enserre le cheveu s'épaissit lors du vieillissement ; la racine a de moins en moins de place dans le derme et elle est expulsée par la poussée croissante exercée par le réseau de collagène qui se rigidifie. Une enzyme, la lysyl hydroxylase, permet la formation de «ponts» entre les brins de collagène, formant un réseau de plus en plus dense qui empêche au cheveu de s'ancrer dans le derme.

En inhibant cette enzyme, c'est-à-dire en minimisant la réticulation du réseau de collagène, peut-on prévenir la chute des cheveux ? Effectivement un inhibiteur de la lysyl hydroxylase, l'aminexil, mis au point par l'équipe de Jean-Baptiste Galey, des Laboratoires L'Oréal, prévient la réticulation du collagène. D'après les premiers résultats des essais cliniques, il prévient la chute des cheveux quand il est appliqué sur le cuir chevelu sous la forme d'une solution diluée (le minoxidil inhibe également la lysyl hydroxylase). L'aminexil est sans doute un premier pas vers la fin de l'alopecie masculine. □

Anti-analgésique analgésique

La morphine soulage la douleur ; des substances qui en bloquent l'action calment aussi la douleur.

La douleur est un signal d'alarme permettant à l'organisme d'identifier, dans son environnement, les éléments qui menacent son intégrité et sa survie. Les messages douloureux sont transmis des territoires sensibles vers la moelle épinière ; des relais les transmettent vers le cerveau, lequel commande la fuite ou l'évitement. Certaines substances diminuent la douleur, notamment la morphine et ses analogues naturellement présents dans l'organisme, les opioïdes endogènes ou enképhalines. Certaines molécules renforcent la douleur et, plus étonnant, d'autres encore, ont les deux effets. Ainsi, nous avons montré qu'une molécule nommée NPFF se comporte comme un anti-opioïde et renforce la sensation douloureuse quand elle agit dans le cerveau, mais qu'elle calme la douleur lorsqu'elle agit dans la moelle épinière.

Les opiacés, dérivés de la morphine, agissent sur la moelle épinière par l'intermédiaire de récepteurs dits opioïdes ; placés sur la voie ascendante qui conduit les perceptions vers la moelle épinière, puis vers le cerveau, ces récepteurs bloquent l'entrée des signaux douloureux (ou nociceptifs) vers les centres supérieurs du système nerveux ; ainsi, ils diminuent la sensation douloureuse.

Toutefois, la sensation douloureuse ne doit pas être supprimée, car ce signal d'alarme améliore les chances de survie et favorise la reconnaissance des objets responsables de sensations douloureuses. Ainsi, les effets des opioïdes doivent être compensés en permanence, dans le système nerveux, par les effets opposés des anti-opioïdes endogènes. Il y a quelques années, on a découvert des neuropeptides qui bloquent l'activité analgésique des opiacés : ce sont des anti-

opioïdes qui favorisent la transmission des messages douloureux et augmentent la sensation de douleur.

Ainsi, le neuropeptide NPFF est un anti-opioïde. Isolé chez le bœuf en 1985, ce peptide est un neurotransmetteur présent en très forte concentration chez les mammifères. Administré dans le cerveau, le NPFF inhibe l'analgésie produite par la morphine. Inversement, des anticorps qui inactivent le NPFF augmentent l'analgésie morphinique.

UN PEPTIDE, DEUX ACTIONS

Toutefois, diverses données pharmacologiques remettent en cause le dogme selon lequel un anti-opioïde potentialise la douleur. Comme le NPFF est rapidement dégradé par des enzymes, les neuropharmacologues ont étudié des analogues qui ont les propriétés du NPFF, mais qui sont plus résistants. Ainsi, chez le rat, l'injection directe d'analogues du NPFF dans la moelle épinière produit une analgésie très puissante : ils agissent pendant 48 heures, tandis que la morphine, administrée de

cette façon, calme la douleur pendant 120 minutes environ et que les doses efficaces sont 50 fois supérieures à celles du NPFF.

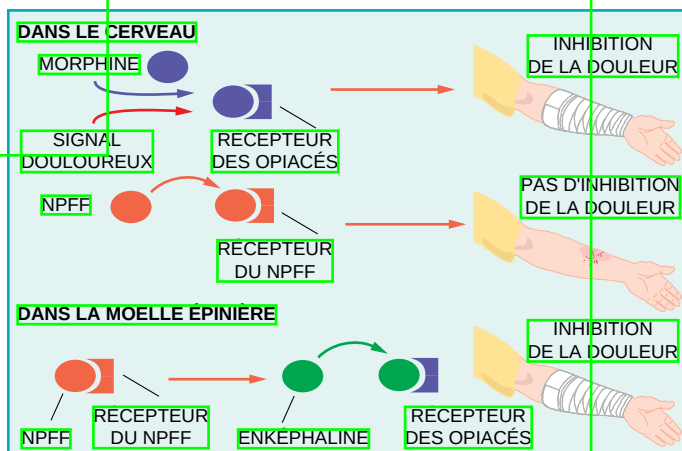
Comment le NPFF agit-il ? On constate que l'action analgésique des analogues du NPFF est bloquée (comme celle de la morphine) par des substances qui inhibent l'action des opiacés (des antagonistes opioïdes). On pourrait en conclure que ces analogues agissent sur les récepteurs des opiacés localisés dans la moelle épinière. En fait, ces analogues stimulent indirectement les récepteurs opioïdes : en agissant sur leurs propres récepteurs, ils déclencheraient la libération d'enképhalines endogènes, et ce seraient ces substances qui, en activant les récepteurs opioïdes, déclencheraient l'action analgésique. Ces résultats inattendus montrent que, dans la moelle épinière, le NPFF utilise le système opioïde pour produire ses effets.

Les conclusions préliminaires assimilant le NPFF à un anti-opioïde n'étaient qu'une facette d'une réalité plus complexe : selon l'état physiologique de l'organisme, le NPFF renforcerait ou inhiberait la douleur. Chez les rongeurs, le système opioïde est plus actif la nuit que le jour, au moment où la douleur est la plus probable, et où la vigilance de l'animal doit être maximale. Luis Stinus et Guy Simonnet, de l'Université de Bordeaux, ont montré que le NPFF se comporterait, chez le rat, comme un anti-opioïde le jour et comme un analgésique la nuit, modulant, selon les besoins, l'action des opiacés endogènes.

En fait, un équilibre fonctionnel semble régner entre le NPFF et les systèmes opioïdes, et la modification de cet équi-

libre conduit à des réactions différentes. Ce changement de statut du neuropeptide NPFF servira peut-être à la mise au point de médicaments. Dans la mesure où un tel effet pourra être reproduit chez l'homme, les analogues du NPFF devraient se révéler être de puissants analgésiques après injection directe dans la moelle épinière. Puisque le NPFF potentialise l'analgésie déclenchée par la morphine, on pourrait combiner l'action de ces deux substances et utiliser des doses de morphine très faibles, minimisant ainsi les risques d'effets secondaires, notamment l'accoutumance.

Jean-Marie ZAJAC,
CNRS, IPBS, Toulouse



En stimulant les récepteurs des opiacés, la morphine inhibe les sensations douloureuses. Dans le cerveau, quand le NPFF se lie à ses récepteurs, il peut empêcher la morphine d'agir : il augmente les sensations de douleur. Au contraire, dans la moelle épinière, le NPFF déclencherait la libération d'enképhalines, des substances synthétisées par l'organisme et analogues à la morphine : en se fixant sur les récepteurs des opiacés, les enképhalines inhibent la douleur. Le NPFF agit alors indirectement comme un analgésique.

Stratégies de chasse

L'environnement et la culture guidaient les choix des hommes du Paléolithique.

Comment les hommes du Paléolithique composaient-ils leurs menus? Ils choisissaient parmi les ressources alimentaires disponibles, en fonction de leurs besoins, mais aussi de leur culture et de leur technique. Les reliefs de leurs repas nous permettent de reconstituer leur environnement naturel et de connaître l'abondance des ressources.

Au Paléolithique moyen et supérieur (il y a entre 300 000 et 10 000 ans), en Europe, les hominidés, hommes de Néandertal ou de Cro-Magnon, vivent en petits groupes de chasseurs-cueilleurs. Ils pratiquent la prédation, par la chasse et la pêche, et le charognage. La prédation requiert une bonne connaissance du gibier et du territoire : les chasseurs accumulent des informations écologiques, éthologiques et techniques. Leurs stratégies, leurs gestes, voire leurs armes sont adaptés au comportement de l'animal convoité et au milieu où il évolue. Des choix culturels s'expriment aussi dans les modes de prédation. Ainsi les restes des animaux chassés et consommés renseignent-ils les préhistoriens sur l'environnement et sur les modes de vie des hommes préhistoriques.

Les chasseurs n'abattent pas le gibier au hasard : ils choisissent les proies qui leur apporteront le plus d'énergie pour un investissement d'énergie et de temps minimal. D'après l'étude de plusieurs sites archéologiques, nous avons élaboré deux modèles pour distinguer les périodes d'abondance et de pénurie.

En période d'abondance, la recherche d'animaux gras est privilégiée. La faune consommée est dominée par une ou deux espèces grégaires d'origine locale, peu dangereuses et productives, exclusivement chassées en troupeaux. On retrouve, parmi les animaux abattus, plus de mâles que de

elles, ou inversement selon la saison (ils ne sont pas gras au même moment de l'année), mais peu ou pas d'ossements de fœtus ni de nouveau-nés : les femelles gravides sont épargnées. La saisonnalité d'abattage, caractérisée par la pousse et l'usure des dents, par la croissance des os ou par les bois des cervidés, est fortement



Les hommes du Paléolithique n'étaient pas, comme sur ce tableau peint à la fin du siècle dernier, à la merci des fauves et de la présence ou non de gibier. Leurs stratégies de subsistance étaient parfaitement adaptées à leur environnement.

marquée ; les adultes dans la force de l'âge sont recherchés. Enfin les carcasses ne sont pas exploitées complètement : le matériel osseux est peu fracturé.

PÉNURIE ET PÉRIODES FROIDES

En période de pénurie en revanche, la diversité des espèces abattues est plus grande et la chasse est complétée par le charognage. On trouve autant de mâles que de femelles, de tous les âges, y compris des femelles gravides ou allaitantes, mais avec un déficit en jeunes, dont la viande est trop maigre. La saisonnalité est peu marquée, et l'origine des animaux peut être éloignée du lieu de consommation. Le matériel osseux

très fracturé témoigne d'une exploitation poussée des carcasses.

Au cours du Paléolithique, le climat européen a beaucoup varié. Quelles ont été les conséquences de ces variations, notamment les phases glaciaires, sur l'alimentation humaine? Lors d'un refroidissement ou d'un assèchement du climat, la biomasse diminue : la productivité totale nette d'une steppe, en condition froides et sèches, est de 4,2 tonnes par hectare en moyenne, contre 11,2 tonnes par hectare pour une prairie en conditions tempérées et humides. La végétation se raréfie, les herbivores aussi. Si l'homme ne change pas de territoire et ne l'agrandit pas, il augmente sa consommation de viande au détriment de sa consommation de végétaux, plus rares. Les animaux des régions froides sont plus gras, afin de lutter contre le froid. Pour maintenir un bon équilibre physiologique, il faut consommer des nutriments complémentaires à ceux fournis par la viande (calcium, potassium, sodium, magnésium, vitamines A, E, C, B10). Les hommes préhistoriques chassent alors des animaux gras, des jeunes, des femelles gravides ou allaitantes, et mangent des abats, crus de préférence.

Cette situation est illustrée par des restes osseux du Paléolithique moyen découverts à Mützig, en Alsace. Le climat, aux saisons marquées, était humide et relativement rigoureux en hiver ; un important dégel se produisait au printemps. La chasse, menée pendant l'été, était orientée vers le renne et le cheval, dont les restes prédominent. Les animaux abattus étaient surtout des jeunes et des adultes dans la force de l'âge, avec une prédominance des femelles pour le renne, mais pas de fœtus ni de nouveau-nés. De petites hardes étaient chassées, ainsi que quelques animaux solitaires. La faune était d'origine locale. Enfin, les carcasses de renne et de cheval ont été exploitées intensément.

Dans certains sites où l'approvisionnement en matière première pour la confection des outils et des armes semble difficile et où, en revanche, les restes osseux indiquent une période d'abondance, on suppose que les préhistoriques s'y sont installés car l'approvisionnement en aliments y était aisé et abondant.

Marylène PATOU-MATHIS, CNRS, Institut de paléontologie humaine.

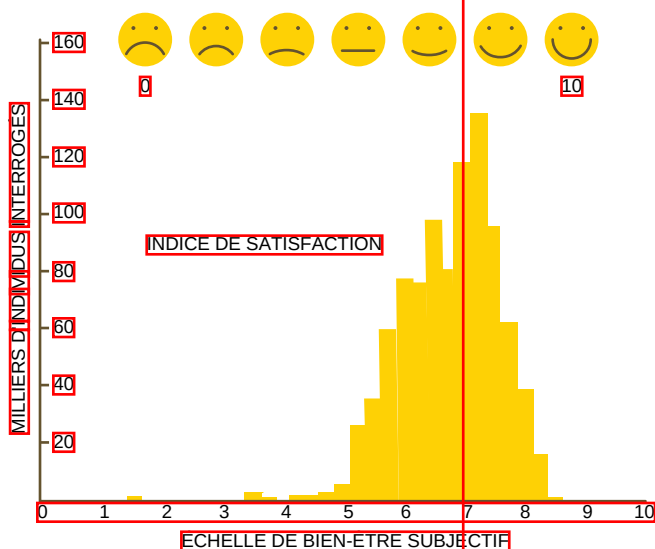
Le sentiment de bonheur

Les gens sont plus heureux qu'on le prétend, surtout les personnes mariées.

Le bonheur n'est guère étudié, le malheur, beaucoup plus, comme si le bonheur s'obtenait par élimination des sources de malheur...

Depuis 20 ans, les chercheurs américains David Myers et Ed Diener ont rassemblé les informations de dizaines d'enquêtes à travers le monde, concernant des centaines de milliers de personnes interrogées sur leur sentiment de «bien-être». Aux États-Unis et en Europe, les gens sont plus heureux qu'on ne le pensait et le sentiment de bonheur ne dépend pas notablement de la richesse ou de l'environnement.

Comment les chercheurs en sciences sociales mesurent-ils quelque chose d'aussi indéfinissable que le bonheur? En demandant aux personnes interrogées de définir leur sentiment de bonheur et de malheur : comparés aux individus déprimés, les gens heureux sont moins égocentriques, moins agressifs, moins grossier et sont en meilleure santé. La répartition de l'indice de bonheur en fonction de divers paramètres.



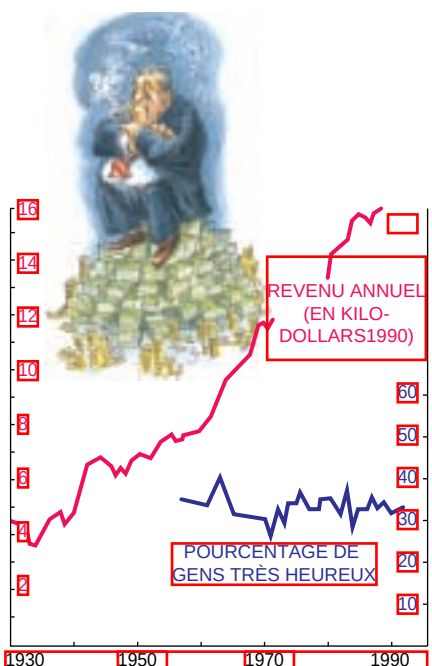
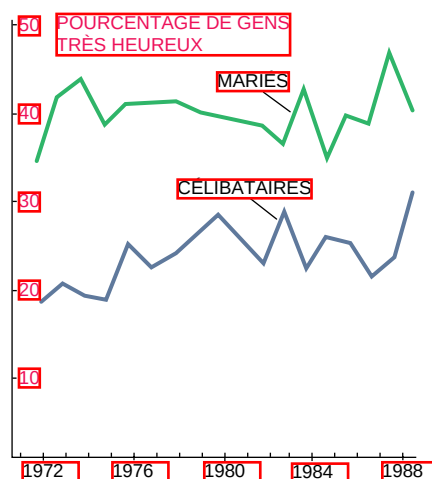
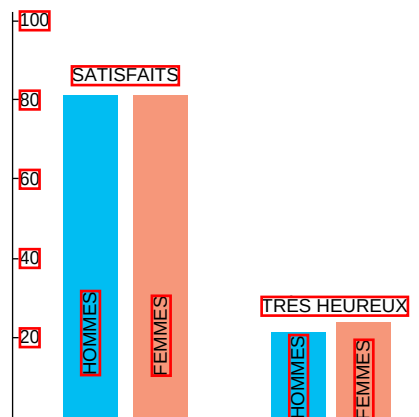
Les chercheurs en sciences sociales ont enquêté sur le sentiment de bien-être subjectif d'un échantillon représentatif de la population américaine. On demande aux personnes interrogées à quel pictogramme leur humeur correspond le mieux (en haut). En rassemblant les données de près d'un million d'enquêtes portant sur plus d'un million de personnes, on obtient une estimation du sentiment de bien-être subjectif.

tels que l'âge, le sexe, la richesse, la race ou le niveau d'éducation, révèle une constance étonnante : les gens sont à peu près aussi heureux, qu'ils soient jeunes ou âgés, riches ou pauvres, noirs, jaunes ou blancs, éduqués ou illettrés, hommes ou femmes.

Ainsi les Américains ont un revenu deux fois supérieur à celui de 1957 (en dollars constants), mais la proportion de ceux qui se déclarent très heureux a décliné de 35 à 29 pour cent durant la même période. Une enquête, menée parmi les 100 Américains les plus riches a même révélé que ceux-ci sont seulement légèrement plus heureux que la moyenne. Ce n'est que dans les pays les plus pauvres, comme l'Inde ou le Bangladesh, que le revenu est un indicateur fiable du bien-être ressenti.

Les habitants des pays riches sont-ils beaucoup plus heureux que ceux des pays plus pauvres? En général oui, mais la différence est faible. Au Portugal, par exemple, une personne sur dix seulement se déclare très heureuse, tan-

dis qu'aux Pays-Bas, beaucoup plus prospère, la proportion de gens très heureux est de quatre sur dix. Durant les années 1980, les Irlandais se déclaraient plus heureux que les habitants de la riche République fédérale d'Allemagne. Comme d'autres facteurs, tels les droits civiques et le niveau d'instruction, sont également corrélés à la richesse d'une nation, on ne peut déterminer si le bonheur des habitants des pays riches est fondé sur



Le bonheur apparaît relativement uniforme. Les personnes des deux sexes rapportent un sentiment de bonheur similaire (en haut). L'une des seules variations marquées se situe entre les personnes mariées et les célibataires (au milieu). Aux États-Unis, le «bien-être subjectif» est resté à peu près constant entre 1930 et aujourd'hui, alors que les revenus augmentaient (en bas).

leur richesse ou est une conséquence d'autres facteurs de bien-être.

Études après études, on relève, chez les gens heureux, quelques traits de caractère. Ils possèdent une haute opinion d'eux-mêmes. Ils pensent généralement qu'ils sont plus moraux, plus intelligents, qu'ils ne nuisent à personne, qu'ils s'entendent bien avec tout le monde et qu'ils sont plus riches que la moyenne. Les personnes heureuses, optimistes et extraverties estiment qu'elles choisissent leur vie. Aux États Unis le sentiment de bonheur était plus grand parmi les individus pratiquant une religion.

Les causes de ces corrélations sont incertaines. Est-ce que le bonheur amène les individus à interagir socialement, ou est ce que les gens qui ont une vie sociale très active sont plus heureux? Si les gens heureux sont plus actifs, cela expliquerait pourquoi ils se marient plus tôt, ont des meilleurs emplois et se font plus d'amis. Si ces traits de caractère prédisposent au bonheur, les gens seraient plus heureux en agissant d'une manière adéquate.

Quel qu'en soit la raison, l'abondance de relations personnelles, caractéristique du bonheur est également corrélée à l'état de santé. À l'inverse des célibataires ou des solitaires, les personnes qui peuvent citer plusieurs amis proches sont en meilleure santé et ont une espérance de vie supérieure.

Paul Valéry écrivait avec raison «Un homme seul est toujours en mauvaise compagnie». Pour plus de neuf personnes sur dix, le mariage est le meilleur moyen de mettre fin à la solitude. Bien que la fin d'une relation conjugale puisse être cause de souffrances, un mariage solide semble être une source de soutien moral. Durant les années 1970 et 1980, 39 pour cent des adultes mariés se déclaraient «très heureux» contre 24 pour cent de ceux qui n'avaient jamais été mariés (l'écart est similaire pour les deux sexes). Dans d'autres études, 12 pour cent seulement des divorcés se percevaient comme «très heureux».

Dans les études sur le bonheur, on examine aujourd'hui chez les gens heureux, les corrélations entre leur bonheur, leur vision du monde et leurs objectifs. Une partie de ces recherches indiqueront peut-être comment transformer les circonstances et les comportements qui s'opposent au bonheur en des comportements qui y conduisent. Finalement, l'étude scientifique du bonheur pourrait nous aider à comprendre comment construire un monde qui renforce le sentiment de bien-être et qui aide les gens à tirer le meilleur d'eux-mêmes.

Modélisez et simulez vos systèmes dynamiques avec SIMULINK®.

SIMULINK, système interactif complet, intègre la modélisation, la simulation et l'analyse de vos systèmes dynamiques. Complémentaire au logiciel MATLAB, il lui est totalement intégré, ce qui vous permet de bénéficier des fonctionnalités des deux logiciels dans un même environnement de travail.

Modélisation

Vous modélisez rapidement, sous forme de schémas-blocs.

vos systèmes linéaires et non linéaires, évoluant en temps discret ou continu. De très nombreux blocs sont fournis, que vous positionnez et liez tout simplement avec la souris pour construire votre modèle. Vous pouvez créer vos propres blocs en code C, Fortran ou MATLAB, ou encore de façon graphique à partir de sous-modèles schémas-blocs. Des ensembles de blocs spécialisés (Blocksets) sont proposés en option.

Modules applicatifs

- DSP Blockset
- Nonlinear Control Design Blockset
- Fixed-Point Blockset

Simulation et analyse

Des fonctions de simulation basées sur de puissants solveurs d'équation (Runge-Kutta, Gear, Adams,...) vous permettent d'observer de façon interactive l'évolution temporelle de votre modèle. Des fonctions de linéarisation et de définition des points d'équilibre sont également à votre disposition.

Génération de code C

Avec le module additionnel Real-Time Workshop®, vous générez du code C source directement à partir de votre schéma-bloc SIMULINK. Ce code peut être intégré dans toute application ou implanté sur des processeurs-cibles.



Ces produits sont disponibles sur PC, Macintosh, UNIX et VMS.

Pour recevoir gratuitement une brochure technique accompagnée de 4 exemples applicatifs, appelez, dès aujourd'hui, le

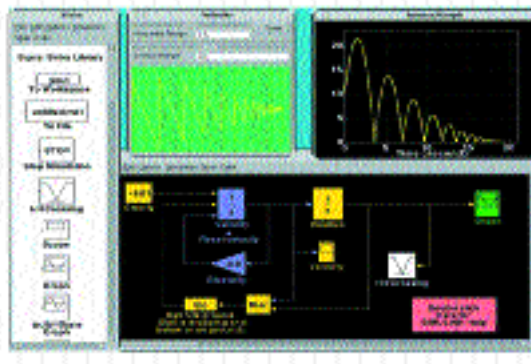
(1) 45 34 23 91

ou encore photocopiez cette page, joignez-y vos coordonnées et faxez-la au

(1) 45 07 08 06

SCIENTIFIC SOFTWARE

72-78, Grande Rue - 92310 SURESNES
Email : info@sgfr



Simulation d'un rebond sur une surface rigide, avec visualisation de la vitesse et de la trajectoire de la balle. L'intégration du bloc 'Trapezoidal' dans le modèle permet de tenir compte avec précision des discontinuités du système.

Une image de neurones

Une nouvelle méthode permet de suivre l'activité des cellules nerveuses, une par une.

Les neurones ont des formes variées en raison de la diversité des arborisations qui les terminent. Leur fonction dépend-elle de leur forme ?

Pour le savoir, on doit pouvoir les étudier un par un : Paul Gogan et Suzanne Tyc-Dumont, de l'Unité de Neurocybernétique cellulaire du CNRS de Marseille, ont mis au point une méthode de visualisation de neurones en culture qui, pour la première fois, autorise l'observation de tous les événements qui surviennent simultanément dans un neurone excité.

L'intérieur d'un neurone au repos est électriquement négatif par rapport à l'extérieur ; en phase d'excitation, la différence de potentiel entre les deux faces de la membrane s'annule, voire s'inverse. L'afflux d'ions sodium change les propriétés électriques de la membrane, et cette modification locale se transmet de proche en proche : le potentiel d'action ou «influx nerveux» se transmet

dans tout le prolongement neuronal. On disposait de deux méthodes pour étudier ce phénomène, mais elles ne donnaient que des informations partielles.

Avec les microélectrodes intracellulaires, directement implantées dans le corps cellulaire du neurone, on mesure le potentiel d'action, résultante de tous les événements électriques qui se produisent dans la membrane du neurone pendant la durée de l'excitation. Avec la méthode du patch-clamp, plus précise, une microélectrode sélectionne une infime partie de la membrane du neurone et mesure la quantité des ions qui la traversent.

Cette information locale ne renseigne pas sur la participation éventuelle des canaux ioniques situés ailleurs sur la membrane du corps cellulaire ou de l'extrémité (l'arborisation dendritique). Pour cela, on doit visualiser le neurone tout entier : avec la nouvelle méthode, le neu-

rone apparaît en détail et les images obtenues permettent de localiser tous les sites membranaires excités.

Pour observer les variations du potentiel électrique, l'équipe de Marseille utilise un colorant fluorescent qui se fixe dans la membrane du neurone et dont la fluorescence change légèrement chaque fois que le neurone est excité. Afin de détecter ces infimes variations de luminosité, S. Tyc-Dumont et ses collègues ont adapté les caméras utilisées par les astronomes pour photographier les étoiles lointaines, mortes depuis des millions d'années et dont la Terre ne reçoit qu'une faible intensité lumineuse. Une caméra de ce type, couplée à un microscope, permet de visualiser la totalité de la membrane d'un neurone.

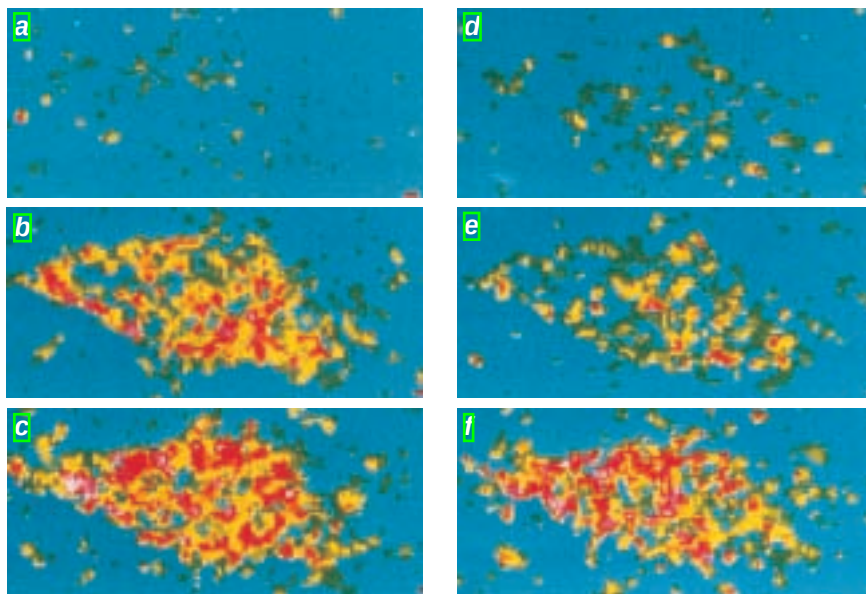
EXCITATION ALEATOIRE

De cette façon, on observe l'activité de tous les canaux, lors d'une excitation neuronale. On a ainsi découvert que la membrane d'un neurone excité n'est pas homogène : elle apparaît comme une mosaïque multicolore. La diversité des couleurs indique que les canaux ioniques y sont répartis de façon hétérogène, et qu'ils ont des activités électriques – repérées par les nuances de couleurs – très différentes. Une image presque uniformément bleue correspond au potentiel de repos de la cellule. Après une excitation, les sites bleus indiquent les canaux fermés, inactifs, et les sites rouges les canaux ouverts, actifs. L'ouverture et la fermeture des différents canaux est totalement aléatoire d'une excitation à l'autre.

Cette nouvelle méthode devrait aider les neurobiologistes à savoir si les canaux voisins interagissent, en potentialisant ou en inhibant leur action ; si chaque canal a un comportement individualisé ou si plusieurs canaux réagissent simultanément ; on étudiera comment communiquent les neurones et comment l'excitation d'une cellule nerveuse modifie l'activité électrique des cellules voisines. En suivant l'activité électrique d'un neurone, on pourra également préciser les récepteurs membranaires où se fixent les médicaments et étudier comment ces derniers modifient l'activité électrique du neurone.

La microstructure de la membrane neuronale correspond à la répartition des canaux ioniques dans cette membrane : cette microstructure est aléatoire. Au contraire, la géométrie de l'ensemble, *in vivo*, ne l'est certainement pas, et l'organisation des terminaisons dendritiques optimise, sans doute, la fonction cérébrale.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Les canaux ioniques localisés dans la membrane du corps cellulaire d'un neurone en culture ont été visualisés grâce à un colorant sensible aux différences de potentiel. Lorsque le neurone est au repos (a), les canaux sodium sont fermés, et apparaissent en bleu. Lorsque le neurone est excité, certains canaux s'ouvrent et deviennent rouges. La mosaïque des couleurs montre que tous les canaux ne sont pas ouverts ou fermés simultanément, et que certains, en vert ou en jaune, sont dans un état intermédiaire (b et c). Quand on bloque sélectivement les canaux sodium, ils sont tous inactivés (d), et leur activité réapparaît progressivement à mesure que l'inhibiteur cesse d'agir (e et f). Chaque neurone mesure environ 100 micromètres dans sa plus grande dimension.

Faune du Sahara

Le dernier refuge des grands mammifères est au Tchad.

Les grands mammifères du Sahara supportent mieux l'aridité que la pression humaine. Après avoir disparu d'Algérie, de Libye et d'Égypte, au Nord, puis de Mauritanie et du Mali, au Sud-Ouest, ils ne subsistent plus aujourd'hui qu'au Niger et, surtout, au Tchad. Pour combien de temps encore ? Selon une récente mission de dénombrement, certaines espèces risquent de disparaître bientôt complètement pour un motif pourtant contrôlable : la chasse, pratiquée



Cette gazelle dorcas mâle, déshydratée après une poursuite en voiture, par plus de 40°C, est incapable d'échapper à un homme à pieds. Elle sera bientôt égorgée.

surtout par les militaires, nombreux et bien armés.

Les dernières populations viables d'ongulés (animaux à sabots) sahariens vivent dans le Nord du Tchad, notamment dans la sous-préfecture de l'Ennedi. La guerre a sévi longtemps dans cette région montagneuse, isolée aux frontières du Soudan et de la Libye. Aucune étude écologique précise n'y a été menée depuis les années 1960.

Le seigneur des milieux rocheux est le mouflon à manchettes, caractérisé par ses imposantes cornes courbes et des poils formant un « tablier » sur son poitrail et des « manchettes » sur ses pattes antérieures. Il ne quitte qu'exceptionnellement les reliefs peu accessibles, où il est difficile à repérer : la couleur de son pelage est quasi identique à celle des grès de l'Ennedi. On ne le rencontre,

sur les pâturages et les points d'eau, qu'à l'aube et au crépuscule : il passe les heures chaudes à l'ombre d'abris rocheux. L'espèce est encore présente dans les principaux massifs montagneux du Sahara, et la population totale serait de 15 000 à 25 000 individus. L'Ennedi reste l'un de ses refuges, en particulier la bordure méridionale du massif, où sa répartition se serait peu modifiée depuis les années 1960. Sur 200 000 hectares classés en réserve de faune en 1967, mais qui ne sont aujourd'hui protégés qu'en théorie, le mouflon n'a disparu que de zones fréquentées par les nomades.

Les espèces qui, telle la gazelle dorcas, vivent en plaine sont chassées de façon intensive. Leur habitat n'offre aucune protection. Les animaux sont aisément poursuivis en véhicule tout terrain et abattus au fusil-mitrailleur. On peut même se passer de cette arme : une poursuite de moins d'une demi-heure épuise l'animal, qui ne peut habituellement se passer de boire qu'au prix d'une absence d'effort physique. Un homme à pieds peut alors l'égorgé. Ceux qui pratiquent ce type de chasse ne choisissent que les mâles, qui se déshydratent plus vite que les femelles. Les petits sont souvent capturés vivants pour alimenter un commerce illégal.

Selon nos observations, la gazelle dorcas résiste bien à cette chasse, tandis que les populations de gazelle dama sont beaucoup plus touchées et que les deux antilopes sahariennes, l'addax, aux cornes torsadées, et l'oryx algazelle, aux cornes courbes, semblent presque décimées. Les recherches ont été infructueuses, aussi bien au sol que par avion, sur les 80 000 kilomètres carrés de la réserve d'ouadi Rimé-ouadi Achim, créée en 1969 pour ces deux espèces. Des témoignages font cependant état de la présence sporadique de petits groupes d'addax (entre un et cinq individus) dans des zones frontalières, à l'Est vers le Soudan et à l'Ouest vers le Niger. Il convient d'être plus pessimiste à propos de l'oryx, qui recherche des milieux moins arides que l'addax. Il est pris entre la sécheresse qui le pousse vers le Sud et les éleveurs qui progressent vers le Nord à la faveur des récentes années pluvieuses et des programmes de creusement de puits.

Jérôme TUBIANA

Un chronomètre pour les noyaux

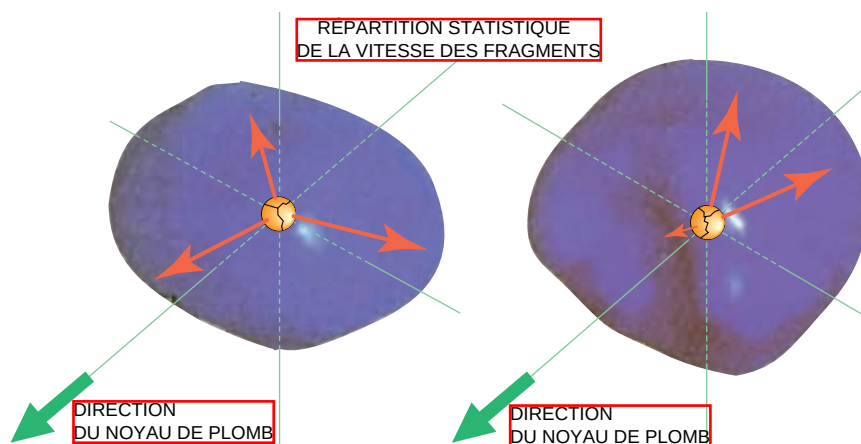
La répulsion entre les produits d'une réaction nucléaire indique la durée de vie des noyaux.

Pour mieux comprendre les propriétés des noyaux, minuscules grains de matière constitués de protons et de neutrons, on bombarde les noyaux d'une cible mince avec ceux d'un faisceau. Connaissant le résultat de ces collisions, on mesure les propriétés mécaniques des noyaux telles leur résistance à des températures et à des pressions analogues à ce qu'ils subissent lors des explosions d'étoiles. Pour ce faire, il faut analyser des collisions très violentes et mesurer des durées de vie des milliards de fois inférieures à ce que peuvent enregistrer les instruments. Les expériences réalisées à l'accélérateur du laboratoire du GANIL, à Caen, indiquent une cohésion de la matière nucléaire dans des états extrêmes plus forte que prévue.

Dans ces expériences, on bombarde une cible d'or avec un faisceau d'ions de plomb (des atomes dépouillés d'un ou de plusieurs électrons). Les noyaux sont projetés l'un contre l'autre à des vitesses proches du quart de la vitesse de la lumière. La viscosité de la matière

nucléaire est telle que les deux noyaux qui entrent en collision se collent et transforment, par «frottement», leur énergie cinétique en chaleur. Le résultat des collisions entre les noyaux de plomb et les noyaux d'or est un agrégat de matière dont la température dépasse 70 milliards de degrés et dont la densité avoisine 400 millions de tonnes par centimètres cubes. Les noyaux sont excités par la collision et ils accumulent tant d'énergie que les contraintes produites par le chauffage surpassent les forces de cohésion du noyau qui se rompt. Les fragments éparpillés dans l'explosion sont constitués de noyaux plus légers.

Les physiciens reconstituent la chronologie de la collision et, en particulier, ils mesurent la durée de vie des noyaux excités ainsi créés. L'entreprise est ardue car la durée des interactions est voisine de 10^{-22} seconde. Comment chronométrer des événements si éphémères, et comment accéder à des informations sur des processus qui se déroulent au cœur même des atomes ?



Après la collision de noyaux de plomb et de noyaux d'or, les noyaux d'or explosent en trois ou quatre fragments dont les vitesses (flèches rouges) sont mesurées, bien après l'explosion, par le détecteur Nautilus. On a représenté ici la répartition statistique de la vitesse des fragments d'or pour 10 000 collisions. La flèche verte indique la direction du noyau de plomb qui a survécu à la collision. Pour une collision peu violente, le noyau d'or se casse longtemps après la collision. Le noyau de plomb qui a subsisté était alors «loin» (quelques 10^{-13} mètre) du lieu de l'explosion et la répartition statistique de la vitesse des fragments est isotrope (à gauche). Lors d'une collision violente, le noyau d'or explose alors que le noyau de plomb est 100 fois plus proche. La répulsion électrostatique entre les charges positives des fragments émis et celles du noyau de plomb crée un creux dans la répartition des fragments d'or (à droite) : les fragments sont éjectés moins vite dans cette direction.

UN NOYAU ESPION

Des chercheurs de différents laboratoires ont eu l'idée d'utiliser directement le noyau de plomb, lorsqu'il a résisté à la collision, pour chronométrer l'explosion du noyau d'or. Quelques milliardièmes de seconde après la collision, des détecteurs localisent les fragments émis. La mesure du temps de vol entre la cible et le détecteur permet de déduire la vitesse des fragments du noyau d'or émis au cours de l'explosion. Seuls trois ou quatre fragments sont produits à chaque collision. Aussi, pour obtenir la répartition statistique de la vitesse des fragments, accumule-t-on les résultats de milliers de collisions.

Lorsque la durée de vie du noyau d'or surchauffé est faible, le noyau de plomb est encore dans son voisinage lors de l'explosion. En raison de la répulsion électrostatique entre le noyau de plomb, chargé positivement, et les fragments émis, aussi chargés positivement, l'éjection des fragments n'est pas isotrope : dans la direction du noyau de plomb, il y aura un creux dans la distribution des vitesses d'autant plus important que la répulsion est grande. En revanche, lorsque la durée de vie du noyau d'or est longue, le noyau de plomb a eu le temps de s'éloigner avant que le noyau d'or n'explose : la répartition des fragments sera isotrope.

Pour réaliser des comparaisons, on simule l'explosion en suivant l'évolution de trois ou quatre fragments, placés à une distance donnée d'un noyau de plomb et soumis aux forces électrostatiques. Comme dans les expériences, on accumule des événements en variant la répartition angulaire initiale des fragments. On obtient ensuite la répartition statistique pour une durée de vie donnée en variant la distance initiale entre le noyau de plomb et les fragments du noyau d'or. À chaque distance initiale correspond une durée de vie. En comparant les répartitions statistiques issues des expériences et celles des simulations on mesure la durée de vie du noyau d'or.

Dans des collisions violentes on a mesuré un temps de fragmentation de 5×10^{-22} seconde, plus long que ce qui était prévu par la théorie. Comme la durée de vie du noyau chauffé dépend de son état d'excitation, des collisions plus violentes permettraient d'observer des durées de vie plus brèves encore et de sonder ainsi la cohésion des noyaux dans des états extrêmes. C'est l'objectif de récentes mesures réalisées avec le nouveau multidétecteur INDRA et actuellement en cours d'analyse.

Ph. CHOMAZ, GANIL, CEA-CNRS,
D. DURAND, LPC, ISMRA/CNRS, Caen

Évolution

Les formulations d'un problème mathématique.

La réforme sur l'enseignement nous intéresse tous : un groupe d'enseignants a examiné le problème de la formulation d'un problème.

Enseignement 1960 :

Un paysan vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Ses frais de production s'élèvent au 4/5 du prix de vente. Quel est son bénéfice ?

Enseignement traditionnel, 1970 :

Un paysan vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Ses frais de production s'élèvent au 4/5 du prix de vente, c'est-à-dire 80 francs. Quel est son bénéfice ?

Enseignement moderne, 1970 :

Un paysan échange un ensemble P de pommes de terre contre un ensemble M pièces de monnaie. Le cardinal de l'ensemble M est égal à 100 et chaque élément PFM vaut un franc. Dessine 100 gros points représentant les éléments de l'ensemble M . L'ensemble F des frais de production comprend 20 gros points de moins que l'ensemble M et donne la réponse à la question suivante : quel est le cardinal de l'ensemble B des bénéfices ? (à dessiner en rouge).

Enseignement rénové, 1980 :

Un agriculteur vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Les frais de production s'élèvent à 80 francs, et le bénéfice est de 20 francs. Devoir : souligner les mots « pommes de terre » et discuter en avec ton voisin.

Enseignement réformé, 1980 :

Un peizan kapitalist privilégié sanrichi injustement de 20 francs sur un de patat, analiz le tekst et recherche les fote du contenu de gramèr, d'orthographe, et puntuasson et ensuite di se que tu pense de set maniere de senrichir.

Enseignement assisté par ordinateur, 1990 :

Un producteur de l'espace agricole câblé consulte en conversationnel data bank qui display le day-rate de la patate. Il load son logiciel computation fiable et détermine le cash-flow sur écran bit-map (sous MS/DOS avec config floppy et disque dur 4 MO).

Dessine avec ta souris le contour intégré 3 D du sac de pommes de terre. Puis logues-toi au network par le 36.15 code BP (blue Potatoe) et suis les indications du menu.

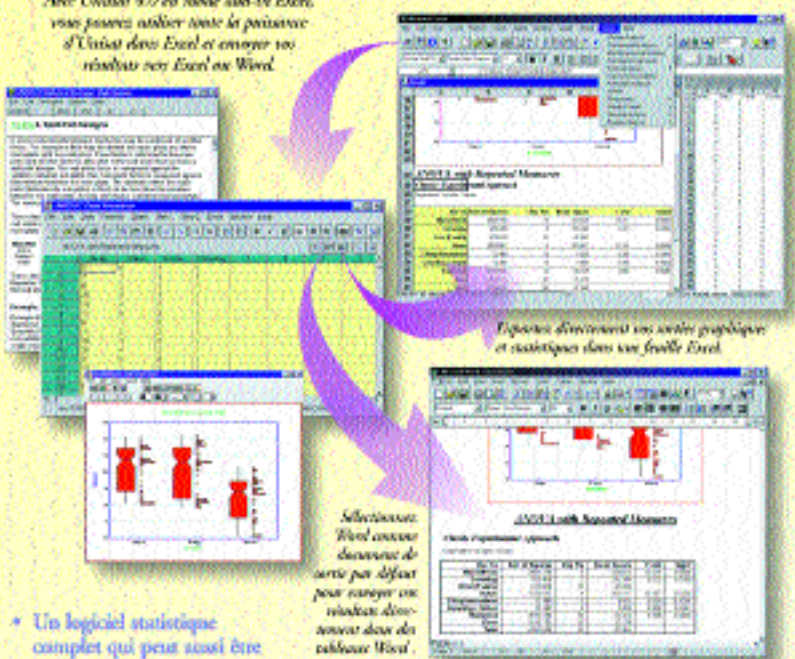
Enseignement 2000 :

Qu'est-ce qu'un paysan ?

UNISTAT® 4.0

Les Statistiques adaptées aux Sciences de la Vie

Avec Unistat 4.0 en mode add-in Excel, vous pouvez utiliser toute la puissance d'Unistat dans Excel et envoyer vos résultats vers Excel ou Word.



Exportez directement vos séries graphiques et statistiques dans vos fichiers Excel.

Sélectionnez Word comme destination de sortie par défaut pour renvoyer vos résultats directement dans vos documents Word.

- Un logiciel statistique complet qui peut aussi être utilisé en mode add-in Excel™.
- Envoi direct optionnel des sorties graphiques et statistiques dans des tableaux Word™.
- Intégration OLE2 parfaite avec MS Office™.
- Tableur intégré de type Excel™.
- Plus de 150 types de graphiques 2D/3D avec édition et annotations complètes à l'écran.
- Enregistrement et exécution en background de macros.
- Système d'aide avec plus de 80 exemples provenant de livres de références.

Un ensemble complet de fonctions statistiques et graphiques :

Représentations Graphiques • Graphiques 2D • Graphiques 3D • Diagrammes • Tracés de fonctions	Régression et ANOVA • Statistiques matricielles • Régression (linéaire, canonique, polynomiale, pas à pas, non-linéaire, logistique) • Plans d'expériences (Système illustré au hasard, intensifs, carrés latins, facteurs croisés) • Tests pour l'ANOVA (Hétérogénéité de la variance, comparaisons multiples, options, test des paires)	Analyse Multivariée • Classification • Analyse discriminante • Eclatementage multidimensionnel • Composantes principales • Analyse factorielle • Corrélation canonique • Analyse robuste • Graphiques multivariés
---	---	---

Séries Chronologiques

- ARIMA
- Prévisions
- Contrôle de qualité
- Analyse de survie
- Analyse de Fourier



RITME
INFORMATIQUE
34 bd Haussmann
75009 Paris
Tél. (1) 42 46 00 42
Fax (1) 42 46 00 33

N'HÉSITEZ PAS À NOUS CONTACTER AU (1) 42 46 00 42 POUR TOUT RENSEIGNEMENT COMPLÉMENTAIRE.

BULLETIN D'INSCRIPTION AUX JOURNÉES DE PRÉSENTATION

À envoyer à Ritme Informatique - 34 bd Haussmann - 75009 Paris - Tél. (1) 42 46 00 42 - Fax (1) 42 46 00 33

Nom Etablissement Adresse Code Postal Ville Tél. Fax	DATES ET LIEU DE PRÉSENTATION Je désire assister à la présentation du : ☐ 5 juin 1996 14h30-16h30 Ritme Informatique - Paris ☐ 19 juin 1996 14h30-16h30 Ritme Informatique - Paris 34 boulevard Haussmann - 75009 Paris Métro Chaussée d'Antin ou RER Auber
---	---

Le récent séisme des Pyrénées

Premier séisme français bien documenté dans une région sismique, son mécanisme est élucidé.

Le 18 février 1996, à 02h45, un fort séisme secouait la partie orientale des Pyrénées. Ce séisme, localisé à proximité de Saint-Paul de Fenouillet (Pyrénées-Orientales), fut ressenti jusqu'à Perpignan, Carcassonne, Millau, Toulouse et Foix, ainsi qu'en Catalogne espagnole jusqu'à Barcelone. D'une magnitude de 5,5 sur l'échelle de Richter, il est le plus violent qu'ait connu la France depuis le séisme béarnais du 13 août 1967, qui détruisit en grande partie le village d'Arette. Les dégâts du séisme

de février furent heureusement plus limités, mais de nombreux phénomènes secondaires, tels que des émanations gazeuses, la réactivation de sources taries, l'élévation de température des eaux thermales, attestent de l'importance tectonique de cet événement.

Un des intérêts de cet événement est qu'il est, le premier séisme de cette importance qui soit bien instrumenté en métropole. En effet, un réseau sismologique est installé dans la partie orientale de la chaîne pyrénéenne depuis seulement

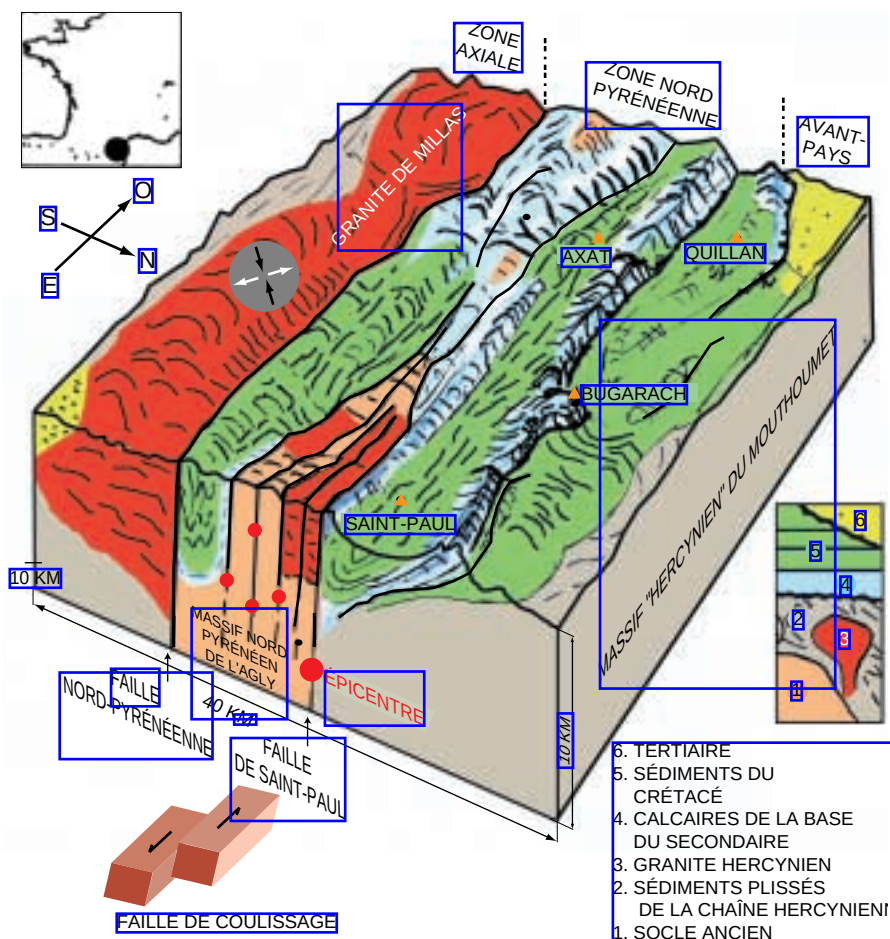
sept ans, sous la responsabilité de l'Observatoire Midi-Pyrénées à Toulouse, et un réseau similaire couvre le versant Sud de la chaîne en Catalogne espagnole, sous la responsabilité du Servei Geològic de Catalunya à Barcelone. Les données de ces réseaux sont transmises en temps peu différé à Toulouse et Barcelone par l'intermédiaire du satellite Météosat. Sept stations de ces deux réseaux permanents sont situées à moins de 60 kilomètres de l'épicentre, ce qui a permis de déterminer très vite les coordonnées précises du foyer : latitude de 42°47.4' Nord, longitude de 2°32.3' Est, ce qui le situe à environ six kilomètres à l'Est de Saint-Paul de Fenouillet (voir la figure 2).

Il est donc situé en bordure Nord du massif de l'Agly, probablement au contact d'un massif granitique avec les structures calcaires marquant la limite Sud des Corbières. Il n'a donc pas *a priori* de relation directe avec la faille Nord pyrénéenne, située plus au Sud : cette faille s'étend d'Est en Ouest le long de toute la chaîne des Pyrénées et marque la limite entre les plaques Ibérie et Eurasie, en collision depuis 65 millions d'années. La profondeur du foyer, voisine de dix kilomètres, est relativement grande, ce qui explique que les dégâts soient moins catastrophiques que ce que l'on peut redouter pour une magnitude de 5,5.

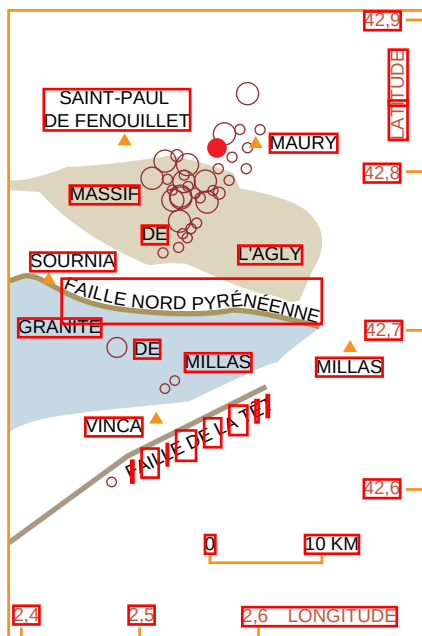
LE MÉCANISME DU SÉISME

Le réseau sismologique permanent a également permis de déterminer le mécanisme à l'origine du séisme. Un séisme est dû à une rupture locale de l'écorce terrestre, avec un déplacement de deux blocs l'un par rapport à l'autre de chaque côté d'une faille. C'est le relâchement brutal des contraintes accumulées au cours des années ou des siècles sur la faille qui est à l'origine de la rupture. Lorsque le foyer est superficiel, la faille est en général visible en surface, et il est souvent possible de mesurer sur le terrain les déplacements qui se sont produits sur le plan de faille : déplacements verticaux, ou latéraux, ou une combinaison des deux.

Le séisme de Saint-Paul, relativement profond, n'a laissé aucune trace du déplacement de la faille en surface. Toutefois, en analysant le sens de la première oscillation observée sur les enregistrements sismologiques, il est en principe possible de trouver l'orientation du plan de faille en profondeur, et la direction du mouvement le long de ce plan. En pratique, le problème est un peu plus complexe, car ce type d'analyse donne deux plans de faille possibles, perpendiculaires l'un à l'autre, entre lesquels il est parfois bien difficile de choisir. Ce sont souvent des



1. Bloc-diagramme de la région de Saint-Paul de Fenouillet avec les positions de l'épicentre et de quelques répliques. Lors de sa formation, la chaîne a été affectée par des chevauchements qui se sont avancés vers le Nord et par des failles de coulissage. Le séisme a probablement fait rejouer la belle faille de coulissage au Sud de Saint-Paul. On a schématisé par des flèches le champ de contraintes déduit du mécanisme au foyer.



2. Foyers du séisme et ses répliques.

considérations géologiques qui permettent le choix. Dans le cas de Saint-Paul de Fenouillet, le plan de faille est quasi-vertical, orienté Est-Ouest, et le mouvement sur le plan est un glissement latéral : le massif de l'Agly a tendance à être éjecté vers l'Est par rapport aux structures qui sont immédiatement au Nord (voir la figure 1). Ici, il n'y a pas d'ambiguïté sur le plan de faille, car le contexte géologique est particulièrement bien connu. La région est d'ailleurs un lieu de prédilection pour les excursions géologiques !

Grâce à la localisation assez précise du foyer (à un kilomètre près) et à une très bonne organisation de la sismologie française, dotée de réseaux sismologiques portables et habituée aux interventions rapides, il a été possible d'installer, dès le soir du séisme, des stations temporaires (25 environ) entourant l'épicentre du choc principal, pour l'enregistrement des répliques. C'est en effet dans les heures ou les jours qui suivent immédiatement un séisme que les répliques sont les plus nombreuses et les plus fortes. Dans le premier mois suivant le choc principal, environ 400 répliques ont été enregistrées par les équipes françaises et catalanes.

L'intérêt des répliques est multiple. Elles permettent notamment d'estimer comment les contraintes achèvent de se relâcher dans la région du séisme : les répliques correspondent généralement à des réajustements locaux sur une partie de la faille, ou en bout de faille, ou sur des failles voisines. Leur cartographie révèle parfois des failles inconnues.

À Saint-Paul, les répliques les plus fortes ne sont pas situées sur le même

plan de faille que le séisme principal. Elles s'alignent vers le Sud suivant un axe Nord-Sud jusqu'à la bordure Nord du massif de l'Agly et correspondent vraisemblablement au rejeu de grandes failles verticales d'orientation Est-Ouest, bien identifiées dans ce massif. Le mouvement de glissement latéral, lié au choc principal sur la faille la plus au Nord, serait donc suivi d'une série de mouvements latéraux des autres failles de l'Agly.

Plus au Sud encore, lorsqu'on franchit la faille Nord pyrénéenne et que l'on arrive dans le massif granitique du Millas, on trouve encore l'écho des séismes induits par le choc principal, mais ces séismes sont tous profonds (à environ 15 kilomètres de profondeur), et de magnitudes plus faibles. Ils ne sont plus sur des failles identifiées et correspondent vraisemblablement à un découplage entre croûte supérieure et croûte inférieure faites de matériaux différents. Une telle distribution des répliques n'est pas commune, seule une modélisation mécanique permettra de comprendre pourquoi tous ces séismes sont alignés les uns par rapport aux autres.

Peut-on craindre d'autres séismes dans le futur ? Répondre par la négative serait se voiler la face : la sismicité historique de la France, qui porte sur les cinq derniers siècles, nous apprend qu'il y a, sur le territoire national, environ quatre à cinq séismes de magnitude égale ou supérieure à cinq chaque siècle. Pour la région de Saint-Paul de Fenouillet, les archives renseignent sur l'occurrence de forts séismes, sans doute comparables au dernier séisme, en 1755 et 1838, et plus récemment en 1920 et 1922.

Le plus gros séisme pyrénéen connu s'est produit à 50 kilomètres au Sud de St Paul, en Catalogne espagnole, le 2 février 1428 et sa magnitude entre 6 et 7, était comparable à celle du récent séisme de Kobé. On a tort de l'oublier car les gros séismes se répètent souvent avec une récurrence, de l'ordre de quelques siècles, que l'on peut parfois estimer, et avec une localisation changeante que l'on cherche à prévoir. Le risque sismique dans la région reste faible mais réel, et il ne serait pas inutile que les villes de la partie orientale des Pyrénées en prennent conscience.

Il y a une dizaine d'années, des études ont été consacrées à ce séisme historique, mais elles ont conduit à des interprétations divergentes, que le séisme actuel pourra lever, affinant en même temps les prévisions sismiques.

A. SOURIAU et A. RIGO, CNRS-Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse
C. OLIVERA, Servei Geològic de Catalunya, Barcelone
M. MATTAUER, Université de Montpellier

France Culture et Pour la Science

**vous invite
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement
de leur
nouvelle émission**

**les
Inattendus
de la
Science**

Samedi 8 juin - 15h
le transistor
avec Pierre Aigrain
de l'Académie des Sciences

Samedi 22 juin - 15h
le zéro
avec Christian Houzel,
mathématicien

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



Palais de la découverte

SCIENCE

Cristaux de pentagones

Des ordres impossibles apparaissent dans des empilements de pentagones et de polygones.

L'étude des milieux granulaires, dont le tas de sable est l'archétype, progresse depuis une dizaine d'années : à l'aide d'expériences, de calculs théoriques et de simulations par ordinateur, on explore les empilements de ces milieux complexes. Pour en simplifier l'étude, on considère des empilements modèles, composés de particules de forme simple, par exemple sphérique, mais, même ainsi, des questions élémentaires restent ouvertes : on ignore, par exemple, quel est l'empilement de sphères dont la compacité est maximale. Aussi simplifie-t-on parfois davantage, en considérant des ensembles de disques à deux dimensions seulement.

De tels ensembles ne sont pas de très bons modèles de milieux granulaires réels, car les contacts entre disques sont quasi ponctuels, et la moindre sollicitation peut les détruire et amener des réarrangements locaux. En outre, les disques de même rayon permettent de réaliser simultanément la compacité locale maximale, et un ordre à longue distance, avec les centres aux nœuds d'un réseau triangulaire.

Afin d'éviter de telles particularités, nous avons choisi d'étudier des ensembles bidimensionnels de grains pentagonaux réguliers, tous de même taille. Dans un contact entre deux pentagones, peuvent intervenir soit un côté

de l'un et un sommet de l'autre, soit un côté de chaque pentagone, soit un sommet de chaque pentagone. Ce dernier type de contact n'a aucune stabilité, de sorte qu'il ne se produit qu'exceptionnellement dans un empilement désordonné. Les contacts côté-côté sont, au contraire, très stables. Enfin la symétrie d'ordre cinq des grains semblait devoir s'opposer à la création d'un ordre à longue distance, car les pentagones ne peuvent pas le plan. Pourtant l'expérience conduit à une structure cristalline qui présente une quasi-symétrie d'ordre six !

L'assemblée que nous utilisons est constituée de 2 200 pentagones de sty-rène de six millimètres de côté et de un millimètre d'épaisseur, déposés sur une table soufflante, alimentée par deux moteurs. Les fluctuations locales de la vitesse d'éjection de l'air provoquent un mouvement incessant des grains. La table étant horizontale, les pentagones se répartissent de façon homogène, sur toute la surface, formant initialement un empilement peu dense, de compacité voisine de 0,7.

Puis nous réduisons lentement le débit d'air : la table s'infléchit en son centre en raison de la diminution de la pression de l'air, et les particules s'accumulent lentement au centre. La compacité augmente, mais, en raison de la répulsion hydrodynamique due à l'évacuation de

l'air entre les particules, celles-ci restent éloignées les unes des autres, sans contact. Cette répulsion gomme l'influence de la forme des particules, qui se comportent alors comme des disques.

Quand nous réduisons davantage le débit d'air, des zones ordonnées d'ordre six apparaissent, séparées par des lignes de dislocation ou par des zones amorphes, sans ordre. À ce stade, seuls les centres des particules sont localement ordonnés.

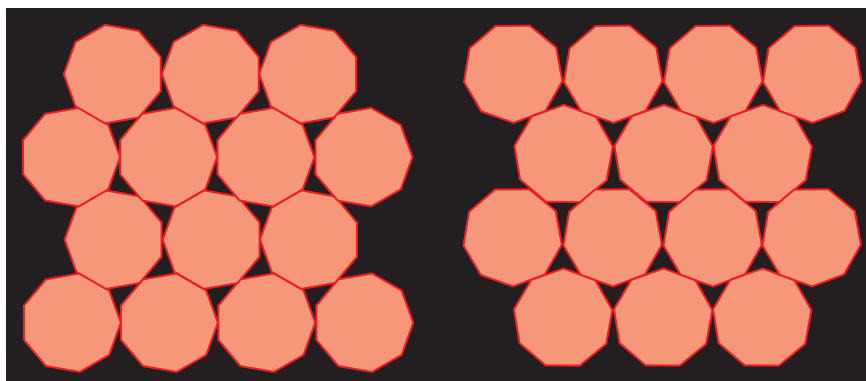
L'APPARITION DES ZONES CRISTALLINES

Enfin, quand nous réduisons encore le débit d'air, un ordre d'orientation, favorisé par l'agitation modérée des particules se superpose à l'ordre de position des centres, et des zones cristallines croissent par nucléation à l'intérieur des zones ordonnées de symétrie hexagonale. Dans les zones cristallines, les pentagones s'orientent selon une direction, mais ils se disposent selon la direction opposée sur la ligne adjacente. Chaque pentagone présente deux voisinages côté-sommet selon la direction d'alignement, et quatre voisinages côté-côté dans les lignes voisines.

Avec des polygones réguliers de même taille et dont le nombre de côté est supérieur ou égal à cinq, les mathématiciens savent construire toute une famille de structures cristallines caractérisées par une orientation alternée des grains, sur les lignes consécutives. Ces structures sont nommées empilements en double réseau. Pour des polygones à nombre pair de côté, la structure la plus compacte est la plus compacte possible. Il en est probablement de même pour les pentagones, dont l'arrangement est alors celui du cristal que nous avons obtenu dans nos expériences, et aussi pour les heptagones.

Par simulation du problème sur ordinateur, à l'aide de méthodes de «recuit simulé», où l'on réduit progressivement l'énergie du système, comme nous l'avons fait dans nos expériences, nous avons obtenu les mêmes structures compactes. En revanche, avec des ennagones (neuf côtés), nous avons obtenu un mélange de deux structures : la première, de compacité égale à 0,8975, est similaire à celle que l'on obtient avec les pentagones ; dans la seconde, un peu plus dense (compacité égale à 0,8986), quatre contacts côté-côté et deux contacts sommet-sommet sont établis pour chaque grain.

Y. LIMON DUPARCEUR
et J.-P. TROADEC,
Université de Rennes I
A. GERVOIS, CEA Saclay



Deux cristaux d'ennagones (polygones à neuf côtés) obtenus par simulation numérique. Celui de droite est un peu plus compact que celui de gauche.

Lézards intransitifs

Trois groupes de mâles alternent dans une population de lézards.

En Californie, une petite créature est bloquée dans un cycle sans fin, sa victoire annonçant sa défaite imminente, et sa défaite lui donnant un avant-goût du triomphe. Cette créature est le lézard *Uta stansburiana*, étudié par B. Sinervo et C. Lively : les mâles de cette espèce sont de trois types distincts qui participent à une sorte de jeu de la pierre, du puits, des ciseaux et de la feuille.

Dans ce jeu, deux personnes ont à choisir entre les quatre articles : la feuille vainc la pierre, qu'elle enveloppe ; la pierre casse les ciseaux ; mais les ciseaux coupent la feuille. Dans la nature, c'est l'accouplement qui fait l'objet du « jeu » : les mâles à gorge orange vainquent les mâles à gorge bleue, les mâles à gorge bleue vainquent les mâles à bandes jaunes, et les mâles à bandes jaunes vainquent les mâles à gorge orange. Ces relations « intransitives » engendrent un cycle de six ans, où les trois types de mâles sont successivement les plus abondants.

Quand les mâles les plus nombreux sont les mâles à gorge bleue, qui possèdent des harems composés de seulement trois femelles et défendent de petits territoires, même un petit nombre de mâles à gorge orange, agressifs, peuvent s'imposer. Ces lézards sont « ultra-dominants », car ils ont des concentrations élevées en testostérone, des harems contenant jusqu'à sept femelles et de grands territoires. Aussi, à la génération suivante, les lézards à gorge orange dominant la population.

Mais alors, quelques lézards à bandes jaunes peuvent s'introduire dans les camps des mâles à gorge orange, en se faisant passer pour des femelles et en copulant avec les vraies femelles sans se faire remarquer. À la génération suivante, les lézards à bandes jaunes deviennent ainsi les plus nombreux, ce qui laisse réapparaître les mâles à gorge bleue, qui reconnaissent les lézards orange travestis et les vainquent : les lézards bleus connaissent bien leurs voisins parce qu'ils ne se préoccupent que de leur petit territoire ; au contraire, les lézards orange ont trop à embrasser pour bien êtreindre.

Le grand succès de l'édition médico-scientifique de langue française

m/s
médecine science

Les mécanismes cérébraux de la lecture : un modèle en neurologie cognitive
Michel Habib, Fabrice Robichon

Neurobiologie des syndromes autistiques de l'enfant
Gilbert Lelord, Jean-Pierre Molk, Dominique Sauvage, Josiane Hertz

Les facteurs génétiques dans l'étiologie de la maladie d'Alzheimer
Dominique Campion, Alexis Brice, Didier Hannequin, Thierry Frebourg, Maria Martinez, Yves Aphi, Françoise Clerget-Darmon

Pathogénie cellulaire et moléculaire du cancer du col
Jacques Morasongo

Les polyamines présentent-elles actuellement un intérêt dans le traitement du cancer
Nikolaus Selzer, Jacques-Philippe Moulins

Gènes impliqués dans la dissémination métastatique et la réponse à la chimiothérapie du neuroblastome
Jean Bénard, Olivier Hartmann, Marie-Josée Terrier-Lacombe, Chantal Sayle, Jean Lemerle, Guy Riou

Les mécanismes de réparation de l'ADN : des cibles potentielles en pharmacologie du cancer
Moulay Aliou-Jamali, Serdar Mitz

HYPOTHÈSE

Les maladies à prions : l'hypothèse de la "protéine seule" et ses conséquences dynamiques
Michel Laurent

MINI-SYNTÈSES

Histoires d'aquaporines : des canaux qui font couler beaucoup d'eau
Evelyn Benoit, Pierre-François Méry, F. Tournet, Fabien Tell

Dysmorphie et gènes du développement
Didier Lacombe

Réparation, cancer et sénescence : le gène du syndrome de Werner
Joël Kahn

Mécanismes moléculaires du fonctionnement et de la remise à l'heure de l'horloge biologique
Jean-Louis Couderc

NOUVELLES BRÈVES

ÉDITORIAL

Daniel Widjocher

HISTOIRE DE LA MÉDECINE ET DES SCIENCES

L'invention de la médecine de la douleur
Isabelle Besson

Sommaire juin-juillet 1996

John Libbey EUROTEXT

■ Logotype Cost total

BULLETIN D'ABONNEMENT ANNUEL

10 numéros

- ☐ Je souhaite recevoir le numéro de juin 1996 au prix de 120 FF
☐ Je souhaite m'abonner à **m/s** au tarif indiqué ci-dessous

- ☐ Particuliers 500 FF ☐ Institutions 1 200 FF ☐ Étudiants* 295 FF

m/s
médecine science

* Photocopie R2V* de la carte d'étudiant exigée.

Nom : _____

Adresse complète : _____

Paiement

- ☐ par chèque à l'ordre de John Libbey Eurotext
☐ par carte bancaire :
☐ Visa ☐ Eurocard/Mastercard ☐ American Express

Carte N° : _____

Date d'expiration : _____ Signature : _____

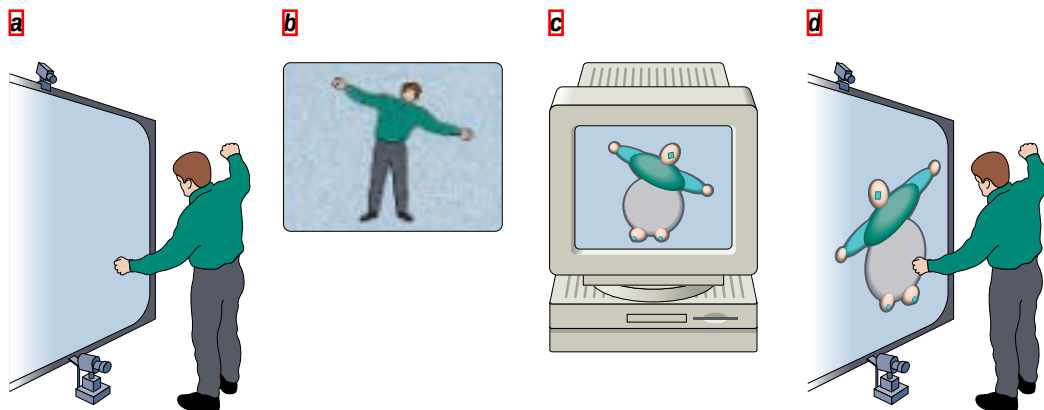
Une pièce douée de raison

ALEX PENTLAND

Afin d'élaborer des environnements domestiques et professionnels capables de nous aider dans nos tâches, les informaticiens étudient des systèmes informatiques qui identifient les occupants d'une pièce et les actions de ceux-ci.

Imaginez une maison qui surveillerait les enfants en l'absence des parents, un bureau qui déterminerait l'importance des réunions et qui éviterait les interruptions inappropriées, une voiture qui détecterait la fatigue de son conducteur et lui conseillerait de s'arrêter en cas de fatigue. Les informaticiens rêvent depuis longtemps à de tels systèmes, mais même les ordinateurs les plus perfectionnés ne peuvent remplacer les baby-sitters ou les secrétaires.

La difficulté tient à la surdité et à la cécité des ordinateurs : ils appréhendent le monde réel au travers d'un clavier ou d'une souris. Même les systèmes multimédias, qui traitent aussi bien les sons et les images que les textes, se contentent de transporter des données numériques. Ils ne comprennent pas la signification des signaux qu'ils transmettent. Les ordinateurs deviendraient bien plus utiles qu'ils ne le sont aujourd'hui s'ils étaient capables de voir et d'entendre. Et s'ils savaient identifier leur interlocuteur et deviner ses pensées...



1. LE DETECTEUR DE PERSONNES est un programme qui reconnaît les mouvements d'une personne dans une pièce intelligente. Une caméra enregistre les mouvements de la personne et transmet ces informations au système informatique (a et b). Le programme représente alors la personne par un ensemble de taches (c) : chaque tache représente la couleur et la position moyenne de la tête, du torse, des jambes, des mains et des pieds. Le programme projette ensuite le modèle dans un monde virtuel, pour permettre une interaction avec des personnages imaginaires (d). Lorsque l'occupant réel de la pièce tend un bras (photographie de droite), sa représentation fait la même chose. Silas, un chien virtuel, lève alors la patte en signe de reconnaissance.





2. SURPRIS, en colère, dégoûté, heureux, triste ou maussade? Irfan Essa a mis au point un système informatique qui reconnaît ces expressions faciales. Il a utilisé des données biomédicales pour modéliser la manière dont les tissus du visage bougent selon que l'on sourit, que l'on fronce les sourcils ou que l'on adopte une série d'autres expressions faciales (ci-dessus). Son système compare des images vidéo des utilisateurs de pièces intelligentes avec celles de modèles animés. Ici, la caméra a figé l'image du chercheur exprimant la surprise (écran de gauche) et le système informatique a choisi le modèle correspondant (écran de droite).



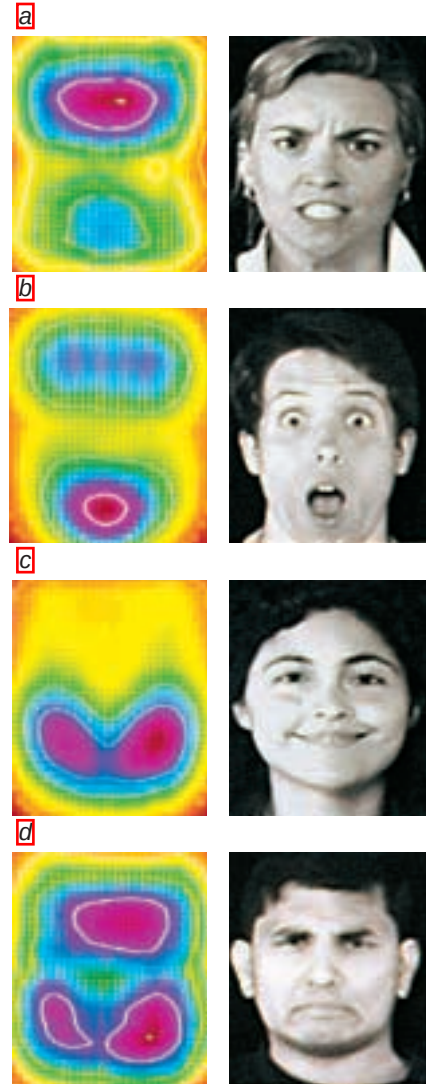
À l'Institut de technologie du Massachusetts, nous venons de mettre au point un ensemble de systèmes informatiques qui reconnaissent les visages, les expressions et les gestes. À l'aide de ces systèmes, nous avons réalisé des environnements qui s'approchent de la maison, du bureau ou de la voiture décrits précédemment. Ces «pièces intelligentes» sont équipées de caméras et de microphones dont les enregistrements sont transmis à un réseau d'ordinateurs. Ces derniers déterminent ce que font et disent les occupants de la pièce intelligente, qui peuvent ainsi utiliser leurs gestes, leurs voix et leurs expressions faciales, au lieu d'un clavier ou d'une souris, pour interagir avec des programmes informatiques, pour parcourir des bases de données multimédias ou pour voyager dans le royaume de la réalité virtuelle.

La première pièce intelligente fut construite dans notre laboratoire en 1991, et il existe aujourd'hui cinq pièces de ce genre à travers le monde, toutes reliées par le réseau téléphonique : trois à Boston, une au Japon et une au Royaume-Uni. Des installations similaires sont en projet à Paris, à New York et à Dallas.

Chaque pièce contient plusieurs micro-ordinateurs, chargés chacun d'une tâche spécifique. Quand une pièce intelligente doit analyser les images, les sons et les gestes, nous l'équiperons de trois ordinateurs, un par type d'interprétation. Si elle doit avoir des capacités supérieures, nous ajoutons des machines au réseau. Les ordinateurs utilisent tous la même méthode statistique, nommée analyse du maximum de vraisemblance : ils comparent les informations qu'ils reçoivent avec des modèles stockés en mémoire ; ils calculent la probabilité qu'un modèle corresponde aux données reçues, et choisissent le modèle le plus probable. Ces comparaisons permettent aux ordinateurs de répondre à une série de questions sur leurs utilisateurs, y compris déterminer leur identité et, parfois, ce qu'ils veulent.

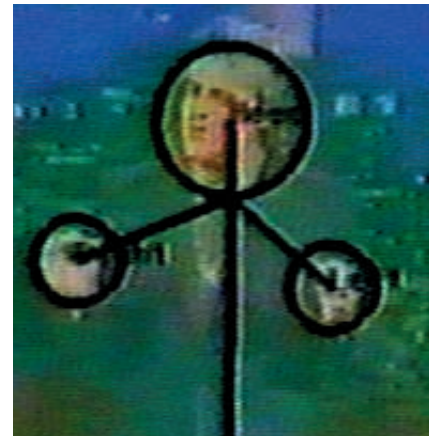
Ou?

Avant de chercher à savoir ce que font ses occupants, la pièce doit les localiser. Aussi avons-nous mis au point un détecteur de personnes qui suit les mouvements d'un individu à travers la pièce. Nous l'avons vu, ce détecteur utilise l'analyse du maximum de



3. DANS LES CARTES DE MOUVEMENTS, des couleurs chaudes montrent les parties du visage qui ont le plus bougé. Certaines expressions produisent des motifs de couleur typiques. Lorsque quelqu'un est fâché, par exemple, c'est surtout la périphérie des sourcils qui se modifie (a). La surprise se reconnaît aux sourcils et à la bouche (b), la joie s'exprime surtout par la bouche (c), et le dégoût par le visage tout entier (d).

vraisemblance. Tout d'abord, il crée un modèle de la personne enregistrée par la caméra sous forme de sept taches de couleur reliées (deux pour les mains, deux pour les pieds, et trois taches distinctes pour la tête, le torse et les jambes). Il décrit chacune des taches de deux manières : sous la forme d'une série de valeurs pour la couleur et l'emplacement de la tache ; et sous la forme d'une «carte de support», une liste qui indique les pixels de l'image qui appartiennent à la tache (les pixels sont les éléments d'une image, semblables aux points qui composent l'image de votre téléviseur). Ensuite, pour modéliser



4. UN DÉTECTEUR DE BLAGUES détecte les mots d'esprit et l'humour du comique Jay Leno. Le système informatique repère les changements dans le rythme, l'intonation et les gestes de J. Leno.

l'arrière-plan, le détecteur de personnes crée des surfaces dotées d'une certaine texture. À chaque point de ces surfaces correspond une valeur moyenne de couleur et une répartition autour de cette moyenne.

Chaque fois que le logiciel détecte une nouvelle image dans le flot d'images vidéo, le détecteur de personnes compare l'image avec les modèles qu'il a élaborés, ainsi qu'avec d'autres références. Tout d'abord, le système essaie de déterminer la forme que devrait prendre le modèle de taches dans la nouvelle image. Si, par exemple, le torse de la personne se déplaçait vers la droite à une vitesse de un mètre par seconde un dixième de seconde plus tôt, le système considère que le centre de la tache représentant le torse s'est déplacé de un dixième de mètre vers la droite. Ces estimations sont également fondées sur des modèles de mouvements calculés à partir de tests effectués par des milliers de personnes. Par exemple, nous avons observé que les taches qui correspondent au torse se déplacent plus lentement que celles qui correspondent aux pieds et aux mains.

Lorsqu'il a terminé ses prévisions, le détecteur de personnes calcule la probabilité que chaque pixel de la nouvelle image appartienne aux différentes taches : il calcule la différence entre les valeurs de couleur et de luminosité du pixel et les valeurs moyennes de couleur et de luminosité de toutes les taches ; puis il compare les résultats obtenus avec la répartition de chaque tache afin de déterminer la probabilité que la différence soit le fruit du hasard. Si, par exemple, la différence de luminosité entre un pixel et une tache est de dix pour cent et que les statistiques sur cette tache indiquent qu'une telle

différence ne se produit que dans un pour cent des cas, la probabilité que le pixel appartienne à la tache n'est que de 0,01. Les ombres ne présentent qu'un problème mineur dans la mesure où elles provoquent des différences de luminosité très marquées. Dès lors, le système recherche les ombres, des zones qui sont plus sombres que le niveau de luminosité moyen, et nivelle leur nuance de couleur et leur saturation à l'aide de la luminosité générale de la zone observée.

Le système doit aussi corriger les légères modifications de l'éclairage et de la disposition des objets dans la pièce, qui pourraient faire que l'ordinateur place certains pixels dans de mauvais modèles. Pour contourner cette difficulté, le système met continuellement à jour les pixels qui sont visibles derrière l'utilisateur, calculant une moyenne à partir des anciennes et des nouvelles informations. De la sorte, le système assure le suivi des modifications qui surviennent. Par exemple, lorsque l'utilisateur déplace un livre, l'ordinateur modifie son modèle de la pièce en deux endroits : à l'endroit où se trouvait le livre et à l'endroit où il a été déplacé. Au terme de ces calculs et de ces compensations, le système affecte chaque pixel de la nouvelle image au modèle qui lui correspond le mieux. Enfin, il met à jour les statistiques qui décrivent le modèle de taches et la scène d'arrière-plan, ainsi que celles qui anticipent la direction que prendront les mouvements des taches.

Qui et comment ?

Une fois que les pièces intelligentes savent où se trouvent leurs occupants, elles doivent déterminer qui sont ces

personnes et ce qu'elles disent. De nombreux algorithmes permettent aux ordinateurs de comprendre le langage, mais la plupart des systèmes de reconnaissance de la parole ne fonctionnent correctement que si l'utilisateur porte un microphone ou s'en trouve proche. Aussi avons-nous cherché un système qui permettrait à l'ordinateur de décoder le langage d'un visiteur lorsque celui-ci se déplace dans une pièce, même lorsque le bruit de fond est important.

Nous nous sommes aidés du système de détection qui suit en permanence la position de l'utilisateur. À l'aide de ses informations, le système de reconnaissance vocale commande électroniquement une série de microphones fixes, de sorte qu'ils ne renforcent que les sons qui proviennent de la direction de la bouche de l'utilisateur. Puisque le son voyage à une vitesse fixe, il parvient en des lieux différents à des moments distincts. Ainsi, si le système utilise les sons enregistrés par une série de microphones et leur ajoute les décalages temporels pour tenir compte de la position, il renforce le son qui provient de cette position. Ensuite, il compare le son global capté avec les sons de mots connus jusqu'à trouver une correspondance.

Une pièce intelligente doit également savoir qui y parle ou qui lui parle : cette identification est souvent aussi importante que de reconnaître les paroles prononcées. Comme la manière la plus rapide d'identifier un individu est de reconnaître son visage, nous avons mis au point un système de reconnaissance faciale. Pour utiliser la méthode du maximum de vraisemblance, ce système devait tout d'abord construire des modèles à partir de visages qu'il

Les «ordifringues»

Une pièce intelligente fonctionne un peu comme un majordome. Sans gêner ses occupants, elle cherche constamment à les aider. Ne pourrait-elle nous accompagner en permanence en écoutant et en voyant tout ce que nous faisons et disons et en anticipant nos besoins ? Des collègues de l'auteur cherchent à intégrer des caméras, des microphones et des ordinateurs dans les vêtements. Ces «vêtements intelligents», surnommés ordifringues, peuvent fournir des informations sur l'environnement de leur utilisateur, tels le nom de personnes qu'il rencontre ou le lieu de sa prochaine réunion. En outre, ils peuvent remplacer la plupart des ordinateurs et des assistants électroniques utilisés habituellement.

Le projet de vêtements intelligents de l'Institut de technologie du Massachusetts a commencé en 1992. L'intégration d'ordinateurs, de caméras, de microphones et autres capteurs aux vêtements portés par une personne donne au programme le point de vue de celui qui porte les vêtements.

Par exemple, en intégrant une caméra dans la monture d'une paire de lunettes, le logiciel de reconnaissance des visages peut identifier les interlocuteurs et murmurer leur nom à l'oreille. Si des microphones sont placés dans une veste, un logiciel de reconnaissance vocale

peut rappeler des données importantes : à l'évocation d'un contrat, par exemple, le logiciel pourrait afficher les données financières associées à ce contrat sur l'écran intégré aux lunettes. Si un récepteur du système GPS de localisation par satellite était intégré à vos chaussures, un logiciel de navigation pourrait vous indiquer votre chemin.

Nos prototypes actuels de vêtements intelligents utilisent des casques commerciaux qui assurent confort et confidentialité. Leurs unités centrales sont peu encombrantes. Nous avons mis au point des unités de saisie de données qui autorisent l'utilisation de ces machines dans presque tous les contextes. De surcroît, elles utilisent des connexions sans fil au réseau *Internet*.

Notre but est de proposer des objets suffisamment petits et légers pour pouvoir être utilisés constamment, comme les lunettes et les montres aujourd'hui, qui mettraient à votre disposition la puissance d'un ordinateur. Les vêtements intelligents ne sont pas encore très discrets, en particulier les objets portés sur la tête, donnent une allure de «cybernaute» (voir la photographie). Toutefois, l'ère de l'«informatique permanente» est proche. Deux de nos collègues se sont ainsi transformés en «cyborgs» : ils portent leurs ordifringues continuellement.



«connaissait». Nous avons utilisé une technique mathématique nommée analyse par vecteur propre, afin d'obtenir des «visages propres», à partir desquels n'importe quel autre visage est obtenu par simple combinaison linéaire.

Lorsque la caméra détecte un occupant dans la pièce, le système de détection trouve la position de son visage, le système d'identification extrait l'image du visage de l'arrière-plan et il normalise son contraste. Le système calcule alors la combinaison linéaire qui correspond au visage observé et il compare le modèle avec celui des personnes connues. Si le calcul des similarités fournit un résultat proche, le système considère qu'il a identifié l'utilisateur. À l'aide de cette méthode, nos pièces intelligentes ont reconnu des visages, parmi plusieurs centaines de personnes, avec 99 pour cent de succès.

L'expression faciale est au moins aussi importante que l'identité. Un programme d'enseignement, par exemple, devrait savoir si ses étudiants ont l'air de s'ennuyer. Aussi, lorsque notre pièce intelligente a trouvé et identifié le visage de quelqu'un, elle analyse son expression (*voir la figure 2*). Un autre ordinateur compare alors les mouvements faciaux enregistrés par la caméra avec des cartes qui décrivent les mouvements faciaux qui accompagnent plusieurs expressions du visage. À chaque expression correspond une combinaison caractéristique de mouvements musculaires. Lorsque nous sourions, par exemple, nous relevons les coins de la bouche et nous soulevons certaines parties du front ; cependant, lorsque nous faisons semblant de

5. DES VOITURES INTELLIGENTES sont étudiées par les informaticiens de l'Institut de technologie du Massachusetts et par leurs collègues du Centre de recherche de la Société Nissan. Andy Liu et l'auteur ont réalisé un système informatique qui détermine la nature des actions d'un conducteur quelques instants après qu'elles ont commencé. Ils ont obtenu ce résultat en couplant leur système de reconnaissance avec un simulateur de conduite automobile où des capteurs enregistraient les mouvements des mains, des jambes et des yeux de personnes qui conduisaient sur un trajet virtuel. À l'aide de ce système, ils ont identifié des activités types, auxquelles on peut maintenant comparer les mouvements des conducteurs en situation de conduite réelle : pour savoir ce qu'un conducteur s'apprête à faire, l'ordinateur compare ses mouvements aux modèles identifiés. Une voiture qui saurait quand vous avez choisi de changer de voie pourrait vous avertir si un camion se trouve dans votre angle mort.





sourire, nous ne bougeons que la bouche. Au cours de nos expériences, le système a correctement reconnu les expressions d'un petit nombre de sujets dans 98 pour cent des cas.

Quoi?

La reconnaissance du visage, de l'expression et du langage d'une personne n'est que la première étape. Les pièces intelligentes doivent ensuite placer ces perceptions dans leur contexte : les mêmes mouvements peuvent être interprétés de différentes manières selon les intentions de la personne qui les effectue. Lorsque nous conduisons une voiture, par exemple, nous cessons d'accélérer soit parce que nous souhaitons ralentir, soit parce que nous abordons un virage ; toutefois, dans ce dernier cas, nous tournons simultanément le volant. Pour savoir ce que nous faisons à un instant précis, un ordinateur embarqué dans une automobile doit prendre en compte la modification de l'ensemble des mouvements.

Pour concevoir un tel système, nous avons emprunté des techniques utilisées dans le domaine de la reconnaissance de la parole. Dans ces techniques, on modélise les mots sous forme de séquences de sons, nommées états internes. Chaque mot comprend une succession particulière d'états internes, qui sont soit des phonèmes (la plus petite unité d'une langue), soit des parties de phonèmes. Un système informatique essaie d'identifier des mots en comparant la séquence de sons qu'ils contiennent avec des modèles de mots, puis en sélectionnant la correspondance la plus probable.

Nous avons généralisé cette approche dans l'espoir de déterminer les intentions des personnes à partir de leurs mouvements. Nous avons élaboré un système informatique qui détermine, par exemple, si une personne qui lève le bras indique une direction ou si elle s'étire seulement. Le système reconnaît l'indication d'une direction en se référant à un modèle qui comprend trois états internes : lever le bras, le maintenir dans cette position et le ramener vers soi rapidement. L'étirement est plutôt un mouvement lent et régulier. Aussi, en observant ces états internes, caractérisés par l'accélération du mouvement de la main et par la direction prise par ce mouvement, notre système «comprend» ce que la personne est en train de faire.

À ce jour, nous avons réalisé plusieurs systèmes qui interprètent les actions humaines. Le système le plus simple permet aux occupants des pièces intelligentes d'utiliser leur corps pour commander des environnements virtuels : on utilise notamment la description de la forme de l'utilisateur afin de placer un modèle vidéo de celui-ci dans une scène de réalité virtuelle où se trouvent des représentations animées de créatures virtuelles. Ces dernières analysent des informations sur les gestes, les positions et les sons de l'utilisateur pour définir la manière dont elles interagiront avec lui. Par exemple, le chien virtuel Silas va chercher les objets qu'on lui lance : lorsqu'un utilisateur de la pièce intelligente imite les mouvements qui consistent à ramasser et à lancer la balle virtuelle de Silas, le chien «voit» l'image vidéo effectuer le même geste et va chercher son jouet. Silas s'assied et se met également sur le dos, sur commande.

L'occupant de la pièce peut aussi utiliser sa position et sa voix pour interagir avec un programme informatique. Les jeux informatiques, par exemple, sont beaucoup plus amusants quand on remplace les manettes de jeu par des environnements qui permettent de naviguer dans des espaces virtuels à trois dimensions : dans un jeu de combat, lorsqu'un adversaire apparaît à gauche, le joueur le tuera simplement en se tournant vers la gauche et en criant «Pan».

Pourquoi?

Les jeux en réalité virtuelle ne sont pas les seules applications des pièces intelligentes, loin de là. Ces dernières pourront, par exemple, aider les malentendants. Dans le langage des signes, une série de mouvements faits avec les mains assure la communication. Nous avons donc cherché à reconnaître ce langage : à partir de l'observation de nombreux exemples de mouvements des mains, nous avons construit un modèle pour chaque signe. Puis, en comparant les gestes effectués par une personne avec les modèles enregistrés, nous avons traduit un sous-ensemble de 40 mots du langage des signes en temps réel, avec 99,2 pour cent de réussite. Lorsque nous aurons augmenté la taille du vocabulaire compris par notre ordinateur, nous pourrons créer des interfaces pour les malentendants aussi fiables que les sys-



6. LE LANGAGE DES SIGNES est fondé sur un ensemble de gestes des mains. L'auteur et ses collègues ont mis au point un programme qui reconnaît nombre de ces gestes. Sur cette photographie, la caméra enregistre le mouvement des mains qui, en langage des signes, signifie «bicyclette». Le système informatique modélise son mouvement et le compare avec des modèles de signes connus. Lorsque la correspondance est trouvée, la machine prononce le mot «bicyclette».

tèmes de reconnaissance vocale d'aujourd'hui.

Les conducteurs d'automobile pourraient également bénéficier des pièces intelligentes. Chaque année, 10 000 Français sont tués dans des accidents de la route dus en majorité à des erreurs de conduite. En collaboration avec le centre de recherche de la Société Nissan, nous avons construit un véhicule qui enregistre les actions des conducteurs et qui fournit des indications utiles, des instructions et même des avertissements.

Afin de répertorier un ensemble de modèles de conduite caractérisés par les gestes que font les conducteurs lors-

qu'ils dépassent, suivent un véhicule, tournent, s'arrêtent, accélèrent ou changent de file, nous avons enregistré les mouvements des mains et des jambes d'un grand nombre de conducteurs installés dans un simulateur (voir la figure 5). Puis nous avons utilisé les modèles résultants afin de classer les actions de chaque conducteur testé aussi vite que possible. De manière assez surprenante, le système parvient à déterminer ce que font les conducteurs presque au moment où l'action commence. Il identifie les actions avec 86 pour cent de succès, une demi seconde après le début de l'action. Quand on lui laisse deux

secondes pour identifier l'action, il la détermine correctement dans 97 pour cent des cas.

Ainsi, dans des situations simples, des systèmes informatiques modestes peuvent repérer les mouvements des personnes, les identifier et reconnaître leurs expressions en temps réel. En combinant plusieurs petits systèmes, on obtient des pièces intelligentes où, sans l'aide de claviers ni de souris, les occupants commandent l'affichage à l'écran, jouent avec des créatures virtuelles et communiquent en langage des signes. À l'aide de nos systèmes, nous étudions des applications variées. Par exemple, nous construisons des prototypes de lunettes qui identifient le visage d'une personne et murmurent son nom à l'oreille. Nous réalisons aussi des écrans de télévision qui savent si un téléspectateur les regardent et nous envisageons même des cartes de crédit qui reconnaîtront leur propriétaire et sauront si elles ont été volées.

D'autres équipes de notre laboratoire tentent de doter nos pièces intelligentes de la capacité de percevoir l'attention et les émotions, pour essayer de mieux comprendre les actions et les motivations humaines. Rosalind Picard espère mettre au point un système capable de déterminer si les conducteurs ou les étudiants sont distraits. Aaron Bobick écrit un programme qui interpréterait les mouvements des sportifs : il envisage de créer une caméra de télévision qui, au rugby par exemple, distinguerait une feinte d'une attaque décisive et suivrait automatiquement l'action. Progressivement, grâce au perfectionnement des pièces intelligentes, les ordinateurs deviendront des assistants attentifs. Sommes-nous sur la voie d'un monde où la distinction entre les objets animés et inanimés s'estompera?

Alex PENTLAND dirige le Groupe Ordinateurs et perception au Laboratoire des médias de l'Institut de technologie du Massachusetts.

P. MAES, T. DARRELL, B. BLUMBURG et A. PENTLAND, *The ALIVE System : Full-Body Interaction with Autonomous Agents*, in *Proceedings of Computer Animation '95*, 1995.

I.A. ESSA et A.P. PENTLAND, *Facial Expression Recognition Using a Dynamic Model and Motion Energy*, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society Press, 1995.

T. STARNER et A. PENTLAND, *Real-Time American Sign Language from Video Using Hidden Markov Models*, in *International*

Symposium on Computer Vision, 1995, IEEE Computer Society Press, 1995.

A. PENTLAND et A. LIU, *Toward Augmented Control Systems*, in *Proceedings of the Intelligent Vehicles '95 Symposium*, IEEE Industrial Electronics Society, septembre 1995.

C. Wren, A. AZARBAYEJANI, T. DARRELL et A. PENTLAND, *Pfinder : Real-Time Tracking of the Human Body*, in *Integration Issues in Large Commercial Media Delivery System*, sous la direction de A.G. Tescher et V.M. Bove, SPIE, vol. 2616, 1996.

Des articles et des rapports techniques sont disponibles sur le site Web : <http://www-white.media.mit.edu/vismod>

Prisonniers dans l'ambre

DAVID GRIMALDI

*Des insectes préservés dans l'ambre
nous livrent des secrets de l'évolution.*





1. CETTE MANTE RELIGIEUSE a été piégée dans la résine il y a 25 millions d'années, probablement alors qu'elle poursuivait une proie le long d'un tronc.

TAILLE REELLE

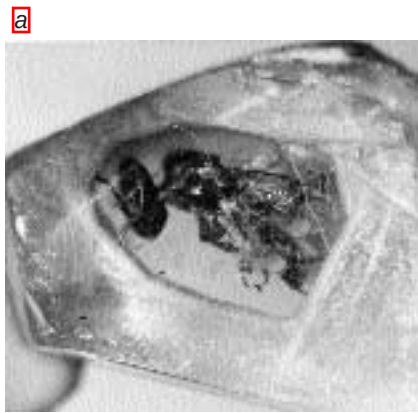


Sur une côte d'Amérique centrale, un ouragan avait dévasté la forêt d'*Hymenaea* géants. Des coulées jaunes de résine suintaient des branches mutilées et des troncs entaillés. Un termite frôla la résine, y resta collé, puis fut noyé dans la coulée.

Des terpènes et d'autres composés volatils de la résine imprégnèrent alors, lentement, les tissus du termite, remplaçant l'eau et tuant les bactéries. À l'air, la lumière et la chaleur du soleil activèrent des réactions chimiques : les atomes de carbone des longues molécules de la résine se lièrent et la résine polymérisa. Le morceau de sève durcie tomba au sol, parmi des milliers d'autres. L'année suivante, ou plus tard encore, une grande marée balaya les morceaux de résine et les troncs pourris dans le lagon, où des sédiments les recouvrirent. Enfouie pendant 25 millions d'années, la résine a poursuivi sa polymérisation : elle est devenue solide et chimiquement inerte. Les mouvements



TAILLE
RÉELLE



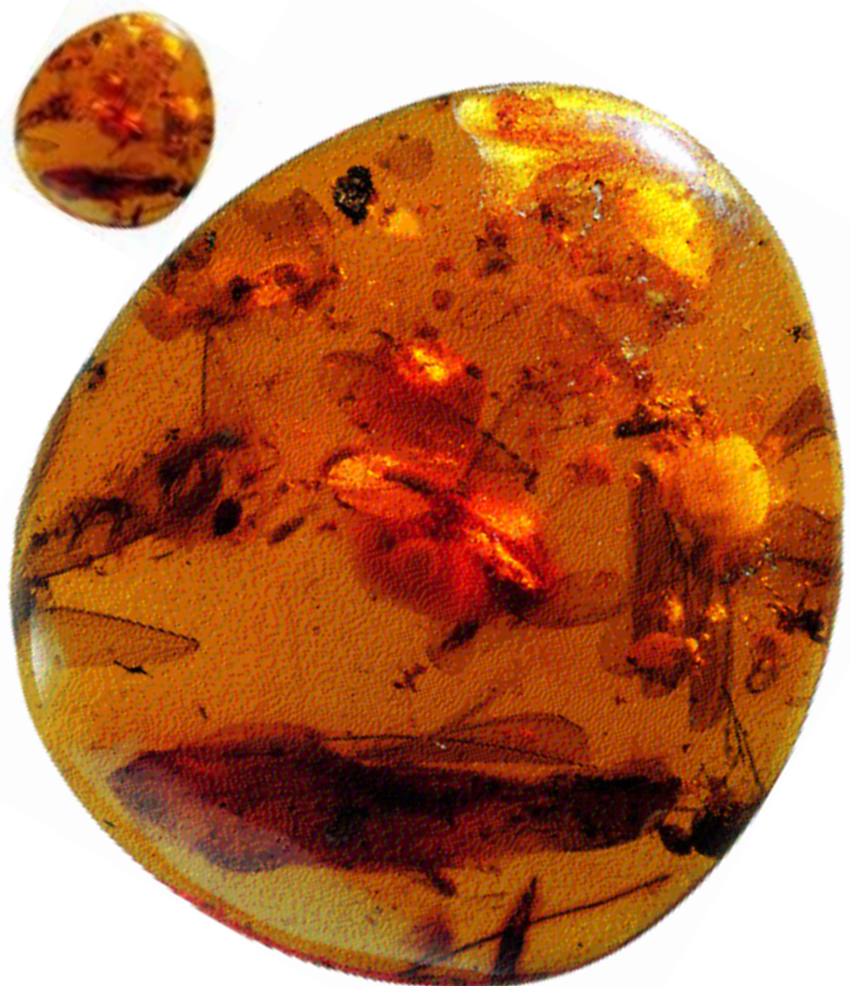
tectoniques ont ensuite soulevé la côte en montagnes escarpées, à 1 000 mètres d'altitude, formant l'île d'Hispaniola.

En se promenant dans ces montagnes, il y a quelques années, un mineur a découvert, dans un petit glissement de terrain, une veine de charbon. Il l'a creusée pendant plusieurs heures et il a déterré un tas de pépites. D'un coup de machette, il a fait sauter un éclat de l'une des pierres et a découvert le reflet de l'ambre. Dans ce morceau d'ambre se trouvait le grand termite, les ailes légèrement écartées et les pattes désaxées.

Ce morceau d'ambre, et le *Mastotermes electrodominicus* qui y était embaumé, ont abouti dans les tiroirs encombrés du Muséum américain d'histoire naturelle. Les mastotermes, insectes primitifs qui partagent des caractéristiques anatomiques avec les blattes, et dont on croyait qu'ils reliaient ces dernières aux termites modernes, intriguaient depuis longtemps les entomologistes. Des espèces proches, éteintes depuis 130 à 30 millions d'années, sont fossilisées dans des roches et dans de l'ambre sur toute la planète. Une espèce, *Mastotermes darwiniensis*, vit encore, en Australie.

En 1992, avec mes collègues, nous avons sectionné le morceau d'ambre afin d'extraire les tissus du termite. L'échantillon contenait des cellules admirablement conservées. Dans beaucoup, les mitochondries, les organites de la respiration cellulaire, qui contiennent aussi de l'ADN, étaient intactes. Les tissus étaient déshydratés, mais ils n'étaient pas racornis, malgré l'élimination de l'eau.

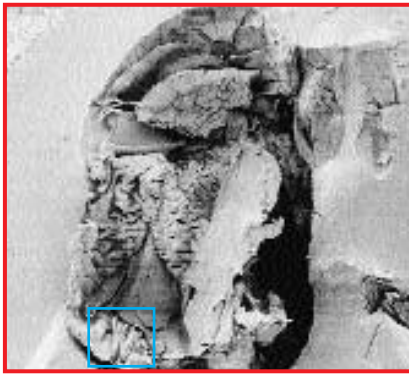
Normalement, après la mort d'un organisme, l'ADN se dégrade en présence d'eau. Ici la dessiccation avait permis à de grands tronçons d'ADN de rester intacts. À partir des organites cel-



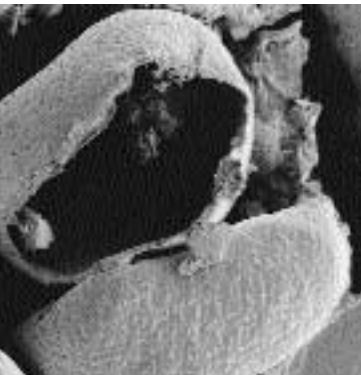
d



e



f



2. LES TISSUS FOSSILISES DANS L'AMBRE sont très bien conservés. Au microscope électronique à balayage, on a observé ceux d'une abeille sans aiguillon, *Proplebeia dominicana*. L'échantillon poli (a) a été scié presque jusqu'à l'insecte, puis il a été nettoyé et ouvert délicatement. La moitié gauche (b) contient des parties de la tête (en haut), du thorax (au milieu) et de l'abdomen (en bas). À l'intérieur de la tête (c) se trouvent le cerveau (au milieu, en haut), les longs muscles utilisés pour aspirer (à gauche) et la petite langue de l'abeille (en bas). Les écailles de la langue (d) mesurent environ 10 micromètres de long. Le thorax (e) contient des sacs à air repliés et, parmi d'autres structures, un petit groupe de muscles (f) dont chaque fibre a environ 15 micromètres d'épaisseur. La partie droite de l'échantillon (g) contient l'autre moitié de l'abdomen (à droite), ainsi que des grains de pollen (h) que l'insecte avait ingérés. Le diamètre d'un grain (i) est d'environ 30 micromètres. L'ambre découvert en République dominicaine contient beaucoup de ces abeilles, piégées alors qu'elles récoltaient de la résine pour construire leur nid.



3. CETTE MÉNAGERIE de 62 insectes ou morceaux d'insectes est contenue dans un morceau d'ambre de 2,8 centimètres de diamètre (à gauche). La carte de l'échantillon (à droite) montre des insectes de 5 ordres et de 14 familles : plusieurs cécidomyies, des fourmis, des coléoptères adultes et sous forme larvaire, et des guêpes parasites, dont l'une venait de pondre (en haut, à gauche). Des ailes de termites et des antennes ont été séparées des animaux auxquels elles ont appartenu. Des morceaux de trois termites sortent de moisissures (en haut, à droite) : ces insectes n'ont probablement été que partiellement piégés au début ; les parties exposées se sont décomposées, ont commencé à moisir et ont ensuite été recouvertes par une autre couche de résine.

lulaires nommés ribosomes, nous avons isolé de petits fragments des gènes 16s et 18s. Nous avons déterminé la séquence des bases de l'ADN d'un morceau (les bases sont les unités élémentaires qui codent l'information génétique) ; puis nous avons comparé cette séquence à celles des segments correspondants de gènes de termites, de blattes et de mantes actuels, qui constituent le groupe des Dictyoptères.

Grâce à ces comparaisons, nous avons reconstruit l'arbre phylogénétique du groupe. Les ressemblances morphologiques entre les mastotermes et les blattes ne correspondaient pas à une parenté proche. *Mastotermes darwiniensis*, l'espèce actuelle, et *Mastotermes electrodominicus*, l'espèce fossile, sont très proches : sur un segment d'ADN de 100 bases de longueur, les deux espèces ne diffèrent que par neuf paires de bases. En outre, ce sont de vrais termites.

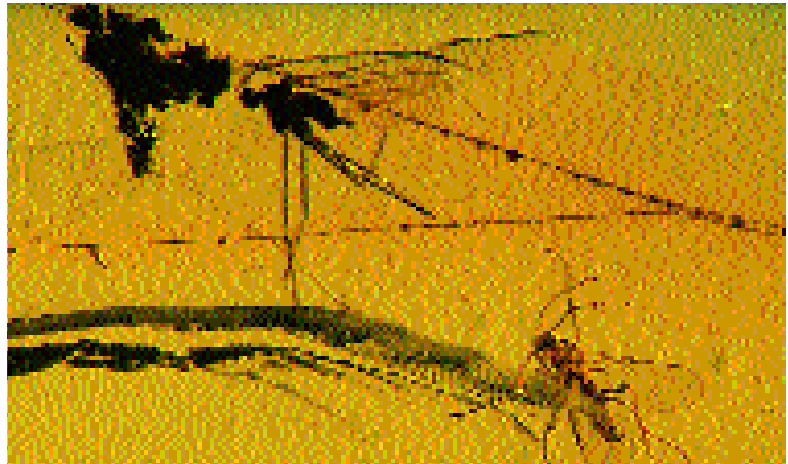
Depuis 1992, d'autres ADN d'insectes anciens ont été séquencés : on a analysé une drosophile, une abeille sans aiguillon, des moucheron Sciarides et Mycétophilides et des coléoptères Chrysomélidés, tous conservés dans de l'ambre. Puis, en 1993, on a séquencé le plus ancien ADN connu : celui d'un charançon de 125 millions d'années, conservé dans de l'ambre du Liban.

À la fin du Crétacé, il y a environ 65 millions d'années, le paysage s'est considérablement transformé. Les plantes à fleurs, aujourd'hui la forme de vie dominante sur terre, sont apparues. Simultanément plusieurs groupes d'insectes actuels ont évolué : les fourmis, les termites, les abeilles, les papillons diurnes et nocturnes, les coléoptères et d'autres, associés aux plantes à fleurs. Les fossiles contenus dans l'ambre du Crétacé sont donc particulièrement intéressants pour connaître l'histoire de l'évolution.

L'un des gisements de cet ambre, formé il y a 90 à 94 millions d'années, a été découvert dans le centre du New Jersey, il y a environ cinq ans. Il a livré des fossiles extraordinaires, dont une plume d'oiseau, la plus ancienne trace d'oiseau connue sur le continent Nord-américain, les plus anciennes abeilles et fourmis, et l'unique fleur incluse dans l'ambre du Crétacé, une petite inflorescence d'une forme primitive de chêne. L'exploration génétique de ces vestiges devrait éclairer l'Évolution sur la Terre.

Pris en flagrant délit

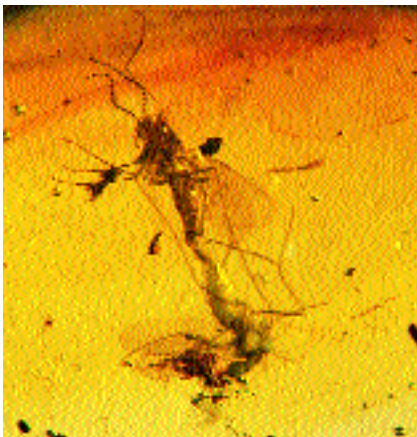
Le piégeage des insectes dans l'ambre montre que des comportements familiers ont au moins 25 millions d'années.



LA TOILE D'UNE ARAIGNÉE emprisonne l'un de ces deux moucheron, de la famille des Cecidomyiidae.

TROIS FOURMIS ATTAQUENT une larve de mante religieuse, preuve de la coopération des fourmis pour chasser ou se défendre.

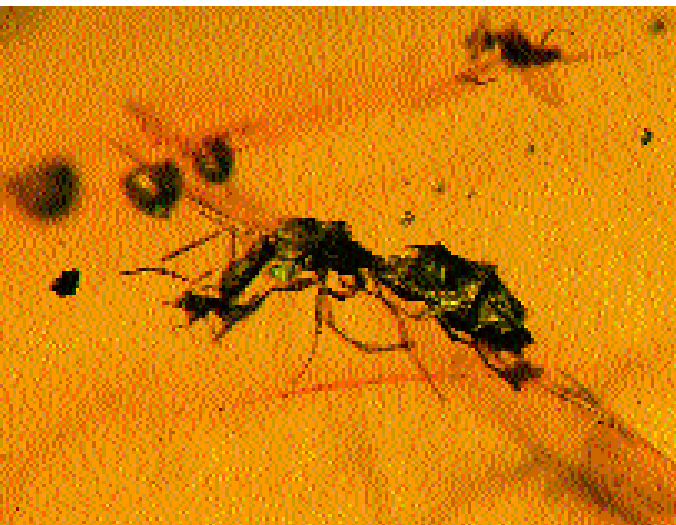




L'AMOUR ET LA MORT unissent deux cécidomyies accouplées. La femelle aurait pondu environ 100 œufs, dont les larves se nourrissent de champignons.



PONDRE EN MOURANT est un réflexe observé chez de nombreux insectes. Les larves de ce papillon (probablement un tinéidé) se nourrissaient peut-être de champignons durs et ligneux qui poussaient sur les arbres *Hymenaea*.



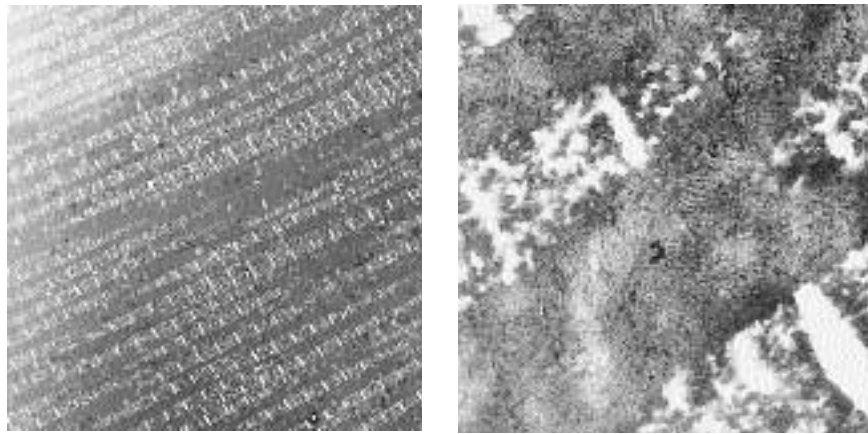
CETTE REINE DES FOURMIS du genre *Acropyga* porte une cochenille dans ses mandibules. Aujourd'hui certaines fourmis élèvent des colonies de ces insectes, dont elles récoltent une sécrétion sucrée, le miellat. Lorsque la reine disperse son ancienne colonie, elle emporte l'un de ces insectes lors de son vol nuptial pour commencer son nouveau nid.



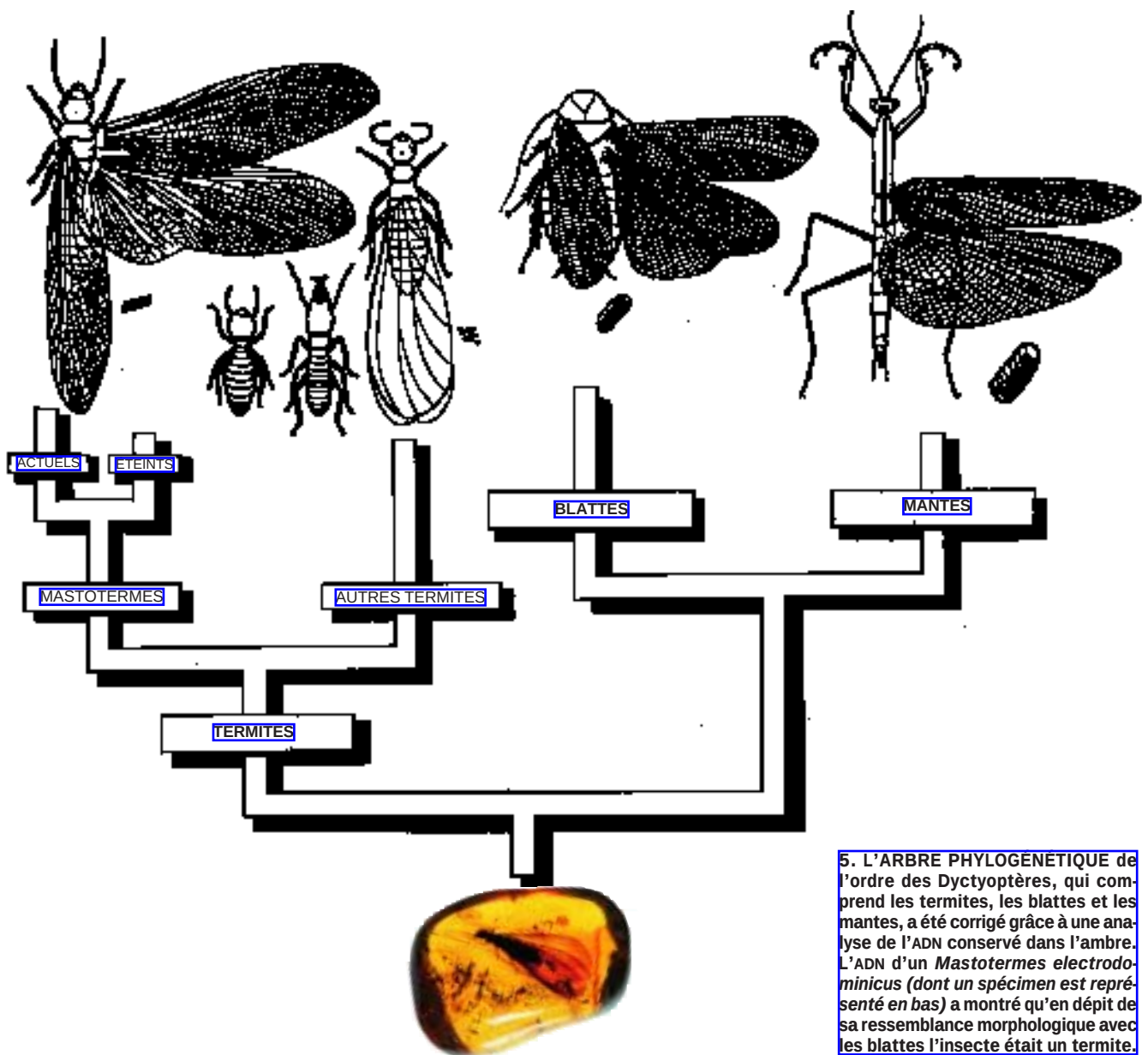
UN ACARIEN EST ACCROCHE à l'abdomen d'un moucheron chironomidé. Ces moucheron vivent dans l'eau ou dans le sol très humide pendant leur vie larvaire, récupérant ainsi ces acariens.



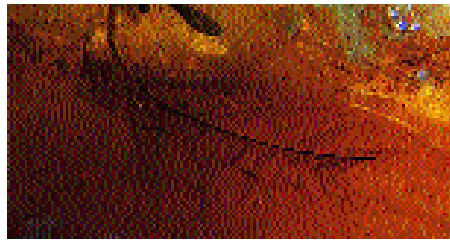
UN MOUCHERON PIQUEUR (de la famille des *Ceratopogonidae*) gorgé de sang. On a prétendu qu'il s'agissait de sang de dinosaures, mais ce moucheron a vécu 40 millions d'années après leur disparition.



4. LES MUSCLES ALAIRES d'une abeille sans aiguillon, fossilisée dans l'ambre, ont été grossis pour montrer les fibres musculaires striées (à gauche). Chaque fibre mesure jusqu'à un micromètre de large. Entre ces filaments sont entassées les membranes repliées des mitochondries, qui, en coupe, ressemblent à des empreintes digitales (à droite). C'est de ce type de cellules d'un termite que l'auteur et ses collègues ont extrait de l'ADN.



5. L'ARBRE PHYLOGENETIQUE de l'ordre des Dictyoptères, qui comprend les termites, les blattes et les mantis, a été corrigé grâce à une analyse de l'ADN conservé dans l'ambre. L'ADN d'un *Mastotermes electrodominicus* (dont un spécimen est représenté en bas) a montré qu'en dépit de sa ressemblance morphologique avec les blattes l'insecte était un termite.

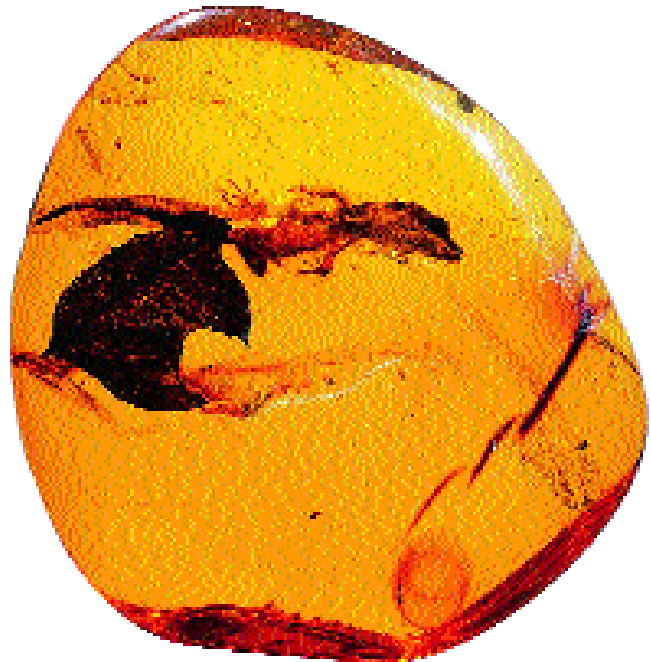


6. LES PLUS ANCIENNES FLEURS conservées dans l'ambre sont les chatons d'un chêne primitif (à gauche). Une plume (au milieu, en haut) est le plus ancien vestige d'un oiseau en Amérique du Nord. L'ambre du New Jersey contient aussi les plus anciens spécimens

de plusieurs insectes, tel ce diptère (au milieu, en bas). Près de l'ambre, de l'argile a préservé plusieurs fleurs, telle celle de *Detrusandra* (à droite), apparentée au magnolia, de deux millimètres de large, transformée en charbon par des feux de forêt.



7. UNE GRENOUILLE *ELEUTHRODACTYLUS* (à gauche) et un gecko *Sphaerodactylus* (à droite) sont piégés dans des morceaux d'ambre de 5,8 et 4,3 centimètres de diamètre, respectivement. Au-dessus de la grenouille, la carcasse décomposée d'une autre gre-



nouille est entourée de larves de mouches. La colonne vertébrale du gecko est brisée, probablement parce qu'il s'est débattu pour échapper à la résine. La feuille, à côté de lui, a été vraisemblablement découpée par une abeille mégachilide.

David GRIMALDI dirige le département d'entomologie du Muséum national américain d'histoire naturelle, à New York.

Svante PÄÄBO, *L'ADN des fossiles*, in *Pour la Science*, décembre 1993.

R. MACPHEE et David GRIMALDI, *Mammal Bones in Dominican Amber*, in *Nature*, vol. 380, pp. 489-490, 11 avril 1996.

David GRIMALDI, *Amber : Window to the Past*, Harry N. Abrams, 1996.

Le suicide des cellules

JEAN-CLAUDE AMEISEN

Les cellules sont perpétuellement en instance de mort ; elles ne restent en vie qu'à condition de recevoir des signaux de survie émis par leur environnement. Des anomalies de ces mécanismes seraient responsables de diverses pathologies, tels le cancer, le SIDA et les maladies neurodégénératives.

Pourquoi l'homme tombe-t-il malade, vieillit-il, meurt-il ? Toutes ces interrogations commencent à être élucidées par l'étude des mécanismes qui déterminent la survie et la mort des milliards de cellules qui le constituent.

Pendant longtemps, on a pensé que la mort des cellules, qu'elle soit massive ou limitée, intermittente ou quotidienne, ne pouvait résulter que d'agressions, de l'action du temps, de maladies ou du vieillissement. Puis l'étude de la toute première étape de la vie a progressivement balayé ce dogme : le développement de l'embryon est caractérisé par des phénomènes spectaculaires et incessants de multiplication, de différenciation et de migration des cellules, qui aboutissent à la transformation de l'œuf originel, formé d'une seule cellule, en un être pluricellulaire complexe. Paradoxalement, durant cette période, surviennent, en l'absence de toute maladie et de tout vieillissement, des épisodes massifs de mort cellulaire.

Observés pour la première fois à la fin du XIX^e siècle, ces phénomènes de mort cellulaire ont d'abord été négligés, et considérés comme la conséquence d'erreurs inévitables dues à l'énorme production de cellules qui caractérise la période embryonnaire. Or, ces phénomènes de mort cellulaire surviennent dans toutes les espèces d'organismes pluricellulaires étudiées, dans de très nombreux organes, aux mêmes endroits et aux mêmes moments dans tous les embryons d'une même espèce. Il y a une cinquantaine d'années, cette constatation a conduit les biologistes à supposer que la mort cellulaire fait partie intégrante du programme normal de déve-

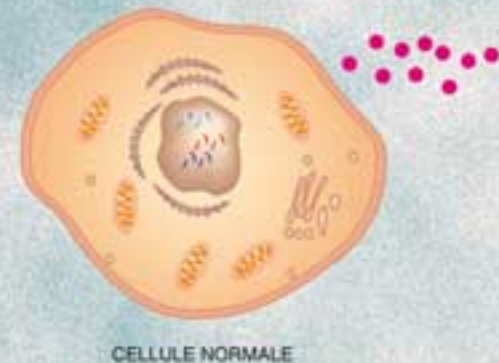
loppement de l'embryon. Cette hypothèse souleva de nombreuses questions quant au rôle possible de ce phénomène, à ses mécanismes et à son contrôle génétique.

On établit d'abord que la mort cellulaire, tel un sculpteur, modèle la forme de l'embryon par élimination de tissus. Ainsi, elle fait disparaître les tissus ancestraux qui n'ont plus de fonction dans l'espèce : la queue de l'embryon humain, par exemple, ou les branchies et la queue du têtard, utiles au cours du développement, mais qui disparaissent lors de la métamorphose en grenouille. Chez les mammifères et les oiseaux, la mort cellulaire sculpte les pattes, élimine les tissus qui joignent les doigts, individualisant ainsi les doigts (l'atténuation de ce phénomène aboutit à la formation des pattes palmées, chez les oiseaux aquatiques).

La mort cellulaire participe aussi à l'ouverture des orifices du tube digestif, à la formation des reins, au remodelage des os et des cartilages, et à la différenciation sexuelle. La mort programmée peut être commandée par des signaux émis par l'organisme : les biologistes l'ont compris quand ils ont découvert le rôle essentiel de certaines hormones dans le déclenchement de cette mort au cours de la métamorphose des insectes et des batraciens. Pourtant, c'est l'étude de la formation du système immunitaire et du cerveau – les deux organes de régulation les plus élaborés des oiseaux et des mammifères – qui a révélé la complexité des mécanismes de mort cellulaire. Dans ces organes, la mort cellulaire n'est pas destinée à sculpter une forme, mais à permettre l'émergence d'une fonction.

Mort cellulaire, système immunitaire et cerveau

L'efficacité remarquable de nos défenses contre la multitude des agents infectieux environnants est due à l'extraordinaire diversité des mécanismes de reconnaissance du système immunitaire. Chacun des quelques centaines de millions de lymphocytes qui le composent porte un récepteur qui lui est propre, et qui lui permet de reconnaître un agent infectieux capté par les cellules de l'organisme. Pour créer cette diversité, l'organisme utilise la formi-



1. UNE CELLULE est sans cesse entre la vie et la mort. Quand elle ne reçoit pas, de son environnement, les signaux qui la maintiennent en vie, elle se suicide : son noyau se condense et se fragmente, sa membrane bourgeonne et son cytoplasme se divise en petits ballonnets (les corps apoptotiques) ; une telle cellule bourgeonnante a été photographiée au microscope électronique à balayage (en bas à l'extrême droite). Une cellule apoptotique exprime à sa surface des molécules qui permettent aux cellules voisines de les identifier et d'absorber les corps apoptotiques. Les cellules en apoptose disparaissent sans laisser de traces.

dable puissance du hasard : il permet à un nombre limité de gènes de s'associer de toutes les façons possibles.

Toutefois, cette solution n'est pas dénuée de risques : un lymphocyte dont le récepteur a été produit à la suite d'une telle loterie risque de se tromper d'adversaire et d'attaquer les constituants de l'organisme. Chaque récepteur lymphocytaire doit être capable de distinguer les molécules qui appartiennent à l'individu (les molécules du soi) et qui ne doivent pas activer le système immunitaire, et les molécules des agents infectieux (le non-soi) qui doivent activer le système immunitaire : la survie de l'individu en dépend.

L'embryon n'a aucun moyen de distinguer *a priori* les récepteurs spécifiques du soi et du non-soi. Pendant la grossesse, à l'abri des agressions extérieures et des agents infectieux, l'embryon fait subir aux lymphocytes encore immatures une étape de sélection obligatoire, où la mort joue un rôle essentiel. Quand un lymphocyte reconnaît trop bien certains constituants de l'organisme, il risque d'attaquer les tissus de l'organisme et de déclencher une maladie auto-immune : il est dangereux et doit mourir. Au contraire, quand un lymphocyte ne reconnaît pas les constituants de l'or-

ganisme, il est incapable d'interagir avec une cellule qui a capté un agent infectieux : il est inutile et doit aussi périr. Plus de 90 pour cent des lymphocytes meurent au cours de cette sélection. L'organisme ne permet qu'aux lymphocytes capables de remplir leur fonction de survivre.

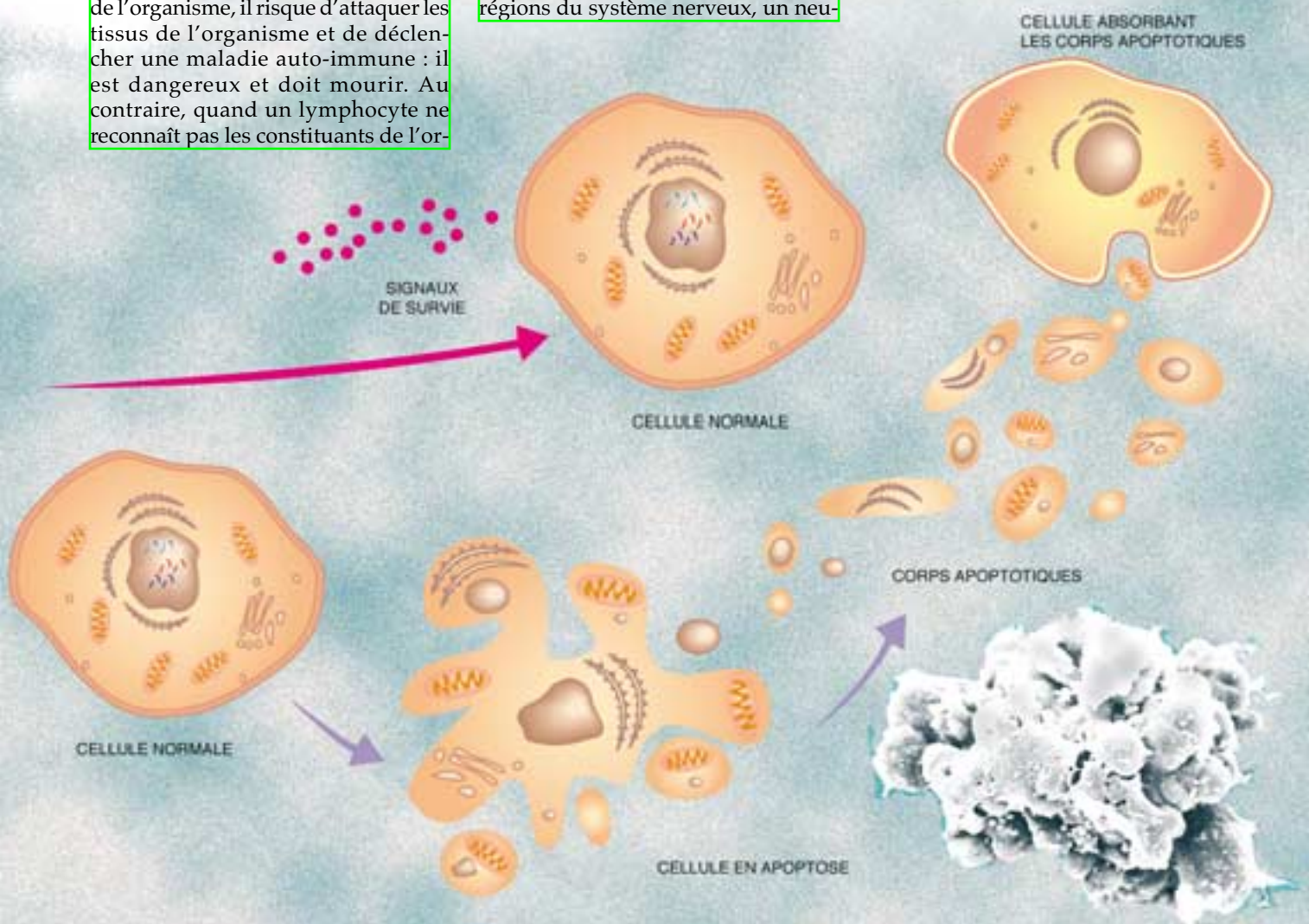
Vie et mort des neurones

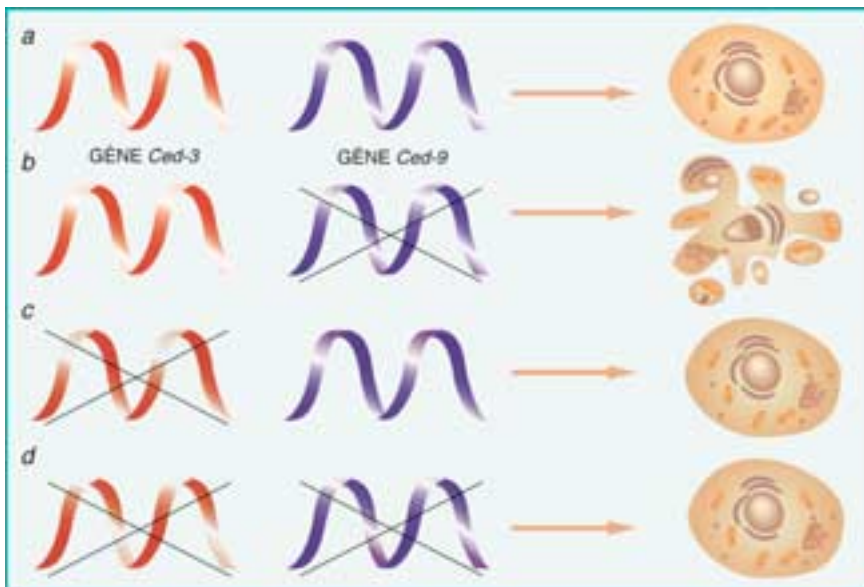
De même, dans le système nerveux, l'organisation extrêmement complexe du cerveau émerge d'un apprentissage fondé sur un dialogue entre les cellules et sanctionné par la mort. Dans l'embryon, les cellules nerveuses (les neurones) se multiplient, se déplacent et envoient des prolongements (les axones) qui leur permettent d'établir des connexions (les synapses) avec d'autres populations cellulaires (les muscles ou d'autres neurones) ; les neurones constituent ainsi, de proche en proche, les réseaux de communication qui permettent le fonctionnement du système nerveux. Dans la plupart des régions du système nerveux, un neu-

rone sur deux en moyenne meurt pendant la période où s'établissent ces contacts.

Durant cette période, tous les neurones sont programmés pour mourir, et leur destin – la survie ou la mort – dépend de leur capacité à établir un contact avec leur cible. Dès qu'un neurone établit ce contact, un signal de survie, produit par ses partenaires cellulaires, empêche la mise en route du programme de mort. Sont éliminés les neurones inutiles ayant établi des circuits peu performants qui parasiteraient les circuits efficaces, et les neurones dangereux ayant établi des connexions aberrantes avec des cellules qui ne sont pas des partenaires naturels et ne libèrent pas les signaux indispensables à leur survie.

Progressivement, les circuits performants nés de ces dialogues élémentaires forment de multiples réseaux éphémères, dont la stabilisation détermine la survie des neurones. Ainsi naît





2. CHEZ LE VER CAENORHABDITIS ELEGANS, lorsque les gènes *Ced-3* et *Ced-9* s'expriment, les cellules survivent (a). Quand seul *Ced-3* s'exprime, la cellule se suicide (b). Quand *Ced-3* ne s'exprime pas, mais que *Ced-9* est activé, la cellule survit (c). On en déduit que l'expression du gène *Ced-3* provoque la mort, tandis que celle de *Ced-9* l'empêche. Dans les mutants où aucun de ces deux gènes ne s'exprime (d), toutes les cellules survivent : l'expression de *Ced-3* est nécessaire, mais non suffisante, pour déclencher la mort.

la structure du système nerveux, formé de quelques dizaines de milliards de neurones spécialisés, chacun étant en moyenne relié à une dizaine de milliers d'autres neurones. La quantité d'informations nécessaires à l'élaboration des systèmes immunitaires et nerveux dépasse les capacités de stockage du génome. Pour tourner cette difficulté, le programme génétique propose des règles du jeu incontournables et un mécanisme drastique de correction des erreurs. Parce qu'il oblige tous les partenaires cellulaires à engager un dialogue, chaque organe doit s'auto-organiser et sélectionner, parmi toutes les configurations possibles, celle qui lui permettra d'assurer au mieux sa fonction.

Ainsi, au cours du développement embryonnaire des organismes pluricellulaires, le destin de chaque cellule n'est pas prédéterminé. C'est le langage cellulaire – l'émission ou la réception de signaux spécifiques – qui détermine la survie ou la mort des cellules. Par quels mécanismes le dialogue qui s'établit entre les différentes populations cellulaires au cours du développement de l'embryon détermine-t-il la survie, ou la mort, des cellules ? Et, tout d'abord, comment les cellules meurent-elles ?

Il y a plus de 20 ans, John Kerr et Andrew Wyllie, de l'Université d'Édimbourg, ont remarqué le caractère stéréotypé de la mort cellulaire

programmée, très différent de l'aspect anarchique de la nécrose ; ils ont décrit ce mécanisme sous le nom d'apoptose, d'après le mot grec désignant la chute des feuilles en automne.

Nécrose et apoptose

La nécrose est un phénomène de mort cellulaire, spectaculaire et catastrophique, connu depuis longtemps et associé à diverses maladies. Les cellules, attaquées par un poison ou par un agent infectieux, ou menacées par un manque d'oxygène, gonflent ; la membrane se rompt et les enzymes toxiques contenues dans les cellules sont libérées ; ces substances tuent les cellules environnantes, déclenchant une réaction inflammatoire et une cicatrisation fibreuse (un tissu fibreux anormal se forme), laquelle dénature l'architecture du tissu et de l'organe.

La mort cellulaire programmée est très différente : des millions de cellules meurent en quelques heures sans entraîner ni inflammation ni lésion dans les tissus où elles disparaissent. Ainsi, un tiers environ des thymocytes, les précurseurs immatures des lymphocytes T, meurent chaque jour pendant le développement embryonnaire sans que leur disparition entraîne la moindre lésion dans le thymus.

Parce qu'elle constitue un phénomène rapide et discret, la mort cellulaire programmée est parfois difficile

à détecter. La cellule qui se suicide se détache des cellules voisines, puis se désintègre de façon ordonnée : son noyau se condense, puis se fragmente, les chromosomes et le génome se brisent en fragments réguliers, et le cytoplasme se divise en petits ballonnets, rapidement ingérés par les cellules voisines. La surface cellulaire prend un aspect «bouillonnant», mais la membrane de la cellule ne se rompt pas, évitant toute libération de constituants intracellulaires toxiques dans l'environnement. L'expression de certaines molécules à la surface de la cellule mourante permet aux cellules voisines ou à des macrophages de les identifier et de les ingérer.

Il y a une quinzaine d'années, on a montré que l'on peut enrayer les mécanismes d'apoptose au moyen de substances chimiques qui interdisent à la cellule d'exprimer ses gènes et de synthétiser des protéines : c'était la preuve que les cellules participent de façon active à leur propre destruction et qu'elles activent leur programme de suicide, en réaction à un signal donné. Aujourd'hui, on sait que les armes de l'autodestruction existent sous forme inactive dans de nombreuses cellules et qu'elles sont prêtes à être utilisées dès qu'elles reçoivent le signal adéquat. La décision de vie ou de mort dépend de l'environnement extérieur de la cellule : des signaux de survie, dont la nature varie au cours du temps, peuvent bloquer le déclenchement du suicide. Le destin de chaque cellule, celui de chaque organe, dépend en permanence de la qualité du dialogue que les cellules entretiennent avec leurs partenaires et qui, seul, prolonge leur survie.

Les gènes du suicide cellulaire

C'est l'étude d'un des plus petits organismes pluricellulaires, un ver transparent (le nématode *Caenorhabditis elegans*), qui a permis, il y a 10 ans, à Robert Horvitz et à son équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts d'apporter la première preuve que le suicide cellulaire est commandé par des gènes. Sur les 1 090 cellules produites pendant le développement embryonnaire de *Caenorhabditis elegans*, 131 meurent.

L'analyse de très nombreux mutants génétiques de *Caenorhabditis elegans* a permis aux généticiens d'iden-



3. LA MORT CELLULAIRE est indispensable à la formation de l'embryon. Elle intervient notamment pour façonner le cerveau, le système immunitaire ou encore les doigts. Un embryon de quelques

semaines (à gauche) a les doigts reliés par une membrane. Les cellules qui la constituent s'autodétruisent, le tissu disparaît, laissant les doigts bien séparés (à droite).

tifier 14 gènes dont l'expression commande toutes les étapes du suicide cellulaire : on a montré – sans toutefois identifier la cascade des événements moléculaires – que certains interviennent dans la décision de la cellule de s'engager ou non dans la voie du suicide ; certains participent directement à l'autodestruction ; d'autres enfin permettent l'ingestion des cellules en apoptose par les cellules voisines.

Deux gènes jouent un rôle essentiel dans la régulation de la mort cellulaire : *Ced-3*, dont l'expression provoque la mort cellulaire, et *Ced-9*, dont l'expression empêche cette mort. *Caenorhabditis elegans* perd 131 cellules au cours du développement embryonnaire normal parce que *Ced-3* s'exprime dans ces cellules, tandis que *Ced-9* n'est pas activé. Dans les 959 cellules qui survivent, *Ced-9* empêche *Ced-3* d'entraîner la mort.

Dans les mutants où *Ced-3* ne s'exprime pas, l'ensemble des 1 090 cellules survivent ; inversement, dans les mutants génétiques où *Ced-9* ne s'exprime pas, l'ensemble des cellules de l'embryon meurent. Enfin, dans les mutants où ni *Ced-3* ni *Ced-9* ne s'expriment, aucune cellule ne meurt au cours du développement ; l'expression de *Ced-3* est donc nécessaire, mais non suffisante, pour déclencher la mort : son action ne s'exerce qu'en l'absence d'expression de *Ced-9* (voir la figure 2). *Ced-3* code une cystéine protéase, c'est-à-dire une enzyme qui découpe certaines protéines en petits morceaux. Si la destruction de certaines protéines

semble un des mécanismes essentiels de l'autodestruction cellulaire, on ignore comment *Ced-9* exerce son effet préventif.

Ainsi certains gènes ont pour fonction d'interrompre prématurément la vie d'une cellule, et d'autres de lui permettre de survivre, et les gènes de survie ont un effet dominant : c'est seulement en l'absence des molécules codées par les gènes de survie que les produits des gènes tueurs entraînent le suicide.

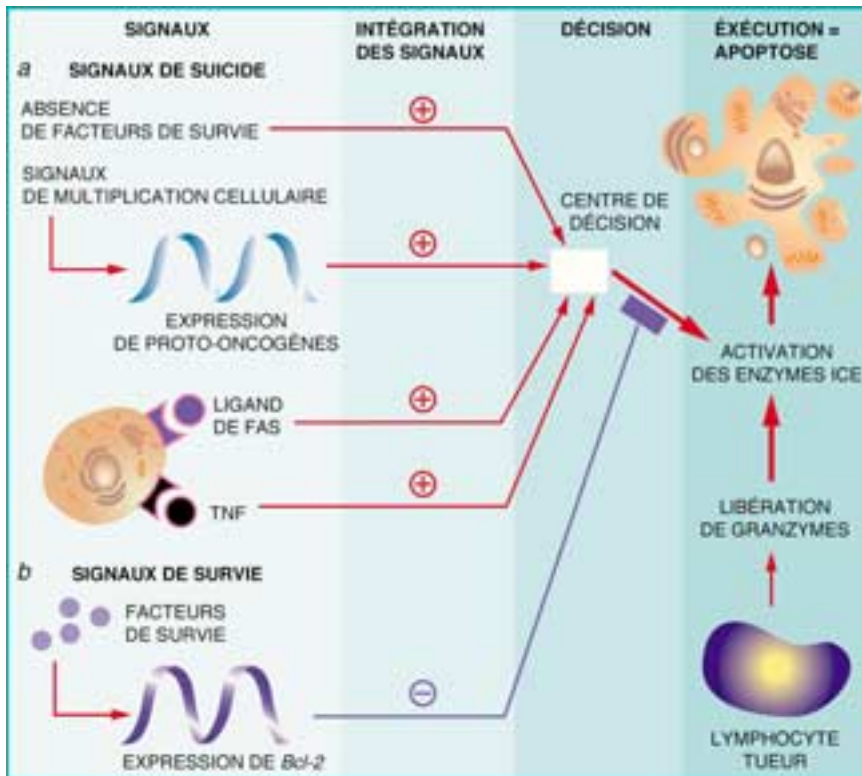
Quels sont les gènes qui contrôlent la mort cellulaire dans les organismes plus complexes que *Caenorhabditis elegans*? L'homme a deux gènes très semblables à ceux de *Caenorhabditis elegans*, les gènes *ICE* et *Bcl-2*. *ICE*, comme *Ced-3*, code une cystéine protéase. On ignore comment *Bcl-2* agit. On a réussi à faire exprimer le gène *Bcl-2* humain par l'embryon de *Caenorhabditis elegans*, et l'on a obtenu le même effet préventif sur la mort cellulaire qu'avec le gène *Ced-9* ; ainsi, *Bcl-2* et *Ced-9* agissent tous deux sur une même cible, présente à la fois chez *Caenorhabditis elegans* et chez l'homme. Les gènes qui contrôlent le suicide cellulaire ont été remarquablement conservés au cours de l'évolution : ils jouent certainement un rôle essentiel dans le développement embryonnaire de toutes les espèces.

On a longtemps pensé que ces programmes de suicide cellulaire n'étaient opérationnels que pendant la période du développement embryonnaire et cessaient de l'être après la naissance.

Cette idée tenait à des facteurs expérimentaux (les phénomènes de mort cellulaire programmée sont difficiles à mettre en évidence quand ils ne sont pas massifs), et surtout à des facteurs psychologiques (les biologistes acceptaient difficilement une telle précarité des cellules chez l'adulte). Ce sont les recherches sur les mécanismes de certaines maladies, tels le cancer et le SIDA, qui ont progressivement révélé que les programmes de suicide cellulaire continuaient à jouer un rôle déterminant, même chez l'adulte.

Mort cellulaire chez l'adulte

Dans toutes les populations cellulaires d'un organisme, le nombre de cellules résulte à tout moment d'un équilibre entre les phénomènes de multiplication et de suicide des cellules. Les signaux qui assurent la survie cellulaire, en empêchant le déclenchement du suicide cellulaire, ne sont pas obligatoirement des facteurs de croissance, c'est-à-dire des molécules qui déclenchent la multiplication cellulaire. Toutes les cellules de mammifères étudiées jusqu'à présent, qu'elles proviennent d'un embryon, d'un enfant ou d'un adulte, s'autodétruisent dès qu'elles sont privées de contacts avec d'autres cellules ; la survie de chacune des cellules de l'organisme semble dépendre de la réception permanente, ou à intervalles réguliers, de signaux de survie émis par d'autres cellules et qui empêchent la mise en route du programme de suicide cellulaire.



4. LE SUICIDE CELLULAIRE est commandé par divers signaux. Les signaux de suicide (a) sont, notamment, une absence de facteurs de survie, les signaux de la multiplication cellulaire qui déclenchent l'expression de proto-oncogènes, ou encore deux molécules nommées le ligand de Fas et le TNF (le facteur nécrosant des tumeurs) : ils favorisent le déclenchement du suicide cellulaire, car ils activent les enzymes de la famille ICE. Toutefois, des facteurs de survie (b), qui déclenchent l'expression de gènes tels que *Bcl-2*, s'opposent à l'activation ou aux effets des enzymes ICE et peuvent bloquer le suicide cellulaire. Les lymphocytes tueurs (ou cytotoxiques) court-circuitent tous ces mécanismes en libérant des enzymes (les granzymes) qui pénètrent dans la cellule cible et activent directement les enzymes ICE.

Un tel mode de fonctionnement lie très étroitement le destin de chaque cellule à celui de l'organisme tout entier. Il permet à l'organisme d'adapter rapidement la taille d'une population cellulaire à ses besoins : par exemple, lors d'une infection, le nombre des lymphocytes augmente notablement, mais, une fois l'infection jugulée, la situation se normalise par un phénomène massif de suicide cellulaire qui n'épargne qu'un petit pourcentage de lymphocytes spécifiques de l'agent infectieux, garants de la mémoire immunologique.

De même, ce phénomène participe à l'expansion et à la contraction régulière de certains organes : le remodelage cyclique de l'utérus, qui survient chez la femme en l'absence de fécondation, résulte d'épisodes réguliers de suicide cellulaire, liés à la chute brutale des hormones sexuelles qui bloquent le suicide cellulaire durant 21 jours. Enfin, la mort cellulaire programmée permet, nous le verrons, l'élimination de cellules devenues anormales et présentant, de ce fait, un

danger pour l'organisme, qu'il s'agisse de cellules infectées, de cellules présentant des anomalies génétiques, ou de cellules en voie de cancérisation. Ainsi, la survie ou la mort d'une cellule résulte d'une combinaison de facteurs internes (la nature des gènes qui s'expriment) et de facteurs externes (la nature des signaux reçus). Certains signaux augmentent la probabilité de déclenchement du suicide, tandis que d'autres signaux la diminuent.

Le déclenchement de la mort

Comment les signaux émis ou reçus déterminent-ils la vie ou la mort des cellules ? Chez *Caenorhabditis elegans* et chez la drosophile, l'expression de certains gènes (*ces-1* et *egl-1*, *reaper* et *hid*) enclenchent la décision de suicide. Dans les cellules de mammifères, on ignore encore où est prise une telle décision. En revanche, on connaît plusieurs situations qui augmentent la probabilité de survenue d'un suicide cellulaire. Dans la première, déjà décrite, la cellule reçoit moins de signaux de

survie, de sorte que l'expression des gènes inhibiteurs du suicide, tel *Bcl-2*, diminuent.

Dans la deuxième situation, la cellule reçoit des signaux qui déclenchent la multiplication cellulaire, c'est-à-dire, d'une part, l'expression de gènes nommés proto-oncogènes, tels *c-myc*, *c-fos* et *c-ras*, qui amorcent la multiplication cellulaire et, d'autre part, l'activation d'enzymes, les cyclines, qui assurent le bon déroulement des différentes étapes du cycle cellulaire. Paradoxalement, ces événements déclenchent aussi le suicide cellulaire : la cellule qui reçoit les signaux de multiplication s'autodétruit, sauf si elle reçoit, préalablement ou simultanément, des signaux de survie, qui déclenchent l'expression de gènes tels que *Bcl-2*. Plus une cellule est engagée dans la voie de la multiplication, plus elle a besoin de signaux de survie pour ne pas s'autodétruire. Ce contrôle drastique de la multiplication cellulaire, longtemps méconnu, est un des principaux mécanismes qui évitent le développement des cancers, comme nous l'explicitons plus loin.

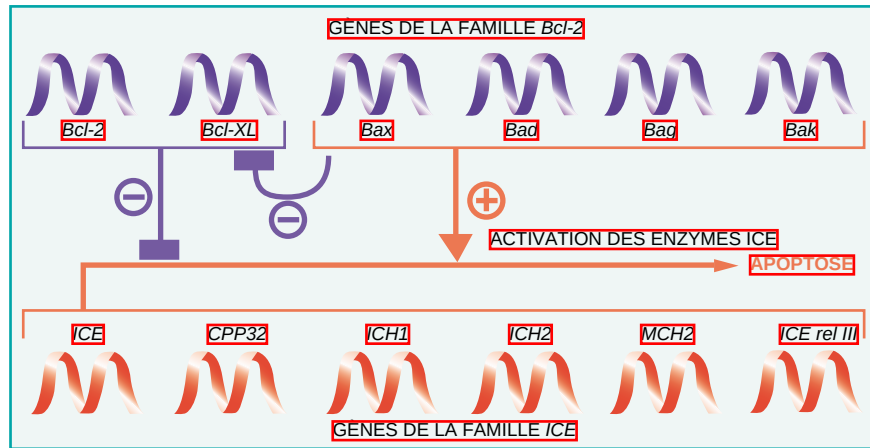
Enfin, une troisième catégorie de signaux favorise le déclenchement de la mort : ce sont des molécules de surface qui agissent lors des contacts entre cellules ou qui sont libérées dans le milieu et se fixent à distance sur les récepteurs de surface des cellules cibles. Les membres les plus étudiés de cette famille sont deux molécules exprimées par les cellules du système immunitaire : le facteur nécrosant des tumeurs, le TNF, et le ligand du récepteur Fas.

Ces deux molécules déclenchent la mort très rapidement, car la cellule cible ne peut résister qu'à condition d'avoir préalablement synthétisé des « anti-dotes » à ces molécules. L'expression du gène *Bcl-2* empêche le suicide seulement si cette expression a précédé la réception du signal. Ainsi, la survie ou la mort d'une cellule dépend non seulement de la nature des signaux qu'elle reçoit à un moment donné, mais aussi de ceux qu'elle a reçus auparavant : la survie ou la mort d'une cellule dépend à la fois de sa situation présente et de son histoire passée.

Pourtant, exception à cette règle, le système immunitaire peut obliger une cellule à s'autodétruire, quels que soient les signaux qu'elle a reçus de son environnement et quels que soient les gènes de survie qu'elle exprime. Lorsque des agents infectieux, tels les virus, cer-

taines bactéries, et de nombreux parasites, sont capables de se multiplier à l'intérieur des cellules de l'organisme, le système immunitaire les élimine en tuant les cellules infectées. C'est aussi en les tuant qu'il élimine les cellules cancéreuses. Pour ce faire, les lymphocytes tueurs (ou cytotoxiques) libèrent, au contact des cellules qu'ils reconnaissent comme anormales ou infectées, des protéines (des granzymes et des perforines) qui pénètrent dans la cellule cible. Les granzymes activent, en les coupant, les précurseurs des protéases de la famille ICE de la cellule anormale ; elles déclenchent directement l'autodestruction de la cellule cible en court-circuitant tous les mécanismes régulateurs du suicide. Ce mécanisme a un intérêt considérable : lorsque le système immunitaire identifie une cellule anormale ou infectée, c'est de lui seul que doit dépendre l'arrêt de mort de la cellule cible, et non de la nature des signaux que la cellule a reçus de son environnement. Toutefois, et nous y reviendrons, certains virus ont réussi à trouver des parades pour échapper à cette stratégie.

Quelles que soient les situations conduisant au suicide cellulaire, les mécanismes moléculaires qui déterminent la décision de survie ou de mort des cellules de mammifères se sont révélés beaucoup plus complexes que ne le laissaient soupçonner les résultats obtenus par l'étude de *Caenorhabditis elegans*. La famille des protéases humaines ICE, qui activent la machinerie d'autodestruction, compte au moins six membres (ICE, CPP32, ICH1, ICH2, MCH2 et ICE rel III). Ils agissent peut-être séparément, simultanément, ou en cascade, et certains semblent capables d'exercer sur les autres des effets tantôt activateurs, tantôt inhibiteurs. Ils ne seraient pas tous exprimés par l'ensemble des cellules de l'organisme, et leur participation au suicide cellulaire dépendrait de la nature de la population cellulaire. On ignore encore quelles sont les protéines cibles qu'ils découpent lorsqu'ils sont activés ; si la destruction de certaines de ces protéines cibles joue un rôle direct dans le suicide ; si les protéases de la famille ICE représentent la machinerie terminale d'autodestruction, ou si elles ne font qu'activer une autre machinerie de mort de nature encore inconnue ; enfin si les protéases de la famille ICE ont d'autres fonctions que de tuer la cellule.



5. SIX MEMBRES composent la famille des gènes *Bcl-2* et six autres celle des gènes *ICE*. *Bcl-2* et *Bcl-XL* favorisent la survie (signe -) en bloquant l'activation ou les effets des enzymes ICE. Au contraire, *Bax*, *Bad*, *Bag* et *Bak* favorisent le suicide (signe +), en s'opposant aux effets de *Bcl-2* et de *Bcl-XL*, activant ainsi les enzymes ICE.

Autant de questions qui se posent quant au fonctionnement des gènes de la famille *Bcl-2*, les gènes inhibiteurs de la mort. Aujourd'hui, on connaît six membres de la famille *Bcl-2* (*Bcl-2*, *Bcl-XL*, *Bax*, *Bad*, *Bag* et *Bak*), mais la plupart d'entre eux ont des effets antagonistes : certains, tels *Bcl-2* et *Bcl-XL*, favorisent la survie ; d'autres, tel *Bax*, favorisent le suicide. Ces protéines antagonistes se lient les unes aux autres, et c'est leur quantité respective qui détermine le seuil de déclenchement du suicide. On ignore si *Bcl-2* et *Bcl-XL* sont des inhibiteurs du suicide, dont l'effet est bloqué par *Bax*, ou si *Bax* est un inducteur du suicide dont l'effet est bloqué par *Bcl-2* et par *Bcl-XL*.

En revanche, on sait que la survie d'une population cellulaire particulière est assurée, à des moments différents de l'existence, par l'expression de différents gènes de la famille *Bcl-2*. Ainsi, l'expression de *Bcl-XL* est indispensable à la survie des lymphocytes embryonnaires, et celle de *Bcl-2* à la survie des lymphocytes adultes. Chez les souris qui ne possèdent pas le gène *Bcl-2*, les lymphocytes se développent, survivent normalement jusqu'à la naissance, mais quelques jours après, l'ensemble des lymphocytes s'autodétruit et disparaît.

À cette spécialisation des gènes qui contrôlent la mort cellulaire se superpose la diversité des réactions cellulaires à un signal donné : un même signal pouvant déclencher l'expression de différents gènes dans des populations cellulaires différentes, il sera responsable de la mort de telle population cellulaire, mais favorisera la survie de telle autre. Le contrôle génétique et moléculaire du suicide cellulaire

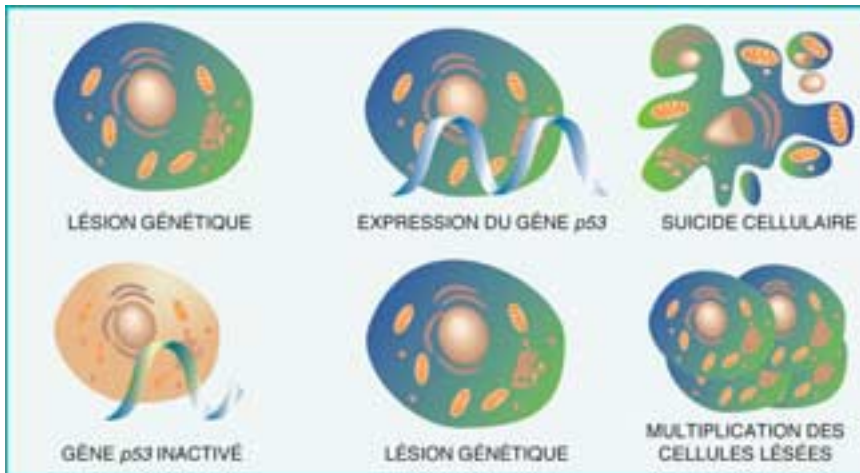
semble aussi complexe que celui de la différenciation et de la multiplication des cellules.

Le dérèglement des mécanismes du suicide cellulaire est-il à l'origine de certaines pathologies ? En 1990, j'ai proposé que diverses maladies, le SIDA notamment, caractérisées par la disparition de certaines populations cellulaires, résultent d'anomalies du fonctionnement des programmes de suicide cellulaire.

Apoptose, SIDA et cancers

Au cours du SIDA, le nombre des lymphocytes *T* CD4 et celui des neurones cérébraux (qui ne sont pas infectés par le virus) diminuent, ce qui aboutit à un déficit immunitaire et, dans certains cas, à une atrophie cérébrale et à une démence. Lors des hépatites virales, les cellules du foie (les hépatocytes) disparaissent brutalement ; parfois, le tissu hépatique est détruit progressivement et une cirrhose apparaît ; l'alcoolisme chronique a les mêmes effets. De même, les amyotrophies spinales de l'enfant, responsables de paralysies, ainsi que de nombreuses maladies dégénératives du système nerveux, qui entraînent un vieillissement cérébral prématuré, telles les maladies d'Alzheimer, de Creutzfeldt-Jakob et de Parkinson, sont dues à la disparition de certaines populations de neurones.

Dans toutes ces maladies, des travaux récents indiquent que la disparition excessive des cellules est associée à des phénomènes anormaux de suicide cellulaire. On commence à en connaître certains mécanismes. Ainsi les produits de l'expression de certains



6. LE GÈNE P53 est un gardien de l'intégrité des cellules : lorsqu'une cellule subit une lésion génétique, il s'exprime et déclenche son autodestruction (en haut). En revanche, lorsque ce gène est inactivé, les cellules génétiquement lésées se multiplient à l'excès, subissant des altérations chromosomiques qui ne sont pas éliminées. Dans de nombreux cancers humains, le gène suppresseur de tumeur p53 est inactivé par mutation.

gènes du virus du SIDA (*gp120* et *Tat*) favoriseraient le déclenchement du suicide cellulaire ; certaines maladies neurodégénératives seraient dues à des mutations inactivant des gènes (*NAIP*, *ALG3*) qui, normalement, empêchent le suicide des neurones.

Ainsi, la mort anormale de certaines populations cellulaires au cours de ces maladies ne serait pas due, comme on le pensait naguère, à des phénomènes de destruction cellulaire, mais à l'absence d'expression de gènes qui, normalement, bloquent le déclenchement du suicide cellulaire. Inversement, diverses maladies sont dues à une augmentation anormale du nombre de certaines populations cellulaires. Une augmentation du nombre de cellules résulte soit d'un excès de la multiplication cellulaire, soit d'un suicide cellulaire insuffisant. Aujourd'hui, on sait que le blocage excessif des programmes de suicide cellulaire joue un rôle notable dans ces maladies, notamment dans les cancers.

On a longtemps cru que la transformation cancéreuse d'une cellule résultait uniquement de l'expression anormale de proto-oncogènes, des gènes qui déclenchent la multiplication cellulaire. Deux découvertes successives ont remis en question ces dogmes : premièrement, le gène *Bcl-2*, dont l'expression anormale est à l'origine des cancers lymphocytaires humains les plus fréquents, inhibe le déclenchement du suicide cellulaire, mais est dépourvu de tout effet sur la multiplication cellulaire. Deuxièmement, l'expression anormale de proto-

oncogènes suffit, à elle seule, à déclencher le suicide cellulaire. Ces gènes n'entraînent la multiplication cellulaire qu'à condition que d'autres gènes soient aussi exprimés pour bloquer le suicide cellulaire. Ainsi, l'inhibition du suicide cellulaire est une étape essentielle de la cancérisation.

Le gène p53

La transformation cancéreuse est parfois liée à l'inactivation anormale d'une autre famille de gènes, les anti-oncogènes ou gènes suppresseurs de tumeurs, qui, normalement, freinent la multiplication cellulaire. Or, le gène suppresseur de tumeur *p53*, dont l'inactivation par mutation est très fréquente dans les cancers humains, participe au déclenchement du suicide cellulaire. Comme l'activation du gène *Bcl-2*, l'inactivation du gène *p53* favorise la survie anormale des cellules. Le gène *p53* veille à l'intégrité du génome cellulaire : lorsque survient une altération génétique, il oblige la cellule à interrompre sa multiplication et à réparer la lésion génétique ; quand la lésion est trop importante, *p53* déclenche le suicide cellulaire. Les mutations inactivant le gène *p53* permettent aux cellules lésées de se multiplier et de subir de nouveaux remaniements génétiques qui favorisent la transformation tumorale. La quasi-totalité des traitements anticancéreux, de la radiothérapie aux chimiothérapies, agissent en forçant les cellules cancéreuses à s'autodétruire. Toutefois, l'accumulation d'altérations génétiques favorise éga-

lement la résistance aux traitements anticancéreux.

Le blocage anormal des programmes de suicide cellulaire participe aussi à la dissémination des cellules cancéreuses dans l'organisme, un des mécanismes qui font la gravité des cancers. Une cellule normale qui migre dans un organe autre que le sien s'y suicide, parce qu'elle n'y trouve pas les signaux de survie nécessaires au blocage de son programme d'autodestruction. En revanche, une cellule cancéreuse dont le programme de suicide est anormalement bloqué peut survivre en l'absence de signaux appropriés, et coloniser de nouveaux organes en formant des métastases. Tous les intermédiaires existent entre des tumeurs où les cellules meurent en grand nombre, mais se multiplient plus qu'elles ne meurent, et les tumeurs les plus agressives, où les cellules se multiplient sans mourir.

Le dérèglement des programmes de suicide cellulaire jouent aussi un rôle essentiel dans les maladies infectieuses. Le déclenchement des mécanismes de suicide cellulaire dans les cellules infectées et dans les cellules avoisinantes, après pénétration d'un agent infectieux, représente un mécanisme de défense ancestral de la plupart des organismes ; cette « stratégie de la terre brûlée » empêche l'agent infectieux de coloniser l'hôte. Toutefois, de nombreux virus ont contre-attaqué en exprimant des gènes qui bloquent le suicide des cellules qu'ils infectent. Le virus d'Epstein-Barr (l'agent de la mononucléose infectieuse) exprime deux gènes qui inhibent le suicide cellulaire, *BHRF1*, qui ressemble à *Bcl-2* et exerce la même action, et *LMP1*, qui déclenche l'expression de *Bcl-2* dans la cellule infectée. Le papillomavirus (à l'origine de certains cancers génitaux) exprime le gène *E6*, qui dégrade la protéine codée par le gène *p53*. L'adénovirus exprime le gène *E1A* qui déclenche la multiplication de la cellule infectée, mais aussi (comme les proto-oncogènes cellulaires) le suicide cellulaire, et le gène *E1B* qui inactive *p53* et prévient le suicide ; cette coexpression permet au virus d'entraîner la survie et la multiplication de la cellule infectée, et de se propager. D'autres virus, tel le virus du SIDA, expriment des gènes qui leur permettent de provoquer le suicide de lymphocytes non infectés, et de perturber les réactions immuni-

taires. Outre ces virus, des bactéries et des parasites peuvent aussi dérégler les programmes de suicide, soit dans les cellules infectées, soit dans les lymphocytes non infectés. Ainsi, l'activation ou l'inhibition des phénomènes de suicide cellulaire déterminerait la persistance ou l'élimination des agents infectieux et serait une nouvelle cible pour le traitement des maladies infectieuses.

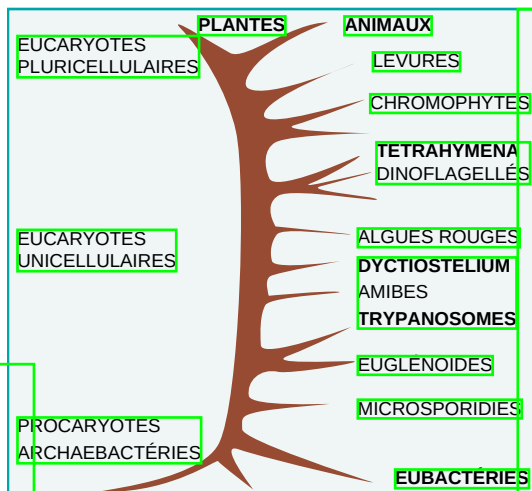
Enfin, les programmes de suicide cellulaire sont peut-être liés au vieillissement, cette frontière floue et ultime entre la santé et la maladie. Le vieillissement résulte-t-il uniquement d'une accumulation aléatoire d'erreurs au cours du temps ou est-il, en partie, génétiquement programmé? La sénescence cellulaire conduit-elle au suicide cellulaire? Dans la plupart des organes, le vieillissement s'accompagne d'une diminution du nombre des cellules, et le suicide cellulaire excessif pourrait intervenir dans les phénomènes naturels de la sénescence.

Apoptose et évolution

Ayant découvert que toutes les cellules de l'organisme sont programmées pour s'autodétruire et que leur survie dépend en permanence de la répression de ce programme par des signaux de l'environnement, les biologistes ont radicalement revu leur conception de la santé et des maladies. Leur représentation de l'évolution du monde vivant en a aussi été profondément modifiée.

Les premiers êtres vivants, nés il y a environ trois milliards d'années, étaient des organismes unicellulaires procaryotes, de la famille des bactéries. Puis, il y a quelque deux milliards d'années, sont apparus des organismes unicellulaires plus complexes, les eucaryotes. Enfin, il y a environ 700 millions d'années, ont surgi les premiers organismes pluricellulaires.

À quel moment de l'évolution les premiers gènes permettant à une cellule de s'autodétruire sont-ils apparus? La plupart des biologistes ont pensé que l'origine des programmes de suicide cellulaire, c'est-à-dire d'une forme de régulation sociale de la survie et de la mort des cellules, était contemporaine de l'apparition des organismes pluricellulaires. En d'autres termes, la précarité et l'altruisme cellulaire seraient apparus lorsque les cellules



7. DANS L'ARBRE PHYLOGENIQUE de l'évolution du vivant, des organismes appartenant à diverses branches (en caractères gras) présentent des formes de mort cellulaire programmée. On estime que les bactéries sont apparues entre 2 et 3,5 milliards d'années, les trypanosomes entre 1,5 et 2 milliards d'années, et les organismes pluricellulaires il y a environ 700 millions d'années.

se sont condamnées à vivre ensemble. Nos recherches ainsi que celles d'autres équipes, ont montré que l'origine des programmes de suicide cellulaire est beaucoup plus ancienne : ces programmes sont opérationnels dans des eucaryotes unicellulaires, notamment des parasites, responsables de maladies graves chez l'homme. Ainsi, l'existence de programmes de suicide cellulaire, et d'un contrôle social de la survie cellulaire, semble être une composante essentielle et ancestrale de l'adaptation des êtres vivants à leur environnement. Des formes plus primitives de mort programmée existeraient chez les bactéries : elles joueraient un rôle dans les défenses contre les infections virales, et dans les luttes entre différentes colonies bactériennes, pour l'appropriation des ressources. Des médicaments qui déclencheraient le suicide des agents infectieux représenteraient de nouveaux traitements des maladies infectieuses.

Les gènes commandant la mort des organismes unicellulaires ont peut-être d'abord eu pour fonction de lutter contre d'autres espèces. Il s'agirait de gènes codant des toxines, et de gènes codant des antidotes permettant de se protéger contre ces toxines. Ensuite, ces gènes auraient été utilisés par les organismes unicellulaires pour contrôler leur propre survie et éliminer les cellules les moins performantes.

Une autre hypothèse, que j'ai proposée, stipule que l'autodestruction de la cellule est causée par des gènes qui

participent à la multiplication cellulaire : l'origine du suicide cellulaire serait aussi ancienne que celle de la multiplication cellulaire, c'est-à-dire que l'origine de la première cellule. L'évolution aurait sélectionné, simultanément, des mécanismes qui permettent d'empêcher le suicide des cellules pour augmenter l'efficacité de leur multiplication, et des mécanismes qui favorisent le suicide cellulaire pour éliminer les cellules génétiquement altérées et optimiser l'adaptation de la colonie à son milieu.

À une époque et dans une société où tout ce qui a trait à la mort est le plus souvent occulté et rejeté, l'étude du suicide cellulaire révèle qu'au plus intime de chaque être vivant les gènes entretiennent avec la mort une relation active, étrange et complexe, qui fait partie intégrante de notre vie.

Qu'il s'agisse de la survie des cellules ou de la durée de la vie, la capacité de l'homme à en repousser les frontières dépendra de son aptitude à comprendre les mécanismes moléculaires qui gouvernent la mort, et non à vouloir seulement leur résister. S'il se confirme que le dérèglement des programmes de suicide cellulaire joue un rôle essentiel dans de nombreuses maladies telles que les cancers, les maladies neurodégénératives, le SIDA, l'élaboration de stratégies thérapeutiques capables de modifier ces programmes deviendrait un des objectifs de la médecine de demain.

J.-C. AMEISEN est responsable du programme *Apoptose et pathogenèse des maladies infectieuses* dans l'Unité INSERM 13 de l'hôpital Bichat, à Paris, et maître de conférences-praticien hospitalier, à la Faculté de médecine de Lille.

J.-C. AMEISEN, J. ESTAQUIER et T. IDZIOREK, *From AIDS to Parasite Infection : Pathogen-mediated Subversion of Programmed Cell Death as a Mechanism for Immune Dysregulation*, in *Immunological Reviews*, vol. 142, pp. 9-51, 1994.

H. STELLER, *Mechanisms and Genes of Cellular Suicide*, in *Science*, vol. 267, pp. 1445-1449, 1995.

C.B. THOMPSON, *Apoptosis in the Pathogenesis and Treatment of Disease*, in *Science*, vol. 267, pp. 1456-1462, 1995.

J.-C. AMEISEN et al, *Apoptosis in a Unicellular Eukaryote*, in *Cell Death and Differentiation*, vol. 2, pp. 285-300, 1995.

Des jeux infinis et des grands ensembles

JEAN-PAUL DELAHAYE

Des relations inattendues entre les jeux, les systèmes informatiques et la théorie axiomatique des ensembles amènent les grands cardinaux.

Le jeu commence avec un paquet de 20 jetons : chacun des deux joueurs à tour de rôle enlève un, deux, trois ou quatre jetons ; celui qui prend le dernier jeton gagne. Comment bien jouer ? La stratégie gagnante consiste à laisser à l'adversaire un nombre de jetons multiple de 5. Comme celui qui commence a un tel nombre de pions devant lui, il est certain de perdre, si, bien sûr, le second joueur joue correctement, c'est-à-dire applique la stratégie indiquée.

Dans un tel jeu « fini, à information complète, sans partie nulle », une stratégie gagnante existe toujours : une façon de jouer assure à l'un des deux joueurs de gagner quoi que fasse l'autre. Il est, dans le cas des 20 jetons, facile d'établir une stratégie et de l'appliquer et il est également intéressant de savoir que, dans tous les cas, une telle stratégie existe : cela nous encourage à la chercher.

Pour les jeux « finis, à information complète avec parties nulles », comme le jeu d'échecs et le jeu de dames, mais pas le bridge ou le poker où l'information n'est pas parfaite, car on ne sait pas ce que sont les cartes des autres, soit il existe une stratégie gagnante pour l'un des joueurs, soit chaque joueur est certain de pouvoir au moins faire nul à chaque partie (si les deux joueurs jouent bien, toutes les parties sont nulles). Pour le jeu d'échecs ou les dames, ces stratégies optimales sont trop complexes pour être calculées effectivement, mais elles existent ; si quelqu'un réussit un jour à les expliciter, alors ce sera la mort de ces jeux, plus sûrement encore que si un ordinateur devient champion du monde.

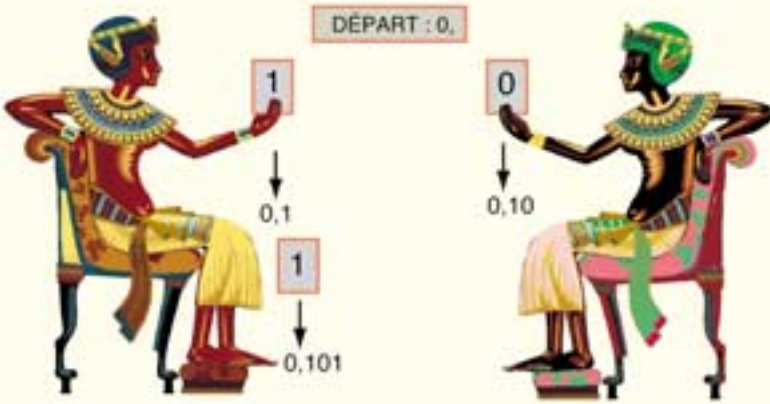
Nous avons examiné des jeux finis, où le nombre de parties possibles est immense : dans le cas des échecs, ce nombre de parties possibles est supérieur au nombre d'électrons dans l'Univers visible. Aussi paradoxal que cela paraisse, la complexité de ces stratégies optimales finies est supérieure à celle des stratégies optimales pour certains jeux infinis. Ces jeux sont au cœur des derniers développements de la théorie des ensembles.

Nous avons tout le temps

Prenons un ensemble A de nombres réels, chacun compris entre 0 et 1. Par exemple : $A = \{0, 1, 1/2, 1/4, 1/8, \dots\}$. Le joueur I choisit un chiffre '0' ou '1' ; imaginons que c'est '1', et que ce joueur commence le développement binaire d'un nombre réel : 0,1. Le joueur II choisit un chiffre '0' ou '1' ; imaginons que c'est '0', et il le juxtapose aux chiffres précédents, ce qui donne : 0,10. Etc.

1. LE JEU DES PHARAONS

L'ensemble A contient tous les nombres inférieurs à 1 dont le développement binaire ne comporte jamais trois 0 ou trois 1 consécutifs. L'ensemble A contient par exemple $2/3 = 0,10101010\dots$, $6/7 = 0,110110110\dots$



DÉPART : 0,

1
↓
0,1
1
↓
0,101

0
↓
0,10

Le premier pharaon choisit un chiffre, 0 ou 1, et commence à écrire le développement binaire, 0,1 par exemple. Le second pharaon choisit à son tour un chiffre, 0 ou 1, et le juxtapose : 0,10, et ainsi de suite. Le but du premier pharaon est que le nombre obtenu à la fin de la partie infinie soit un élément de l'ensemble A . Le but du second pharaon est que ce nombre ne soit pas dans l'ensemble A . Ici le premier pharaon gagne en choisissant toujours l'inverse de ce que vient de jouer le second pharaon. Lorsqu'il existe une stratégie gagnante pour un des deux joueurs, on dit que le jeu est déterminé et que l'ensemble A est déterminé. L'affirmation que tout ensemble est déterminé est un indécidable de la théorie des ensembles.

Le but du joueur I est que le nombre obtenu en fin de partie (au bout d'un temps infini!) soit un élément de l'ensemble A , et le but du joueur II est que ce nombre ne soit pas un élément de A . Existe-t-il une façon de jouer, pour I ou pour II, qui assure le gain?

Solution : Le joueur II a une stratégie gagnante. Il joue '1' au début, puis '1' une fois sur deux, et '0' une fois sur deux. Voyons pourquoi il gagne avec cette stratégie. Une petite difficulté initiale ne nous arrêtera pas : il existe deux développements binaires de $1/2$: $0,1000\dots$ et $0,0111\dots$ (le second développement résulte du fait que la somme de la série $1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 + \dots$ est égale à $1/2$). Similairement, les développements binaires de $1/4$ sont $0,0100\dots$ et $0,001111\dots$. Dans aucun de ces développements, on ne trouve un '1' suivi plus loin d'un '0', puis plus loin d'un '1' ; donc, dès son troisième coup, le joueur II est certain que le développement obtenu à l'infini sera celui d'un nombre n'appartenant pas à A .

Citons quelques problèmes de jeu infini avec divers ensembles A .

- $A = [1/8, 7/8]$, l'intervalle comprenant tous les nombres réels entre $1/8$ et $7/8$.

Solution : Le joueur I possède une stratégie gagnante qui est : jouer '1' puis '0', puis n'importe quoi, car tout nombre de la forme $0,1?0???$... est compris entre $1/2$ et $1/2 + 1/4 + 1/8 = 7/8$.

- $A = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, un ensemble fini quelconque fixé de nombres réels.

Solution : Le joueur II a une stratégie gagnante. Elle consiste à se fixer un chiffre de r_1 de rang impair, et à jouer le complémentaire de ce chiffre lorsqu'il y arrive, ce qui «évite» au résultat final d'être r_1 (si r_1 possède deux développements, le joueur II «évite» d'abord le premier, puis le second). Le joueur II évite de même le nombre r_2 , puis le nombre r_3 , etc. Puisqu'il dispose d'un nombre infini de coups, le joueur II évite ainsi tous les éléments de A les uns après les autres, et il est certain de gagner. Remarquons que cette «méthode d'évitement» s'adapte à tout ensemble infini dénombrable A (un ensemble est infini dénombrable si tous ses éléments peuvent être numérotés par les nombres entiers).

- $A =$ les nombres dont le développement binaire ne comporte jamais trois '0' ou trois '1' consécutifs (jeu des pharaons de l'encadré 1).

Solution : Le joueur I gagne en jouant n'importe quoi au premier

coup, et ensuite toujours l'inverse de ce que vient de jouer le joueur II (ce qui assure que jamais trois chiffres consécutifs ne sont identiques, et donc que le nombre obtenu à l'infini est bien dans A).

Nous pourrions multiplier les exemples, et nous découvririons que, pour tout ensemble A pas trop compliqué, l'un des deux joueurs possède une stratégie gagnante. Lorsqu'il en est ainsi, on dit que le jeu est *déterminé* pour l'ensemble A , ou encore que l'ensemble A est *déterminé*.

Quelqu'un est-il sûr de gagner?

Les jeux infinis et leurs stratégies gagnantes furent examinés pour la première fois par les mathématiciens polonais S. Mazur et S. Banach dans les années 1930. Ces développements intéressent aujourd'hui les informaticiens, car, à partir de telles études, on modélise les interactions entre un système informatique et ses utilisateurs. Les informaticiens veulent s'assurer que le système informatique ne tombe jamais en panne et que le système répond aux demandes des utilisateurs en ce qui concerne l'accès aux ressources dont il a la charge (imprimante, modem, etc.). Le système informatique joue donc une sorte de partie infinie avec les utilisateurs qui, par maladresse ou malveillance, pourraient interrompre son fonctionnement. Par ailleurs, les utilisateurs ne doivent pas attendre indéfiniment les accès aux ressources qu'ils sollicitent.

Une stratégie gagnante pour le système assure ainsi qu'il n'y aura jamais de panne et que les utilisateurs seront correctement servis, alors qu'une stratégie gagnante pour les utilisateurs est la marque d'un point faible dans la sécurité. Les problèmes de jeux infinis sont concrets, et pourtant ils nous conduiront aux confins de la théorie des ensembles, en un lieu où les objets considérés sont si gros, si «infinis», que leur existence est indécidable!

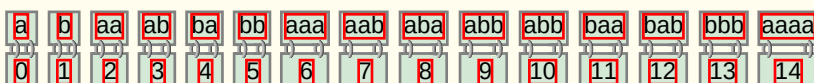
Le contenu d'un ensemble A étant défini, existe-t-il une stratégie gagnante pour l'un des joueurs? Autrement dit, tout ensemble A est-il déterminé? Si la réponse est non, quels sont les ensembles déterminés?

La profondeur et la difficulté de ces questions, pourtant de formulation simple, sont inattendues ; on ne sait pas y répondre complètement aujourd'hui.

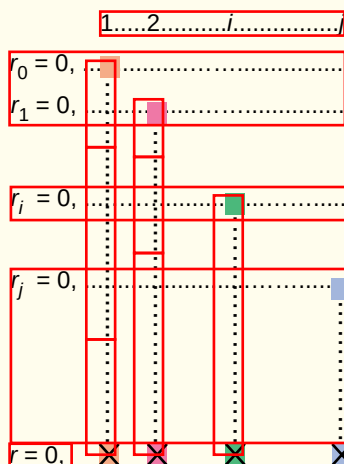
2. ENSEMBLE DÉNOMBRABLE, HYPOTHÈSE DU CONTINU

Un ensemble infini est dénombrable s'il peut être mis en correspondance, terme à terme, avec l'ensemble des entiers.

Ainsi l'ensemble N de tous les mots qu'on peut écrire avec les deux lettres "a" et "b" est dénombrable :



L'ensemble des nombres réels, noté R , en revanche, n'est pas dénombrable. On le démontre avec le raisonnement diagonal de Cantor :



Soit une liste de nombres réels $r_0, r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_j, \dots$ supposée complète. On définit un nombre réel r qui possède comme décimale numéro i un chiffre différent de la décimale numéro i de r_i . Le nombre réel ainsi construit n'est égal à aucun nombre de la liste $r_0, r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_j, \dots$. La liste n'est donc pas complète, et donc l'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable. On dit qu'un ensemble qui peut être mis en correspondance terme à terme avec l'ensemble des nombres réels a la puissance du continu.

L'hypothèse du continu est l'affirmation que tout sous-ensemble infini de R est dénombrable ou a la puissance du continu.

d'hui, car elles sont liées aux aspects les plus mystérieux de la théorie axiomatique des ensembles et, en particulier, aux axiomes de grands cardinaux et à l'hypothèse du continu.

Tout ensemble est-il déterminé?

Les premiers résultats, dus à D. Gale et F. Stewart, datent de 1953 : ces deux mathématiciens démontrèrent que tout ensemble ouvert (voir l'encadré 3) est déterminé. Les deux adversaires jouent comme précédemment, en ajoutant, chacun à leur tour soit 0, soit 1. Avec certains ouverts, comme l'intervalle A égal à $]0, 2/3[$ (tous les nombres entre 0 et $2/3$, à l'exception de 0 et $2/3$), c'est le joueur I qui dispose d'une stratégie gagnante ; pour d'autres, comme A égal à $]1/4, 3/4[$, c'est le joueur II qui est assuré de gagner.

D. Gale et F. Stewart démontrèrent aussi que nous ne devons pas croire que tout ensemble est déterminé : cela conduirait à une contradiction avec un axiome de base de la théorie des ensembles, l'axiome du choix. Cet axiome affirme une évidence : si vous avez une famille d'ensembles non vides, vous pouvez construire un nouvel ensemble en choisissant un élément dans chacun des ensembles de la famille. L'axiome du choix a donné lieu à de nombreux débats au début du siècle, mais les théoriciens des ensembles l'acceptent aujourd'hui.

On envisagea un moment d'adopter l'axiome de détermination complète qui affirme que «tout ensemble est déterminé» et de renoncer à l'axiome du choix. Par analogie avec le cas fini, il est naturel de soutenir que tout ensemble est déterminé, c'est-à-dire qu'il existe une stratégie gagnante pour tout ensemble A . En 1962, J. Mycielski et H. Steinhaus argumentaient de la façon suivante : «Supposons que les deux joueurs soient infiniment intelligents et qu'ils connaissent parfaitement bien l'ensemble A , alors le résultat du jeu ne peut pas dépendre du hasard, et donc l'un des deux doit disposer d'une stratégie gagnante.»

Entre deux énoncés naturels qui se contredisent, ici l'axiome de détermination complète et l'axiome du choix, nous pouvons retenir celui qui nous «arrange» le mieux, et donc l'axiome de détermination complète si nous y trouvons un intérêt.

Cette défense de l'axiome de détermination complète est aujourd'hui jugée peu convaincante, et les mathématiciens préfèrent garder l'axiome du choix, mieux ancré dans l'intuition.

Intéressons-nous aux sous-ensembles des nombres réels R et essayons d'identifier ceux qu'il est raisonnable de considérer déterminés. En simplifiant, les sous-ensembles de R sont classés en quatre catégories, les ouverts, les boréliens, les projectifs et les ensembles qui ne sont pas projectifs (voir l'encadré 3).

La généralisation de la preuve que «tous les ouverts sont déterminés» à «tous les boréliens sont déterminés» nécessita 20 ans de travail et aboutit en 1975 grâce à Donald Martin. L'étape suivante qui aurait été de montrer que tout ensemble projectif est déterminé, affirmation qui s'appelle la *détermination projective*, ne fut jamais franchie. La démonstration était impossible, comme on le comprit en montrant que les axiomes habituels de la théorie des ensembles, s'ils sont sans contradiction, ne démontreront jamais la détermination projective.

Ainsi, pour certains ensembles, on ne peut savoir si le jeu associé possède une stratégie gagnante. Ce résultat est étonnant, mais l'axiome de détermination projective est tellement tentant qu'on ne souhaitait pas l'abandonner, d'autant qu'il permet une théorie belle et efficace des sous-ensembles de R .

Avec l'axiome de détermination complète, certaines démonstrations sont plus directes et plus naturelles que d'autres démonstrations connues. Citons Donald Martin : «Bien que la détermination projective ne puisse être prouvée à partir des axiomes habituels de la théorie des ensembles, elle conduit à une théorie élégante et essentiellement complète des ensembles projectifs, et donc il n'est pas déraisonnable qu'elle soit vraie. Je considère que l'axiome de détermination projective a un statut analogue à une hypothèse en physique : les conséquences de la détermination projective sont si harmonieuses et riches qu'elles constituent une preuve quasi empirique de la détermination projective.» Il devenait donc naturel d'ajouter l'axiome de détermination projective aux autres axiomes de la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix, notée ZFC.

Remarquons l'étrangeté de la situation : les mathématiciens ne réussissant pas à prouver une propriété – ils savent même qu'elle n'est pas prouvable avec les outils habituels –, mais, constatant qu'elle a des conséquences agréables, ils proposent de la considérer vraie. Habituellement les mathématiciens ne proposent que des axiomes vrais *a priori* (évidents par eux-mêmes), ici c'est *a posteriori* (après étude de leurs conséquences) qu'ils jugent la détermination projective vraie et souhaitent la prendre comme axiome.

Une des conséquences agréables de l'insertion de ce nouvel axiome dans la théorie des ensembles est qu'il permet de traiter partiellement l'hypothèse du continu. Pour l'expliquer et montrer l'intérêt de cette recherche de nouveaux axiomes, nous devons donc revenir sur l'hypothèse du continu.

L'hypothèse du continu est-elle vraie?

L'hypothèse du continu – proposée par Cantor en 1878 et qui contribua à le rendre fou – affirme qu'il n'y a que deux sortes de sous-ensembles infinis de l'ensemble R des nombres réels : ceux qu'on peut mettre en correspondance terme à terme avec les entiers, et ceux qu'on peut mettre en correspondance terme à terme avec les nombres réels (voir l'encadré 2).

Kurt Gödel et Paul Cohen ont démontré que cette affirmation générale est indépendante des autres axiomes de la théorie des ensembles. K. Gödel montra qu'on n'introduit pas de contradiction en ajoutant l'hypothèse du continu aux axiomes de ZFC, et P. Cohen montra qu'on n'introduit pas de contradiction si on ajoute la négation de l'hypothèse du continu à ZFC. On sait aussi que l'hypothèse du continu n'a aucune conséquence en arithmétique : en conséquence, tout ce qui peut se démontrer sur les entiers avec l'hypothèse du continu se démontre aussi sans l'utiliser.

Il y a parfois un malentendu sur ce que l'on doit conclure des résultats de K. Gödel et de P. Cohen : certains interprètent cette indépendance de l'hypothèse du continu en disant que le mathématicien peut, selon ses goûts, ajouter, aux axiomes usuels des ensembles, l'hypothèse du continu ou sa négation. Cela n'est vrai que si, derrière les ensembles, on considère

qu'il n'y a aucune réalité et qu'en mathématiques tout n'est que manipulations symboliques dénuées de sens, ce qui est la position dite formaliste en philosophie des mathématiques (soutenue par P. Cohen, par exemple). Au contraire, si, comme K. Gödel, on pense qu'il y a véritablement un monde des ensembles et que notre but doit être, comme en physique, de comprendre sa réalité et d'en faire la théorie, alors le résultat d'indépendance de l'hypothèse du continu ne signifie pas qu'on a la liberté de choisir arbitrairement ce qui nous plaît le mieux, il signifie qu'il faut chercher à compléter les axiomes de la théorie des ensembles, jusqu'à ce qu'on puisse résoudre la question de l'hypothèse du continu. Pour K. Gödel, nous devons chercher à approfondir notre théorie en lui ajoutant de nouvelles lois, comme nous cherchons toujours de nouvelles lois en physique pour améliorer notre description du monde.

Le formaliste réagit généralement à la doctrine réaliste en demandant : «Mais sur quels critères peut-on juger qu'il est souhaitable d'ajouter tel axiome plutôt que sa négation, sachant que ni l'un ni l'autre ne donneront de contradictions, comme c'est le cas pour l'hypothèse du continu?» Le réaliste répond : «Il faut faire comme d'habitude! Nous devons choisir nos nouveaux axiomes sur leur évidence *a priori*, sur leur fécondité, et, pourquoi pas, sur la simplicité et l'harmonie du monde qu'ils font entrevoir».

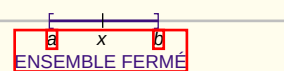
Concernant l'hypothèse du continu, on n'a malheureusement pas d'évidence *a priori* (ni pour ni contre), et les logiciens sont partagés sur ce qui est naturel et harmonieux à son sujet. Les critères *a priori* ne sont donc ici d'aucune aide, semble-t-il, et en tout cas n'entraînent pas l'unanimité.

Pour ce qui est de la fécondité, nous avons vu que l'axiome de détermination projective est très satisfaisant. Son évidence *a priori* laisse cependant à désirer. À la rigueur, on peut défendre l'idée que l'axiome de détermination complète («tous les sous-ensembles de R sont déterminés») est naturel en soi par analogie avec le cas fini, mais il n'y a rien de tel pour l'axiome de détermination projective. Les arguments en faveur de l'axiome de détermination projective sont donc *a posteriori*. Ce n'est pas suffisant pour convaincre un formaliste et n'est pas parfaitement satisfaisant pour un réaliste.

3. ENSEMBLES FERMÉS, OUVERTS, BORÉLIENS, PROJECTIFS

ENSEMBLES FERMÉS

L'intervalle fermé $[a, b]$ est l'ensemble de tous les points x qui vérifient $a < x < b$ (a et b sont dans $[a, b]$)



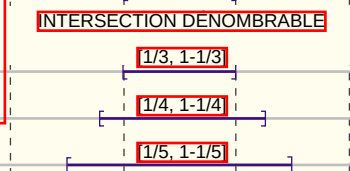
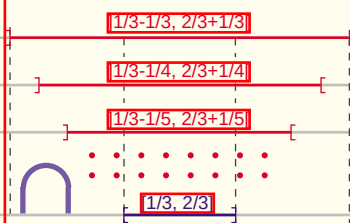
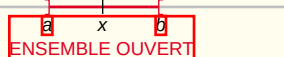
ENSEMBLES OUVERTS

L'intervalle ouvert $]a, b[$ est l'ensemble de tous les points x qui vérifient $a < x < b$ (a et b ne sont pas dans $]a, b[$).

Un ensemble ouvert est un ensemble dont aucun point n'est au bord.

L'intersection de la famille dénombrable d'intervalles ouverts $]1/3 - 1/n, 2/3 + 1/n[$ est l'intervalle fermé $[1/3, 2/3]$

La réunion de la famille dénombrable d'intervalles fermés $[1/n, 1 - 1/n]$ est l'intervalle ouvert $]0, 1[$



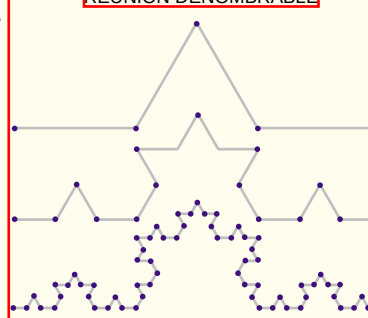
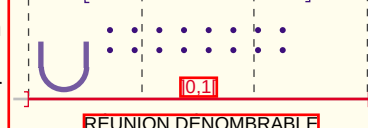
ENSEMBLES BORÉLIENS

Un sous-ensemble de R est dit borélien (du nom d'Émile Borel, mathématicien français, 1871-1956) si on peut l'obtenir à partir d'intervalles ouverts, en faisant une ou plusieurs fois (un nombre fini de fois) des opérations de réunion dénombrable ou d'intersection dénombrable.

Ainsi la réunion de tous les sommets de toutes les courbes de von Koch, à l'infini une fractale, est un ensemble borélien qui n'est ni ouvert, ni fermé.

Une grande majorité des sous-ensembles de R que l'on étudie en mathématiques élémentaires sont boréliens.

L'hypothèse du continu est vraie pour tous les boréliens : tout sous-ensemble borélien infini de R est dénombrable ou a la puissance du continu.



ENSEMBLES PROJECTIFS

F étant une fonction continue, la projection de l'ensemble A par la fonction F est l'ensemble des points $F(a)$, pour tous les points de l'ensemble A .

Un sous-ensemble de R est projectif si on peut le construire à partir d'un ensemble borélien par des passages au complémentaire et des projections par des applications continues. Il existe des sous-ensembles de R qui ne sont pas projectifs.



SOUS-ENSEMBLES DE R

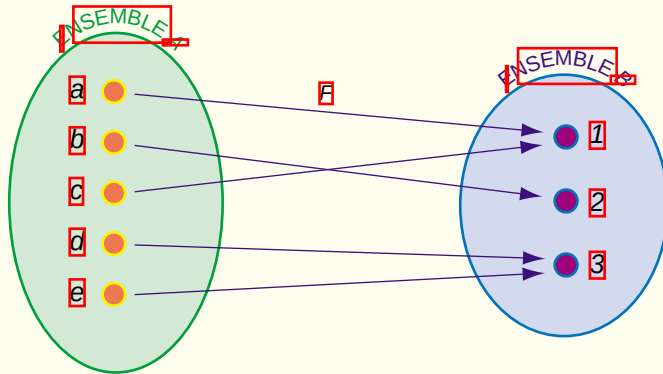
ENSEMBLES PROJECTIFS

ENSEMBLES BORÉLIENS

ENSEMBLES OUVERTS

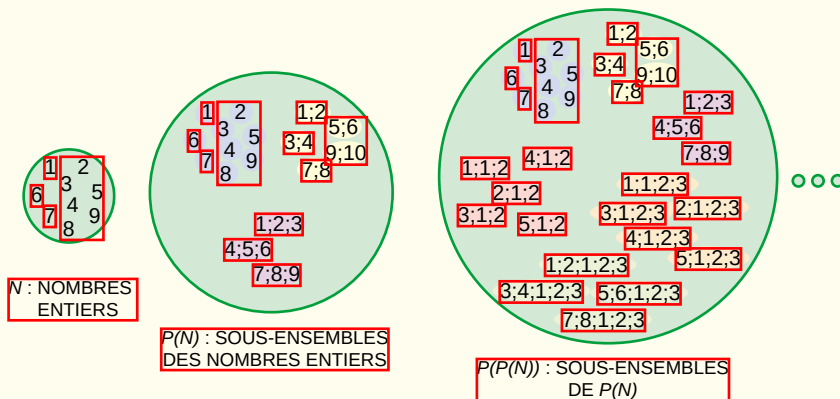
4. UN AXIOME DE GRANDS CARDINAUX

Une surjection de A vers B est une application F qui atteint tout point de B : pour tout élément b dans l'ensemble B , il existe un élément a de l'ensemble A tel que $F(a) = b$.



S'il existe une surjection de l'ensemble A vers l'ensemble B , on dit que A est plus gros que B . Si, de plus, il n'existe pas de surjection de B vers A , on dit que A est strictement plus gros que B .

Cantor a montré que l'ensemble $P(A)$ des parties d'un ensemble A est toujours strictement plus gros que l'ensemble A . Il en résulte qu'il existe une infinité d'ensembles de plus en plus gros, N , $P(N)$, $P(P(N))$, et, accessoirement, qu'il n'existe pas d'ensemble de tous les ensembles.



Voici un exemple d'axiome de grands cardinaux : il existe un ensemble non dénombrable A tel que, si A est strictement plus gros que B , alors A est aussi strictement plus gros que l'ensemble $P(B)$ des parties de B .

Un des grands succès de ces dernières années en logique a été la découverte par H. Woodin, D. Martin et J. Steel, de l'Université de Berkeley, d'un argument d'évidence *a priori* pour l'axiome de détermination projective. L'argument est indirect, mais il vaut la peine d'être compris : il nous amène aux grands cardinaux qui sont au centre des travaux en théorie des ensembles depuis une vingtaine d'années.

Un point semble être certain : si le monde des ensembles existe, il doit être aussi grand que possible. Il serait absurde de considérer que le monde des ensembles s'arrête à tel ou tel niveau, s'il est logiquement possible de le concevoir plus grand : le monde

des ensembles, par une sorte de principe de maximisation, doit être aussi grand que le permet la logique.

Il en résulte qu'à chaque fois qu'on trouve un axiome qui affirme qu'il y a de grands ensembles – de tels axiomes s'appellent les axiomes de grands cardinaux (voir l'encadré 4) – et que cet axiome n'introduit pas de contradiction, on doit l'adopter : tout axiome de grands cardinaux est valide *a priori*.

Une telle justification peut paraître étrange et risquée, mais elle ne l'est pas plus que celle qu'on utilise pour axiomatiser les entiers quand on déclare qu'après tout nombre entier il y en a un autre. Lorsqu'on recherche de nouveaux axiomes, on est réduit à ce genre

de considérations heuristiques, et celles concernant les grands ensembles me semblent parfaitement satisfaisantes (nous allons voir plus loin que les axiomes de grands cardinaux possèdent aussi une justification *a posteriori*).

Comme tout axiome de grands cardinaux est justifié *a priori*, tout ce qui résulte d'un axiome de grands cardinaux est aussi justifié *a priori*. La découverte par H. Woodin, D. Martin et J. Steel, il y a quelques années, que certains axiomes de grands cardinaux impliquaient l'axiome de détermination projective a comblé les espérances des théoriciens qui proposaient d'adopter l'axiome de détermination projective : non seulement nous avons des raisons *a posteriori* d'adopter l'axiome de détermination projective, mais nous avons aussi des raisons *a priori*. Le réaliste est satisfait, et une partie importante des chercheurs en théorie des ensembles considère aujourd'hui l'axiome de détermination projective comme un axiome sérieux qu'il faut accepter d'ajouter à la théorie classique ZFC.

A ce stade, le lecteur attend impatientement qu'on lui décrive un grand cardinal, ou mieux qu'on lui indique un moyen de le construire. Hélas, ce n'est pas possible : les ensembles que l'on construit "à partir du bas", avec des unions et des intersections d'ensembles d'entiers, d'ensembles de nombres réels ou d'ensembles de fonctions, ne donnent jamais un grand cardinal. Ce n'est pas une raison pour les rejeter, tout comme on ne rejette pas le nombre π parce que l'on ne sait pas en calculer l'ensemble des décimales. L'incidence des grands cardinaux sur la détermination projective montre bien que leur existence n'est pas sans effet sur les mathématiques ordinaires. De même que les très grands entiers, comme $10^{10^{10}}$, sont des abstractions impensables mais indispensables, les grands cardinaux sont eux aussi impensables et indispensables.

Le réalisme marque des points contre le formalisme

Un progrès plus diffus en théorie des ensembles doit être mentionné, progrès qui fournit une raison *a posteriori* d'adopter les axiomes de grands cardinaux.

Notons d'abord qu'il y a une limite évidente à l'acceptation des grands cardinaux que nous n'avons pas mentionnée pour l'instant : leurs

compatibilités mutuelles. En effet, si certains énoncés affirmant l'existence de grands ensembles se contredisent, alors il est impossible de les prendre tous, il faut choisir.

Cette idée que deux axiomes de grands cardinaux pourraient se contredire constitue même un critère permettant de départager la conception réaliste de la conception formaliste en philosophie des mathématiques : si des axiomes de grands cardinaux se contredisaient, c'est que les ensembles seraient des fictions (car alors défendre l'idée d'un unique réel, raison de tout, ne tient plus, et l'on retombe dans l'idée que les extensions acceptables de ZFC sont au libre choix du mathématicien) ; en revanche, si l'on n'en trouve pas, il devient raisonnable de croire qu'il y a quelque chose de réel derrière les formalismes.

Les recherches faites sur ces questions dans les 30 dernières années ont abouti à une situation remarquable et inespérée, qui vient renforcer la position des réalistes et fournit en même temps un argument *a posteriori* en faveur de tous les axiomes de grands cardinaux. Malgré des dizaines et des dizaines de théorèmes sur les relations qu'ils entretiennent, on n'a jamais trouvé d'axiomes de grands cardinaux qui soient incompatibles, et au contraire on s'est aperçu qu'ils se classent les uns par rapport aux autres comme si vraiment ils décrivaient une réalité hiérarchisée conforme aux espérances du réaliste. Pour A. Kanamori et M. Magidor, «cet aspect hiérarchique de la théorie des grands cardinaux est quelque peu mystérieux, mais est aussi un argument fort en faveur de l'adoption des axiomes de grands cardinaux et du fait qu'ils fournissent les extensions naturelles de ZFC».

Le monde ensembliste apparaît organisé, et il n'y a pas d'arbitraire dans les axiomes qu'on doit ajouter à ZFC pour en rendre compte : ils semblent dictés par des nécessités extérieures qu'on peut assimiler à un réel indépendant. La constatation empirique de cet ordre dans les grands ensembles conforte les arguments *a priori* pour les grands cardinaux.

Notons que nombre d'énoncés (avec une exception majeure, sur laquelle nous reviendrons), indépendants des axiomes habituels de la théorie des ensembles, se sont révélés équivalents à des axiomes de grands cardinaux : aussi tout ce qu'il semble

raisonnable d'accepter par des arguments *a posteriori* (comme pour l'axiome de détermination projective) résulte aussi d'hypothèses de grands cardinaux et est, ainsi, justifié *a priori*.

Pour H. Woodin : «La hiérarchie de grands cardinaux semble aussi intrinsèque et absolue que les nombres entiers eux-mêmes. C'est l'une des découvertes majeures en théorie des ensembles depuis 30 ans.»

L'hypothèse du continu, aujourd'hui et demain

Revenons un moment sur l'hypothèse du continu. Peut-on, comme pour l'axiome de détermination projective,

la régler complètement d'une façon qu'on pourrait considérer comme naturelle et, par exemple, montrer qu'elle (ou sa négation) résulte d'un axiome de grands cardinaux? Malheureusement non, car un résultat indique qu'on ne pourra pas traiter complètement de l'hypothèse du continu avec un axiome de grands cardinaux.

Le sentiment général est qu'avec l'axiome de détermination projective et la belle organisation découverte des axiomes de grands cardinaux, on a cependant progressé sur l'hypothèse du continu. En effet, l'axiome de détermination projective, si on le considère comme adjoint aux autres

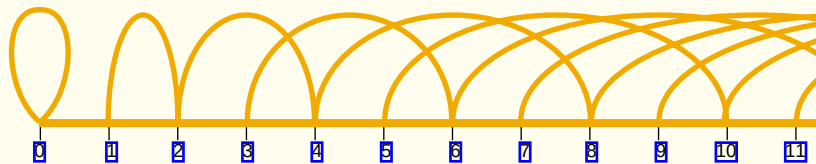
axiomes, permet de traiter mieux la question de savoir si tous les sous-ensembles de R sont dénombrables ou ont la puissance du continu (question posée par l'hypothèse du continu). On peut en effet, grâce à l'axiome de détermination projective, conclure que tout ensemble projectif est, soit dénombrable, soit a la puissance du continu. Cette incidence de l'axiome de détermination projective sur l'hypothèse du continu ne règle pas tout, mais crée la conviction qu'on a avancé et qu'on ira encore plus loin par ces méthodes.

On peut, d'une part, imaginer qu'en formulant des axiomes de grands cardinaux encore plus forts, on progressera toujours et encore, pour traiter «asymptotiquement» tous les cas possibles. On peut, d'autre part, tirer la leçon du travail sur l'axiome de détermination projective que, même dans le doute, il est intéressant d'explorer des axiomes non fondés *a priori* et que la méthode de la recherche d'axiomes par arguments *a posteriori* est féconde.

Peut-être qu'en avançant, nous pourrions formuler d'autres axiomes justifiés *a posteriori*, dont certains pourraient résoudre l'hypothèse du continu et aussi identifier plus précisément pour quels jeux infinis il existe des stratégies gagnantes. Pour H. Woodin, «il est devenu raisonnable d'espérer que notre compréhension progresse jusqu'au point où la solution de l'hypothèse du continu sera possible».

5. LES AXIOMES DE GRANDS CARDINAUX SONT AFFAIRE DE FOI

Un ensemble infini est un ensemble tel qu'il existe une injection (une application vérifiant que deux points différents ont toujours deux images différentes) de l'ensemble dans une partie de lui-même. L'application $n \rightarrow 2n$ est une telle injection de l'ensemble des entiers dans une partie de lui-même (les entiers pairs) différente de lui-même.



Un ensemble E , tel qu'il existe une injection de E dans lui-même, est très grand. Cette idée d'injection est féconde. En imposant aux injections de vérifier des propriétés de plus en plus nombreuses, on définit des infinis de plus en plus sévères, c'est-à-dire des ensembles de plus en plus grands. C'est l'une des méthodes pour définir des axiomes de grands cardinaux.

Les axiomes de grands cardinaux sont considérés comme naturels, car si le monde des ensembles existe, alors il doit contenir le plus possible d'ensembles, et donc tous les grands ensembles y sont les bienvenus.

Cependant ces axiomes, dans la majorité des cas, font partie des indécidables de Gödel de la théorie des ensembles : avec les axiomes habituels, on ne peut prouver ni qu'ils

sont vrais, ni qu'ils sont faux. Il faut donc les accepter tels quels, sans que l'on puisse espérer les démontrer à partir des autres. C'est une affaire de foi. *

Les axiomes des grands cardinaux sont utiles en arithmétique, car ils ont pour conséquence *

la non-contradiction de la théorie des ensembles. Ils sont aussi utiles pour nourrir l'intuition du mathématicien, et pour classer les indécidables.

Toutefois, la notion de vérité mathématique y vacille au contact d'infinis dépassant l'imagination.



Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et techniques de Lille et directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

J. BARWISE ed. *Handbook of Mathematical Logic*, North Holland, Amsterdam, 1977.

P. MADDY, *Realism in Mathematics*, Clarendon Press, Oxford, 1990.

A. KANAMORI, *The Higher Infinite*, Springer-Verlag, New York, 1994.

H. WOODIN, *Large Cardinal Axioms and Independence : The Continuum Problem Revisited*, in *Mathematical Intelligencer*, vol. 16, n° 3, pp. 31-35, 1994.

P. DEHORNOY, *Un rôle nouveau pour la théorie des ensembles?*, Département de mathématiques, Université de Caen, mars 1995.

Piero della Francesca, peintre mathématicien

ENRICO GAMBA - VICO MONTEBELLI

Ce grand peintre était aussi l'un des plus grands mathématiciens de son époque. Il a adapté les mathématiques savantes aux besoins des techniciens.

Les tableaux de Piero della Francesca (1415-1492) sont aujourd'hui connus dans le monde entier ; ses travaux sur la perspective sont plus confidentiels et son œuvre mathématique est complètement ignorée. Piero della Francesca était pourtant un mathématicien réputé en son temps : selon Giorgio Vasari, qui publia en 1550 *Les vies des meilleurs peintres, sculpteurs et architectes*, Piero «ne s'éloigna jamais des mathématiques», discipline où il était «tenu pour un grand maître», à tel point qu'il «comprit [Euclide] mieux que quiconque».

Cette double qualité, de peintre et d'homme de science, évoque immédiatement Léonard de Vinci, plus jeune que Piero della Francesca d'une quarantaine d'années. Toutefois, selon Vasari, tandis que Léonard passait sans cesse des fresques aux miroirs et des machines à l'anatomie, Piero était rationnel et systématique. C'était le «meilleur géomètre de son époque».

Les dessins techniques et les écrits de Léonard, abondants et variés, sont désordonnés, comme des notes d'atelier ou de chantier ; ils n'étaient pas publiables tels quels. En revanche, Piero a écrit trois traités, de quelques centaines de pages au total : *Libellus de quinque corporibus regularibus* (*Petit livre à propos des cinq corps réguliers*), *De prospectiva pingendi* (*La perspective pour la peinture*) et *Trattato d'abaco* (*Traité de l'abaque*). Ces traités, qui contiennent des parties appliquées et des parties théoriques, sont compacts et ordonnés, surtout en comparaison avec les livres des techniciens de l'époque, dont Piero était.

Au Moyen Âge et à la Renaissance, les marchands, les artisans, les artistes et, de manière générale, les techniciens

étaient formés dans les écoles d'abaque et dans les ateliers. Le terme abaque ne désigne pas l'ancien instrument de calcul, mais la discipline, voire le texte écrit et l'école elle-même. Les écoles d'abaque sont comparables aux instituts professionnels actuels : on apprendait en regardant faire et en faisant. Les apprentis exerçaient leur sens de l'observation et leur raisonnement sur des cas concrets, spécifiques de la profession qu'ils apprenaient. Tout savoir théorique indépendant d'une réalisation concrète était exclu ; les rares manuels ne contenaient aucune trace de théorie. Nous les considérerions aujourd'hui comme des carnets de notes : aide-mémoire pour ceux qui savaient déjà, ils étaient quasi incompréhensibles pour tous les autres. Ils étaient écrits en langue vulgaire, langue des techniciens, tandis que les savants utilisaient le latin ; les théories théologiques, philosophiques, juridiques, médicales, mathématiques, mécaniques ou astrologico-astronomiques étaient toujours formulées en latin, langue plus précise, adaptée au cadre doctrinal.

L'étude des polyèdres réguliers

Les ouvrages mathématiques de Piero sont plus proches des canons théoriques euclidiens que des normes des techniciens. Le traité qui concerne le plus la géométrie formelle est le *Libellus de quinque corporibus regularibus*, dont la portée dépasse largement ce qu'annonce son titre. Après un chapitre de géométrie plane, les deux chapitres centraux s'intéressent aux cinq polyèdres réguliers, c'est-à-dire dont les faces sont des polygones réguliers

tous identiques : le tétraèdre (dont les faces sont des triangles équilatéraux), le cube (composé de six carrés), l'octaèdre (composé de huit triangles équilatéraux), le dodécaèdre (dont les 12 faces sont des pentagones réguliers) et l'icosaèdre (dont les 20 faces sont des triangles équilatéraux). Ils sont prolongés par un chapitre consacré à cinq polyèdres semi-réguliers, ainsi qu'à d'autres corps solides.

Le *Libellus* est une œuvre singulière : comparé aux livres d'abaque, désordonnés et traitant peu de géométrie, son contenu fondamentalement géométrique est remarquable. C'est le premier ouvrage européen entièrement consacré à l'étude des polyèdres, qui avait pourtant commencé avec Platon et Pythagore. Piero della Francesca lui donne un nouveau souffle : grâce au *Libellus*, les polyèdres, longtemps considérés comme des objets purement théoriques, redeviennent des sujets d'étude mathématique, des éléments ornementaux, des objets de dessin exemplaires.

L'originalité du *Libellus* provient aussi du lien qu'il établit entre la géométrie euclidienne et les mathématiques de l'abaque, c'est-à-dire entre les mathématiques des savants et celles des techniciens. Piero est conscient d'être parmi les premiers à s'y essayer : dans sa dédicace à Guidobaldo de Montefeltre, le seigneur d'Urdino où il vivait, il affirme que la nouveauté de son travail réside dans la transposition des «choses d'Euclide et des géomètres vers les arithméticiens».

Le *Libellus* suit la tradition de l'abaque : ses 140 propositions traitent toujours de figures géométriques aux dimensions déterminées. On donne des mesures de grandeurs et l'on

demande de trouver la valeur numérique d'autres grandeurs inconnues. En outre, le *Libellus* ne contient pas de démonstrations, du moins selon les modalités classiques. Enfin, il s'inscrit aussi dans la tradition de l'abaque, parce que, dans le calcul des grandeurs géométriques, il utilise autant des procédures géométriques que des règles arithmétiques et algébriques.

D'un autre côté, le *Libellus* s'inscrit dans la tradition euclidienne par l'ordre logique des propositions et par des références aux *Éléments* d'Euclide et aux œuvres d'Archimède *De la sphère et du cylindre* et *Des conoïdes et des sphéroïdes*. Les théorèmes n'y sont pas dégradés en petites règles empiriques appliquées, usage courant chez les techniciens, qui préféraient une règle simple et approximative à une règle exacte, mais complexe : ils sont utilisés de façon coordonnée.

Mélanger théorie et application

Ce mélange de mathématique «haute» et «basse» devait apparaître à Piero comme un tout homogène ou, du moins, lié. Il fait siens avec maestria les théorèmes du livre XIII des *Éléments*, qui établissent les relations entre les longueurs des arêtes des polyèdres et le diamètre de la sphère circonscrite. Il écrit que l'arête du tétraèdre est la moyenne géométrique (la racine carrée du produit) de la hauteur du tétraèdre et du diamètre de la sphère circonscrite, ou que l'arête du dodécaèdre est la section d'or de l'arête du cube inscrit dans la même sphère (la section d'or d'un segment AB est réalisée en un point M du segment AB tel que le rapport des longueurs AB à AM soit égal au rapport des longueurs AM à MB). En même temps, il dresse le tableau des valeurs numériques des arêtes des cinq polyèdres réguliers (tétraèdre, cube, octaèdre, dodécaèdre, icosaèdre) inscrits dans une sphère de diamètre 12. Ce qui nous semble un cas particulier satisfaisait pleinement le milieu de l'abaque, car 12 est multiple de 2, 3, 4 et 6 : si le diamètre de la sphère était triple ou de moitié, il suffisait respectivement de multiplier par trois ou de diviser par deux la valeur de l'arête.

Toutefois, même s'il utilise le style de l'abaque, Piero s'inspire d'Euclide. Celui-ci conclut les *Éléments* avec un théorème qui relie les arêtes des poly-

èdres inscrits dans une même sphère ; Piero conclut de la même manière le second chapitre du *Libellus*, mais avec des valeurs numériques, avec les mesures des arêtes des polyèdres inscrits dans la sphère de diamètre 12.

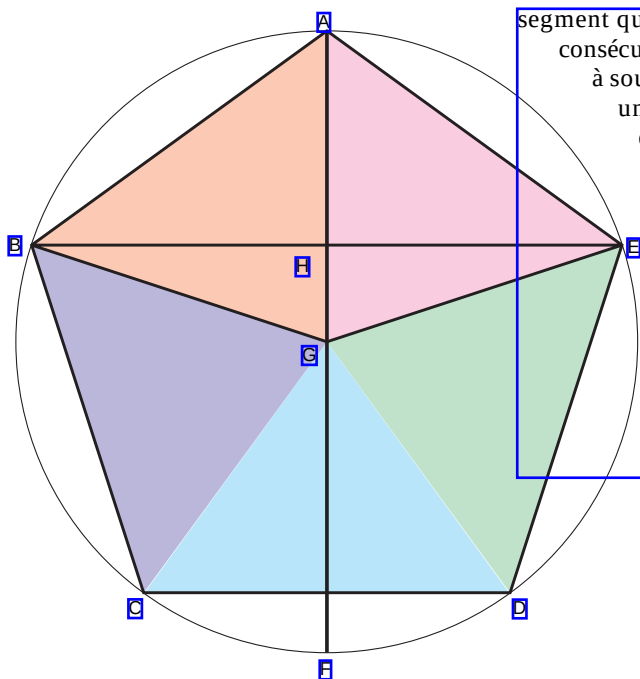
La donnée de valeurs numériques simples était nécessaire pour les techniciens, qui, peu familiers avec l'écriture et soucieux de préserver les secrets de leur profession, faisaient confiance à leur mémoire. Pour les commerçants, le calcul mental rapide était vital : dans une négociation, il faut évaluer rapidement les bénéfices des deux parties. La mémorisation de règles synthétiques, comme des proverbes, et de paramètres numériques était la méthode la plus sûre, la plus écono-

mique et la plus rapide. En conséquence, la règle de trois était fréquemment utilisée en géométrie (ce qui n'est pas le cas aujourd'hui).

La règle de trois a peut-être aussi donné à Piero l'idée de son calcul de l'aire du pentagone régulier. Dans le livre XIV des *Éléments* (qui n'est pas d'Euclide, mais d'Hypsicle, et qui était connu du temps de Piero comme le livre XV), on trouve la formule suivante : l'aire est égale au produit des $3/4$ du diamètre du cercle circonscrit par les $5/6$ de la corde du pentagone. Piero propose une formule plus simple (voir la figure 2) : l'aire d'un pentagone régulier est déterminée par les $5/8$ du produit du diamètre du cercle circonscrit par la longueur de la corde du pentagone (le



1. PORTRAIT DE PIERO DELLA FRANCESCA attribué à Santi di Tito, probablement réalisé à la fin du XVI^e siècle. L'auteur du portrait a davantage rendu hommage au mathématicien qu'à l'artiste : les œuvres d'Euclide et d'Archimède posées sur la table sont éloquentes.



segment qui joint deux sommets consécutifs). L'invention prête à sourire : pour nous, c'est une banale simplification de fractions. Toutefois Piero envisageait probablement la chose différemment : il devait démontrer la nouvelle formule, et la simplification ne prouvait pas son résultat, elle le confirmait tout au plus.

2. DEMONSTRATION, dans le style de l'abaque, de la formule servant à calculer l'aire du pentagone. Le produit $AG \times BE$ est la surface de quatre des cinq triangles isocèles de sommet G qui constituent le pentagone (l'aire d'un triangle est la moitié du produit de sa base par sa hauteur). Par quelle fraction x du rayon faut-il multiplier la corde BE du pentagone pour obtenir la surface de cinq triangles? x est la solution de l'équation : $(AG \times BE)/4 = (x \times BE)/5$. On obtient donc $x = (5/4) AG = (5/8) AF$. La surface du pentagone s'obtient en multipliant $5/8$ du diamètre par le segment BE , formule dont Piero s'attribue l'invention. L'utilisation géométrique de la règle de trois est assez insolite.



3. LES CINQ POLYEDRES REGULIERS, dits aussi «solides» ou «corps platoniciens», sont des figures de l'espace à trois dimensions que l'on construit avec des faces polygonales identiques entre elles et elles-mêmes régulières. Ils sont représentés ici par Kepler dans son traité *Harmonice Mundi* (1619). Platon les associait aux cinq éléments de sa «physique». Le tétraèdre (associé au feu par Platon) a 4 faces en forme de triangles équilatéraux identiques (au centre) ; le cube, ou hexaèdre (associé à la terre) a 6 faces en forme de carrés (en bas, à gauche) ; l'octaèdre formé de deux «pyramides d'Égypte» accolées par leurs bases carrées (associé à l'air) a 8 faces triangulaires équilatérales (en haut, à gauche) ; le dodécaèdre (associé à l'éther du monde supralunaire) a 12 faces pentagonales (en haut, à droite) ; enfin l'icosaèdre (associé à l'eau) comporte 20 faces triangulaires équilatérales (en bas, à droite).

Les démonstrations utilisées dans toutes les branches des mathématiques étaient du type de celles qu'utilisent les géomètres. Dès 1202, Léonard de Pise établit les formules de résolution des équations du second degré avec des démonstrations géométriques, en se fondant sur des propositions énoncées géométriquement dans les *Éléments*. Piero, lui, élabore une démonstration de la formule qui donne l'aire du pentagone, en utilisant la règle de trois d'une manière nouvelle par rapport à la traduction euclidienne (voir la figure 2).

Nous avons signalé la supériorité évidente du *Libellus* par rapport aux manuels de l'époque : on peut en dire autant du traité de perspective *De prospectiva pingendi*. Piero y adopte un discours résolument déductif et s'élève contre les énumé-

rations et les comptes rendus plus ou moins ordonnés auxquels parvenaient les meilleurs techniciens contemporains.

En ce qui concerne la géométrie savante, Piero montre une parfaite compréhension de l'œuvre euclidienne, envisagée toutefois du point de vue de l'abaque. La liberté qui en découle ouvre des voies nouvelles ou rarement empruntées : dans le *Libellus*, il reprend le thème des inclusions réciproques de polyèdres réguliers, développé dans le livre XV des *Éléments*, en y ajoutant une nouvelle inclusion, celle de l'icosaèdre dans le cube (voir la figure 6).

Si Piero transpose Euclide dans le domaine de l'abaque, il utilise aussi ses talents artistiques en géométrie. L'inclusion de l'icosaèdre dans le cube est «vue» et «tracée», avant d'être démontrée, à partir de propriétés géométriques. Piero dessine une perspective à lignes de fuite parallèles plutôt qu'une perspective à lignes de fuite convergentes, selon le procédé inventé par Brunelleschi et Alberti, et théorisé par Piero dans son propre traité de perspective, parce que le raisonnement géométrique est ainsi plus clair : c'est une innovation remarquable. Piero est l'un des fondateurs du dessin technique et géométrique moderne : si l'on compare ses dessins avec les figures géométriques qui illustrent les éditions d'Euclide de l'époque, on constate des différences abyssales. Son œuvre, comme celles d'autres auteurs, reflète la demande d'un nombre croissant de techniciens qui souhaitaient disposer de constructions graphiques non équivoques et fiables.

Un polyèdre à 72 faces

Piero della Francesca prolonge aussi les recherches d'autres mathématiciens savants. Il souligne, dans l'une des rares notes qu'il ajoute à ses traités, qu'il va plus loin que Giovanni Camparo da Novara, mathématicien du XIII^e siècle dont la traduction, de l'arabe en latin des *Éléments* d'Euclide, était très lue à l'époque. Le problème concerne un solide à 72 faces, qui est un bon modèle à facettes de la sphère, dont Piero calcule la surface et le volume. La surface est la somme des surfaces de 24 triangles isocèles et de 48 trapèzes isocèles ; le volume est la somme des volumes des 24 pyramides à base triangulaire et des 48 pyramides à base trapézoïdale dont le sommet est le centre de la sphère circonscrite.

Voûte en arc de cloître et voûte d'arête

Pour Piero della Francesca, la voûte en arc de cloître et la voûte d'arête sont des surfaces délimitées par l'intersection à angle droit de deux demi-cylindres de même rayon (a). La voûte en arc de cloître est la surface intérieure (b) et la voûte d'arête est la surface extérieure (c).

Piero calcule le volume contenu sous la voûte en arc de cloître. Notons V_p le volume de la pyramide (d) de base $ABCD$ et de sommet F , V le volume du solide «sphéroïde» compris à l'intérieur de l'intersection des deux cylindres (ce volume est le double du volume recherché puisqu'en pratique la voûte est construite à partir de demi-cylindres), V_c le volume du cône de sommet F et dont la base est le cercle inscrit dans le carré $ABCD$ (e) et V_s le volume de la sphère de rayon OF . La proportion établie par Piero s'écrit : $V_p/V = V_c/V_s$. Cela revient à considérer que le cône est à la sphère ce que la pyramide est au sphéroïde engendré par la rotation autour de l'axe OF

d'un «cercle déformable» qui s'appuie sur un «équateur» carré $ABCD$: Piero pense qu'il existe une analogie entre les solides qui s'appuient sur un même cercle (la sphère et le cône) et les solides de même hauteur qui s'appuient sur le carré $ABCD$. Cette idée lui est venue d'une relation qu'il a démontrée dans le plan. Si A_1 est l'aire d'un triangle FMN (g), A_2 l'aire du cercle de diamètre

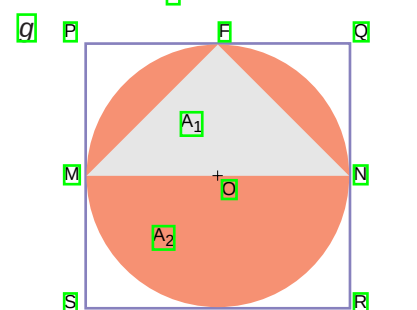
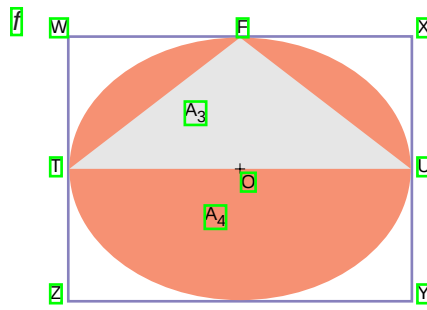
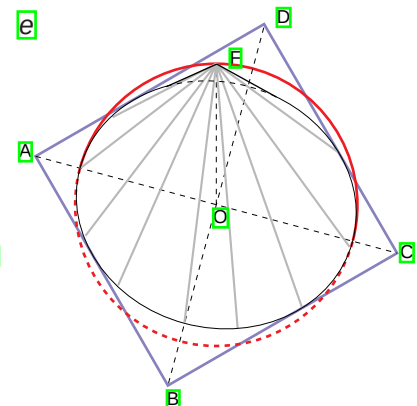
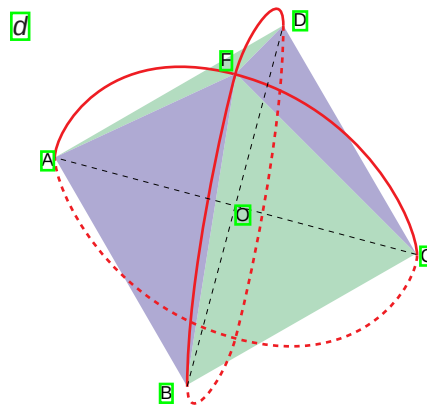
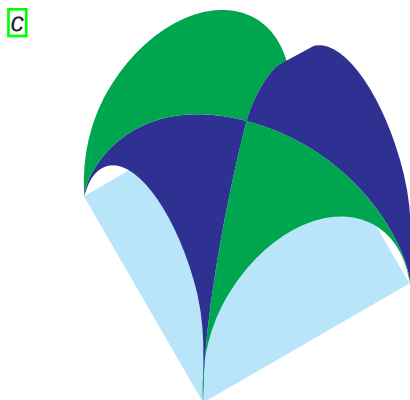
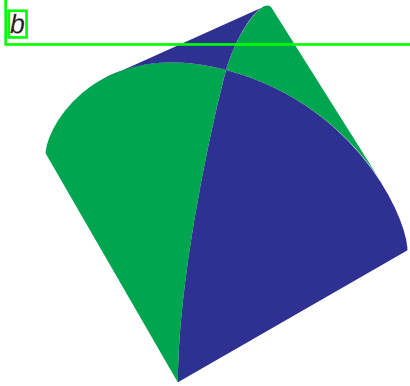
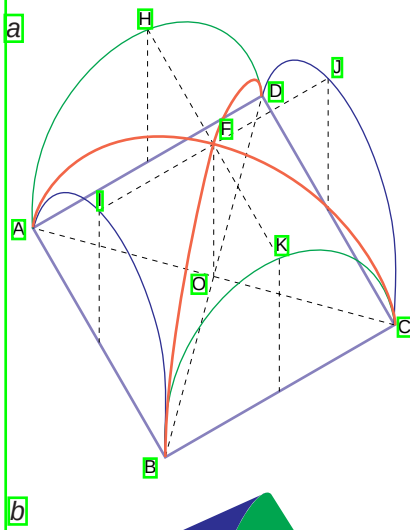
MN , A_3 l'aire d'un triangle FTU (f) et A_4 celle de l'ellipse, alors $A_1/A_2 = A_3/A_4$. Cette égalité signifie que le rapport de l'aire de l'ellipse à celle du rectangle $WXYZ$ est égal au rapport de l'aire du cercle à celle du carré $PQRS$. Le passage du plan au volume est fondé sur le fait que l'intersection d'un cylindre et d'un plan non orthogonal à son axe est une ellipse.

Piero calcule le volume V du sphéroïde en remarquant que le rapport de l'aire du carré $ABCD$ à celle du cercle inscrit est $4/\pi$, ce qui lui donne le rapport du volume de la pyramide à celui du cône : $V_p/V_c = 4/\pi$. Il ne lui reste qu'à multiplier le volume de la sphère par ce rapport $V = (4/\pi) \times (4\pi r^3/3) = 16r^3/3$ (où r est le rayon des cylindres). Le volume situé sous la voûte en arc de cloître est donc $8r^3/3$.

La voûte d'arête est formée par la surface des deux demi-cylindres extérieure à l'intersection. La surface de cette voûte est obtenue en ôtant la surface de la voûte en arc de cloître de la surface des deux demi-cylindres réunis. Piero soustrait de la surface des deux demi-cylindres, qui vont du demi-cercle AHD au demi-cercle BKC et du demi-cercle AIB au demi-cercle CJD , la surface des «fuseaux» AFB , BFC , CFD et DFA qui forment la voûte en arc de cloître, pour trouver la surface des quatre «onglets» $AIBFA$, $BKCFB$, $CJDFC$ et $DHAFD$ qui constituent la voûte d'arête (a).

Notons V_{AC} le volume sous la voûte en arc de cloître et S_{AC} sa surface, V_s et S_s le volume et la surface de la sphère de centre O et de rayon OF . La relation établie par Piero est $V_{AC}/S_{AC} = V_s/S_s$. Il en découle que $V_{AC}/S_{AC} = (4\pi r^3/3)/4r^2 = r/3$, et donc $S_{AC} = 3V_{AC}/r$. Puisque $V_{AC} = 8r^3/3$, $S_{AC} = 8r^2$. La surface latérale d'un demi-cylindre comprise entre les demi-cercles AHD et BKC est $2\pi r^2$. En effectuant la différence $4\pi r^2 - S_{AC}$, on obtient la surface de la voûte d'arête qui est donc donnée par la formule : $S = 4r^2(\pi - 2)$.

Cette formule est exacte : on la vérifie par le calcul intégral. La méthode utilisée par Piero n'est pas la version mathématique de manipulations empiriques : elle est intuitive, mais elle est plus scientifique que technique.



Piero trouve la hauteur de ces pyramides selon les strictes modalités euclidiennes.

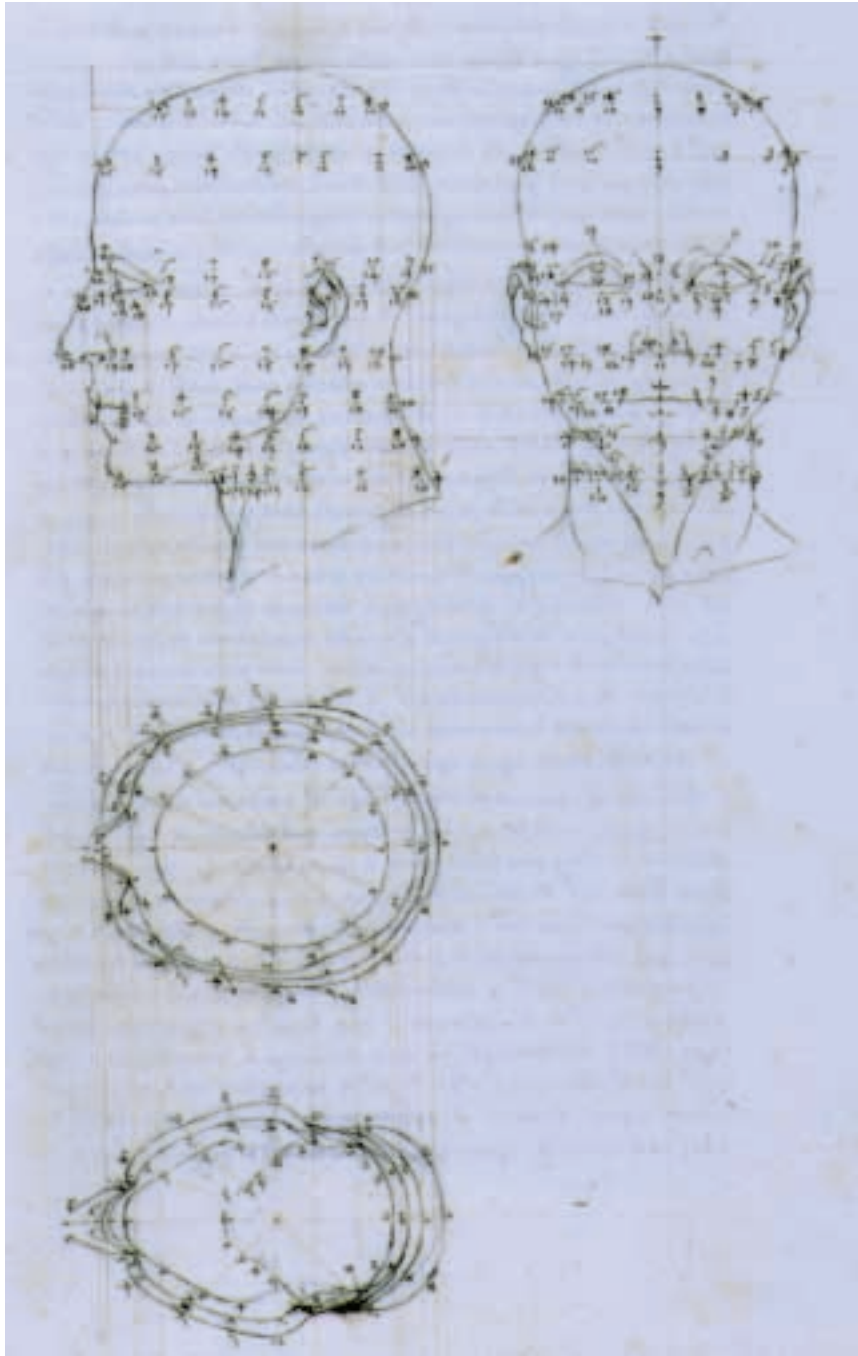
Ce problème du polyèdre à 72 faces a un intérêt architectural : il se présente lors de la construction des coupoles, et des polyèdres analogues étaient utilisés pour la construction de globes géographiques et astronomiques. La solution de Piero est générale : elle serait valable

même si le solide, au lieu d'être construit à partir de dodécagones, était construit sur la base d'autres polygones réguliers.

À l'époque, une évolution décisive apparaît : les nouvelles découvertes techniques incitent les ingénieurs à dépasser l'empirisme et à utiliser des procédures mathématiques rigoureuses. Piero résout, dans cet esprit, deux autres problèmes originaux : le calcul du

volume sous la voûte en arc de cloître (ou voûte d'angle) et celui de la surface de la voûte d'arête (voir l'encadré de la page 71). L'œil du mathématicien contemple les réalisations techniques et trouve de nouvelles voies de recherche.

Euclide n'étant pas d'une grande utilité pour résoudre ce problème, Piero utilise de téméraires analogies avec les procédures d'Archimède. Étonnamment, il obtient des résultats exacts, qui prouvent son intuition mathématique. De la manière laconique qu'il affectionne, il fait comprendre qu'il a obtenu un résultat important. Après avoir effectué ses calculs sans indiquer les procédures adoptées (les écrits de l'abaque exposent les résultats sans les expliquer), Piero transgresse les habitudes et se lance dans l'explication de la voie qu'il a empruntée. Cette explication n'est pas un modèle de clarté, mais on ne peut guère en attendre plus d'un auteur du XV^e siècle. Piero della Francesca est l'un des rares auteurs qui ait relié avec agilité le «grand système» des mathématiques d'Euclide et d'Archimède au «petit système» des mathématiques de l'abaque. Ce lien a pris de plus en plus d'importance au long du XVI^e siècle.



4. CETTE TÊTE, représentée de face, de profil, par-dessus et par-dessous suivant des projections orthogonales, est extraite de *De prospectiva pingendi*, de Piero della Francesca. La représentation est tracée par points, déterminés par l'intersection des lignes et repérée par des nombres. Piero veut ainsi montrer que la peinture n'est pas d'abord une œuvre manuelle : avant la réalité sensible, existent la perfection géométrique, les lois de l'harmonie et des proportions. Il n'y a donc pas de dissension entre la science et l'art.

Enseignement pratique et algèbre

L'enseignement des écoles d'abaque se fondait sur le calcul appliqué. Les professeurs fournissaient à leurs élèves des séries de problèmes typiques de leur profession : achat et vente, change, associations, capitalisation, mesures. Cette façon de procéder, en accordant plus d'importance aux valeurs numériques, est la caractéristique la plus originale par rapport à la tradition euclidienne : elle favorise l'intérêt pour l'algèbre, efficace pour résoudre des problèmes, même géométriques. Outre l'introduction des chiffres arabes, le grand mérite historique des professeurs d'abaque est d'avoir, pendant le Moyen Âge, diffusé et développé la connaissance de l'algèbre en Europe.

Dans l'histoire de l'algèbre, Piero della Francesca arrive juste avant le progrès fondamental qu'est la résolution des équations du troisième degré, et dans la phase de transition d'une algèbre rhétorique, exposée de manière discursive, à une algèbre qui utilise des abréviations et des symboles. Le texte où Piero a rassemblé ses recherches algébriques n'avait pas

de titre : il a été nommé, *a posteriori*, *Trattato d'abaco*. C'est un texte singulier par rapport aux ouvrages d'abaque habituels, tant en raison de l'extension de la partie traitant de géométrie (147 problèmes sur 492) que de l'ampleur et de la profondeur de la partie concernant l'algèbre. Cette dernière mériterait presque que l'on attribue au traité le sous-titre de « Livre d'algèbre » : 45 pour cent des problèmes sont résolus grâce à l'algèbre.

Ce traité n'est pas seulement algébrique parce qu'il contient beaucoup d'algèbre (de nombreux problèmes avaient déjà été résolus par voie arithmétique ou algébrique, selon les préférences ou les connaissances des auteurs), mais, surtout, parce qu'il améliore l'algèbre de son temps. Piero classe et résout 61 types d'équations du premier au sixième degré, dont 13 sont toutefois des variantes. Ce grand nombre de types d'équations s'imposait pour les praticiens de l'abaque : face à une question particulière, l'habileté consistait à rechercher, parmi les nombreux exemples étudiés et mémorisés, celui qui s'en rapprochait le plus. De surcroît, les mathématiciens de l'époque travaillaient avec des équations à coef-

ficients positifs : l'algèbre se fondait sur la géométrie, et c'est dans le cadre des longueurs, des surfaces et des volumes qu'étaient interprétés les équations et les coefficients des inconnues. Pour résoudre l'équation $x^2 = 4x$, on cherchait le côté d'un carré dont l'aire était égale à quatre fois ce côté. Aussi ne prenait-on pas en compte les solutions nulles ou négatives, sauf dans des cas très rares.

Pour les équations de degré supérieur à deux, Piero considère des équations rationnelles ou irrationnelles (c'est-à-dire faisant intervenir des racines de l'inconnue) dont le degré pouvait être réduit. Il ne s'agissait pas d'une nouveauté, pas plus que la résolution des équations que l'on nomme aujourd'hui binomiales et biquadratiques (qui ne contiennent que des termes de degré pair). Piero se trompe parfois, mais il obtient quelques résultats intéressants lorsqu'il quitte le contexte traditionnel pour s'aventurer vers d'autres types d'équations telles que $ax^3 = bx + c$, $ax^3 = bx^2 + c$ et $ax^3 = bx^2 + cx + d$. De manière surprenante, Piero les résout comme si elles étaient du second degré, en confondant les termes du second et du troisième degré. Dans la dernière équation, il considère $(cx + d)$ comme un terme

connu et se ramène au cas précédent, conformément à une tradition utile. Malheureusement, toutes les analogies ne fonctionnent pas comme on le souhaiterait.

Des erreurs flagrantes

On peut s'étonner que Piero ait commis des erreurs aussi banales et qu'il n'ait même pas vérifié le résultat obtenu, comme le faisaient les praticiens de l'abaque. C'est d'autant plus étonnant que, dans le *Libellus*, il effectue correctement des calculs compliqués avec des nombres de plus de dix chiffres et que les 140 problèmes qui composent le livre sont correctement posés.

Ce fait confirmerait le caractère expérimental du *Trattato d'abaco*. Piero révèle les domaines qu'il explorait, soit à tâtons, soit avec quelques hypothèses de travail, violant ainsi un critère de l'écriture des traités, selon lequel on ne mettait par écrit que les résultats vérifiés et largement approuvés. On peut supposer, plus prosaïquement, que Piero a copié ces problèmes sans les vérifier, selon une habitude répandue chez les compilateurs de livres d'abaque. Ce soupçon est fondé : dans deux livres d'abaque du XIV^e siècle, on



5. PIERO DELLA FRANCESCA, après avoir traité des cinq polyèdres réguliers (aux faces identiques) et de leurs inclusions réciproques, s'occupe des cinq polyèdres semi-réguliers qu'il obtient en tronquant les premiers. Les polyèdres semi-réguliers ont des arêtes égales et des faces différentes. Le tétraèdre tronqué (à gauche), formé de quatre hexagones et de quatre triangles équilatéraux, est obtenu par division de chaque arête du tétraèdre en trois parties égales ; on fait passer le plan de troncature par les trois points de tripartition les plus proches de chacun des sommets ; on élimine enfin les quatre pointes du tétraèdre ainsi obtenues, qui sont aussi des tétraèdres. Si le même système est appliqué à l'icosaèdre (au milieu),

on obtient autant de pentagones que de sommets de l'icosaèdre (12) et autant d'hexagones que de faces (20), car cinq faces triangulaires conviennent à chaque angle. Il s'agit de l'icosaèdre tronqué, dont la forme est utilisée pour les ballons de football. Piero calcule la surface et le volume de ces polyèdres. Un solide à 72 faces (à droite) repris des dessins de Léonard de Vinci et construit à partir du dodécaèdre de Piero, qui affirme être le premier à en avoir calculé l'aire et le volume. Ce volume présente un intérêt artistique et architectural lié à la conception des coupoles. Ces représentations sont tirées du manuscrit *De divina proportion* de Luca Pacioli, l'élève le plus connu de Piero della Francesca en mathématiques.

trouve les mêmes problèmes avec les mêmes erreurs.

Le caractère expérimental du *Trattato d'abaco* est toutefois confirmé par la manière dont Piero affronte d'autres équations, du troisième au sixième degré, en proposant des formules de résolution correctes, soit pour une seule équation (il doit en avoir vérifié le résultat), soit pour des équations provenant d'une classe établie de problèmes. En voici un exemple : calculez à combien de deniers par mois est prêtée une lire (une lire vaut 240 deniers) en

sachant que 100 liras donnent 160 liras au terme de quatre années. Le résultat est donné par l'équation :

$$x^4 + 80x^3 + 2\,400x^2 + 32\,000x = 96\,000, \text{ qui est du type :}$$

$$x^4 + 4ax^3 + 6a^2x^2 + 4a^3x = b$$

(avec $a = 20$ et $b = 96\,000$), et que

l'on peut écrire :

$$(x^2 + 2ax + a^2)^2 = b + a^4.$$

L'équation est correctement résolue par Piero d'une manière que l'on résume aujourd'hui par la formule :

$$x = \sqrt[4]{(a^4 + b)} - a = (\sqrt[4]{256\,000} - 20) \text{ deniers.}$$

On vérifie que la formule de Piero est générale, dans la mesure où elle résout correctement non seulement cette équation, mais toutes celles qui proviennent de la classe de problèmes suivante : calculez à combien de deniers est prêtée une lire par mois en sachant que C liras, au terme de quatre années, donnent M liras. En effet, on parvient toujours à l'équation :

$$x^4 + 80x^3 + 2\,400x^2 + 32\,000x = 160\,000 M/C - 160\,000,$$

résolue par la formule précédente :

La mathématique en représentation

La récente célébration du 500^e anniversaire de la mort de Piero della Francesca a remis à l'honneur sa peinture, redécouverte depuis le XIX^e siècle, et ses travaux en mathématiques. Le temps est venu de renverser les termes habituels de la critique, qui signale que ce peintre était aussi géomètre à ses heures, en relevant que la grande originalité de ce mathématicien est qu'il était peintre.

Les recueils modernes réunissant l'œuvre graphique de Piero négligent les figures de ses traités de mathématiques, ouvrages qu'il a pourtant soigneusement illustrés. L'intérêt de Piero pour les mathématiques est indissociable de son indéniable génie pictural. Les planches de ses traités ne comportent pas que des tracés de géométrie pratique : ils recèlent un catalogue des modèles idéaux et architecturaux que les peintres et autres praticiens des arts du trait et du dessin ne manquèrent pas d'exploiter. Les manuscrits de Piero ont été lus : l'usage des nombreuses copies de son traité de perspective l'atteste. En outre, en 1568, Daniele Barbaro en a repris de nombreux extraits dans son propre traité de perspective. Une partie du *Libellus de quinque corporibus regularibus* de Piero a été reprise par Luca Pacioli, élève de Piero, dans le traité *De divina proportionem*, illustré en partie par Léonard de Vinci et imprimé à Venise en 1509. Pacioli a aussi repris, dans un autre traité, de nombreux résultats du traité d'abaque de Piero. L'influence de ce dernier s'est même étendue à son illustre homologue allemand Albrecht Dürer, auteur, lui aussi, d'une géométrie pratique, imprimée à Nuremberg en 1525.

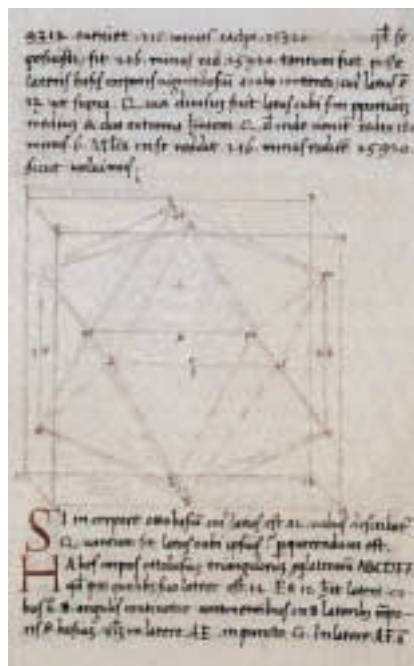
De prospectiva Pingendi, le traité de perspective de Piero della Francesca, a été rédigé dans les années 1470 à 1480. Il fut retrouvé seulement au XIX^e siècle et imprimé pour la première fois en 1899. La première mention officielle de l'existence de ce traité est due aux mathématiciens Jean-Victor Poncelet et Michel Chasles qui, dans un rapport présenté le 12 décembre 1853 à l'Académie des sciences, s'exprimaient en ces termes : « Pietro della Francesca, appelé aussi Pietro dal Borgo San Sepolcro, du nom de sa ville natale, excellent peintre du XV^e siècle, qui passait aussi pour le plus savant géomètre de l'époque est regardé comme le principal promoteur de la perspective linéaire. »

Ce traité manuscrit est le premier à expliciter la construction dite « légitime » de Filippo Brunelleschi, fondée sur une double projection orthogonale (plan et profil), et à valider géométriquement la méthode de Leo Battista Alberti, premier énoncé connu d'une règle pour la perspective centrale, abrégée de celle de Brunelleschi. On peut de surcroît attribuer à Piero della Francesca plusieurs résultats novateurs. Il établit la loi numérique générale du raccourcissement des distances dans la perspective centrale. Le géomètre Girard Desargues (1591-1661) en donnera la formulation générale en imaginant le concept d'involution, connu aujourd'hui sous la forme du birapport ou rapport anharmonique : il montre la conservation du rapport des rapports de distances par projection centrale. Piero réalise la première description de l'utilisation du point de distance comme point de construction (le point de distance est un point de fuite secondaire vers lequel convergent des diagonales) et les premières constructions, en peinture, de projections centrales sur des plans horizontaux, théorisant ainsi le trompe-l'œil d'ornement, gisant (au sol ou sur un table) ou plafonnant. Cette dernière innovation contient en germe les principes du trompe-l'œil architectural, du décor plafonnant monumental en trompe-l'œil, de l'ombre portée, du décor de théâtre illusionniste et de l'anamorphose plane. Ces innovations conduiront à l'émergence de la géométrie projective au XIX^e siècle.

Piero della Francesca est le premier, dans l'histoire de la géométrie et *a fortiori* du dessin scientifique et technique, à proposer des représentations réglées et reproductibles des solides de l'espace, tant en perspective cavalière qu'en perspective centrale. De ce point de vue, il y a un « avant Piero », où la reproduction est improbable, et un « après Piero » qui s'est traduit, dans l'histoire des sciences et des techniques, par la reproductibilité des entreprises humaines, avec pour horizon la possibilité de la production en série. L'avènement de la science rationnelle et l'émergence du monde industriel en Occident sont passés par l'invention de la perspective centrale et de ses avatars, la perspective cavalière et le dessin technique.

Jean-Pierre LE GOFF, IUFM et IREM de Caen.

6. VUE CAVALIERE DE L'ICOSAEDRE inclus dans le cube, tirée du *Libellus de quinque corporibus regularibus* (Petit livre à propos des cinq corps réguliers) de Piero della Francesca. Le dessin est autographe, le texte d'un copiste inconnu. Piero explique minutieusement comment chacune des six faces du cube contient une arête de l'icosaèdre placée en situation médiane. Cette construction n'est pas dans le livre xv des *Éléments* d'Euclide (écrit en réalité bien après Euclide), et il est probable que Piero souhaite en souligner l'originalité : elle montre en particulier que six des arêtes de l'icosaèdre, bien choisies, sont orthogonales deux à deux. Piero della Francesca est le premier à fournir une visualisation de polyèdres en trois dimensions.



$$x = (\sqrt[3]{160\,000\,M/C} - 20) \text{ deniers.}$$

Cette généralisation n'est toutefois pas donnée par Piero. Au contraire, la formule est faussement présentée comme la résolution de l'équation générale $ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx = e$ (avec des coefficients quelconques), et le problème financier apparaît comme un simple exemple de sa validité. Il n'en reste pas moins qu'il a réussi à résoudre une équation particulière du quatrième degré, ainsi que d'autres du troisième et du cinquième degré qui peuvent être obtenues à partir du même problème si l'on applique la durée de trois et de cinq années. Certaines de ces formules ne se trouvent que dans les ouvrages de Piero et peuvent donc lui être attribuées. La découverte peu après, par d'autres mathématiciens, de la formule de résolution des équations du troisième degré vient sans doute de cette habileté dans la manipulation des coefficients, dont Piero a accéléré la mise en place, et de l'encouragement fourni par de tels succès partiels.

La notation algébrique utilisée par Piero est aussi originale ; on la retrouve, avec quelques variantes, chez plusieurs autres mathématiciens de l'époque, mais elle a rapidement disparu, ne laissant derrière elle qu'une trace de l'intérêt intense pour l'algèbre. Tout cela confirme la participation active de Piero au débat algébrique de la seconde moitié du XV^e siècle.

Piero della Francesca, peintre mathématicien, a été l'un des premiers techniciens qui surent devenir des scientifiques. Ce phénomène, conjointement avec l'intérêt des scientifiques pour les techniques, a été décisif dans la «révolution scientifique» de la Renaissance.

Enrico GAMBA est professeur d'histoire des mathématiques à l'Université catholique de Brescia. Vico MONTEBELLI est professeur de mathématiques appliquées.

Davis M. DALY, *Piero della Francesca's Mathematical Treatises*, Longo, Ravenna, 1977.
G.C. ARGAN et R. WITTKOWER, *Perspective et histoire au Quattrocento*, Éditions de la Passion, Paris 1990.
J.-P. LE GOFF, *Aux confins de l'art et de la science : le De prospectiva pingendi de Piero della Francesca*, in : D. Bessot, Y. Hellegouarch et J.-P. Le Goff (éditeurs), *Destin de l'art, desseins de la science*, Actes du colloque ADERHEM de Caen (octobre 1986) diffusion IREM de Basse-Normandie, Caen 1991.
P. COLMAR, *La perspective en jeu*, Éditions Gallimard, Paris, 1992.
D. BESSOT et J.-P. LE GOFF, *Mais où est donc passée la troisième dimension ?*, in *Histoires de problèmes, histoire des mathématiques*, Éditions Ellipses, Paris, 1993.
Piero della FRANCESCA, *Libellus de quinque corporibus regularibus*, Edizione nazionale, Giunti, Florence, 1995.
Les mathématiciens, Bibliothèque Pour la Science, 1996.
Thomas BANCHOFF, *La quatrième dimension*, collection Univers des sciences, Pour la Science, 1996.

L'ADN, ressort moléculaire

J.-F. ALLEMAND • A. BENSIMON • D. BENSIMON • F. CARON • D. CHATENAY
PH. CLUZEL • V. CROQUETTE • CH. HELLER • R. LAVERY • A. LEBRUN
T. STRICK • J.-L. VIOVY

Les physiciens et les biologistes explorent les propriétés élastiques de l'ADN. Ils parviennent à manipuler des molécules d'ADN isolées et découvrent ainsi de nouvelles formes de la molécule.

Les biologistes savent depuis longtemps que l'hérédité est contenue dans la cellule, essentiellement sous la forme d'une longue molécule, l'ADN. L'information génétique est enregistrée dans cette molécule par un codage chimique, fondé sur quatre sous-unités, ou nucléotides ; chaque nucléotide est composé d'un groupe sucre, d'un groupe phosphate et d'une des quatre bases : l'adénine (A), la thymine (T), la guanine (G) et la cytosine (C). L'ADN existe normalement sous la forme d'une double hélice qui permet aux bases des deux brins de s'apparier en paires A-T et G-C. Ainsi les deux brins de la molécule portent des copies complémentaires du même message génétique.

Il était alors tentant de comparer cette longue molécule (ou polymère) à une bande magnétique sur laquelle était inscrit le programme de la vie. Dans cette analogie, les chromosomes sont, en quelque sorte, des bobines permettant d'enrouler proprement une molécule d'ADN de dix centimètres de long (pour l'espèce humaine) dans un volume de l'ordre d'un micromètre (ou millionième de mètre) au cube. Cependant, depuis quelques années, cette description semble simpliste : si l'information génétique reste fondamentale, les propriétés mécaniques (dynamiques et statiques) du support de cette information (la molécule d'ADN) se révèlent d'une importance cruciale pour le fonctionnement des cellules.

C'est une surprise, car la monotonie de la structure chimique, avec la répétition de quatre types de sous-unités seulement, n'encourageait pas des explorations chimiques approfondies.

Contrairement aux protéines, dont les chaînes latérales des 20 sortes d'acides aminés permettent de savants repliements et des propriétés catalytiques remarquables, l'ADN semble «cacher» ses bases au centre d'une structure hélicoïdale monotone.

Torsions et entortillements

Tout d'abord, on a observé que la séquence des bases engendrait des modulations de la structure hélicoïdale de l'ADN et de ses propriétés mécaniques : la séquence des bases induit des changements du pas de la double hélice, des courbures locales de la molécule et des variations des distances et des angles de liaisons entre les paires de bases. Un exemple est donné par l'étude du mode d'action de l'enzyme nommée désoxyribonucléase I. Cette protéine coupe les brins d'ADN ; on a longtemps cru qu'elle agissait en des points aléatoires de la séquence, mais une étude fine a révélé que l'enzyme agit en coupant l'ADN en des sites préférentiels où la molécule d'ADN est plus flexible.

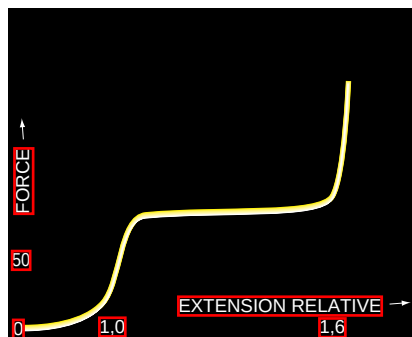
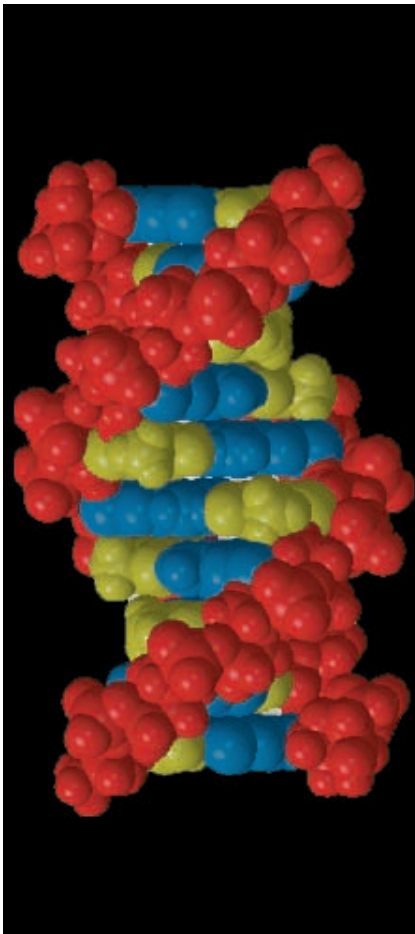
Plus récemment, l'étude des phénomènes de recombinaison dans le micro-organisme *Escherichia coli* a montré qu'une autre enzyme, nommée Rec A, assure la formation de triples brins d'ADN stables : dans ces structures, un troisième brin identique à l'un des deux brins de la double hélice, vient se loger parallèlement au brin de même séquence, dans le grand sillon de la double hélice initiale. Sontanément, une triple hélice ne se forme pas quand on mélange une double hélice d'ADN avec l'un des deux brins, et le nouveau mode d'appariement

résulte d'un étirement de la double hélice, à la suite de son interaction avec l'enzyme Rec A. Autrement dit, l'extensibilité de l'ADN pourrait jouer un rôle dans les mécanismes cellulaires de reconnaissance par la séquence.

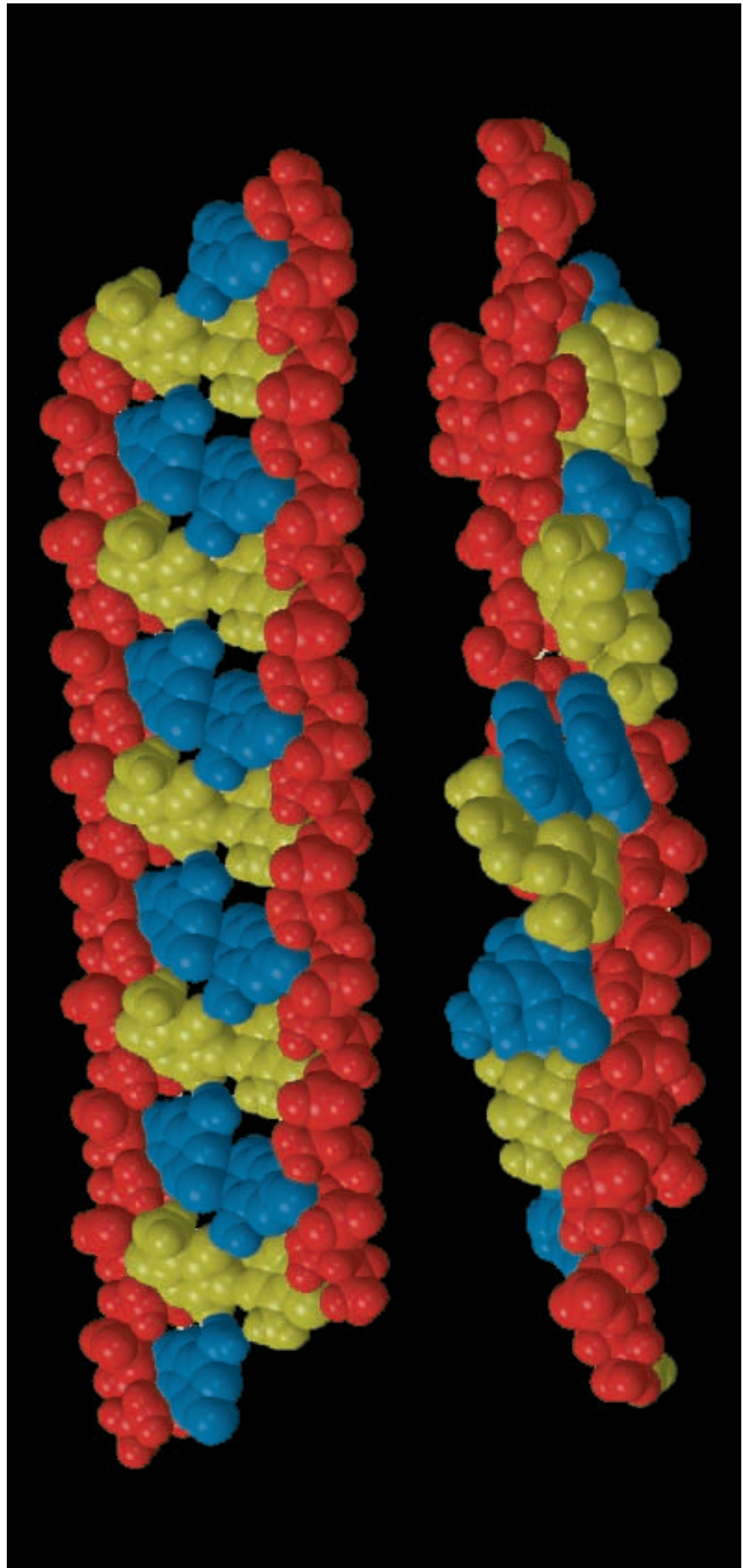
Depuis une dizaine d'années, on comprend que l'ADN peut également être surenroulé ou sous-enroulé : la double hélice peut être comme un cordon de téléphone qui a été tourné sur lui-même, soit dans le sens de l'enroulement de base, soit dans le sens contraire. On a compris que les propriétés de torsion et de superhélicité sont de deux types : locales ou à longue distance. Dans les effets locaux, la superhélicité négative (sous-enroulement) peut induire ou faciliter la séparation des deux brins d'une double hélice (cette séparation joue un rôle dans le démarrage de la transcription et de la réplication). La superhélicité peut aussi déclencher des changements de structure, la double hélice adoptant une forme de croix ou s'enroulant dans le sens inverse du sens habituel.

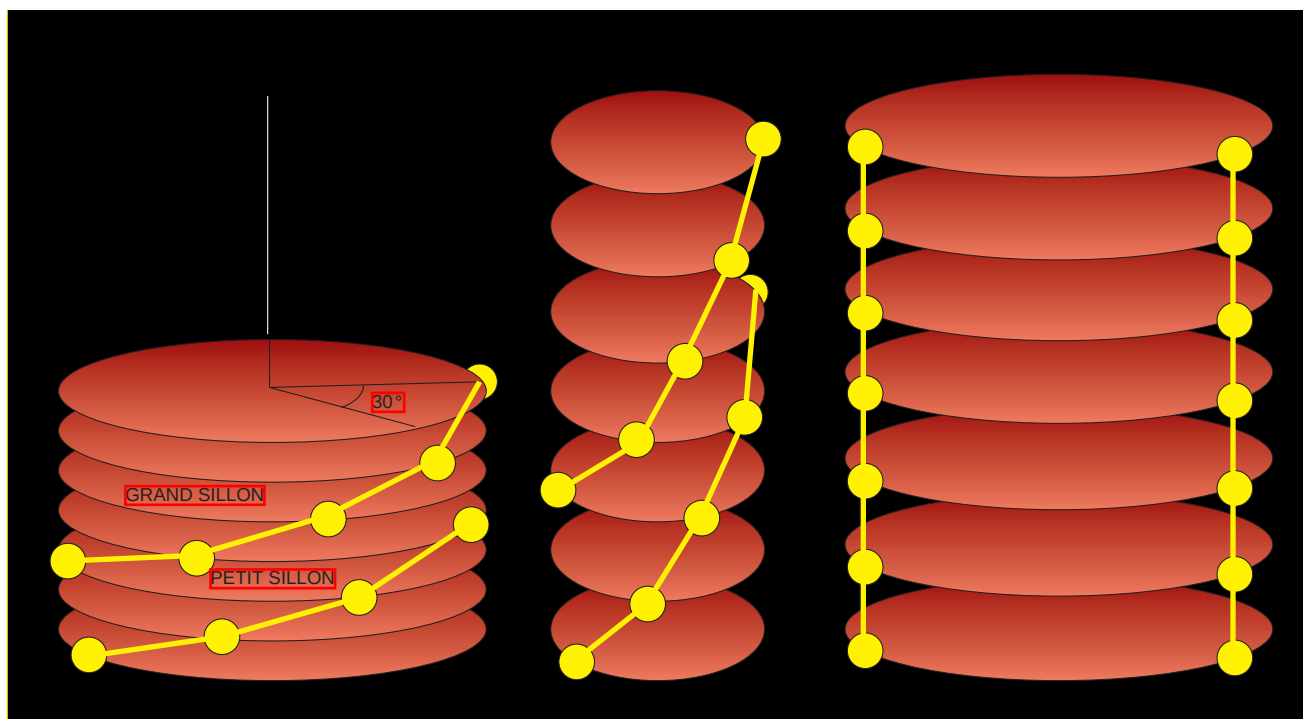
D'une manière plus subtile, un changement de torsion de la molécule provoque des entortillements de l'axe de la double hélice en des structures dites «plectonémiques» ou «solénoïdales», à la façon d'un cordon de téléphone (voir la figure 3). Ces repliements qui rapprochent des séquences éloignées permettent ainsi l'interaction de gènes distants sur l'ADN. Ils créent aussi des courbures locales qui favorisent l'action de certaines enzymes.

Les effets à longue distance sont faciles à imaginer : une contrainte de torsion locale peut se propager ou se diluer par relaxation le long d'une



1. L'ADN est une molécule en forme de double hélice dont les physiciens explorent l'élasticité. Quand ils tirent sur les extrémités d'un ADN sous la forme B, ou forme normale (*ci-dessus*), ils observent des comportements différents (*ci-contre*) selon les extrémités des brins sur lesquelles ils tirent. Le brusque allongement observé, quand la force de traction augmente progressivement (*courbe ci-dessus*), correspond à une modification de structure de l'ADN : les modélisations par ordinateur révèlent que la forme normale, ou forme B, se transforme en une structure allongée (*à droite*), dont le diamètre est inférieur à celui de la molécule initiale. Sur les modèles moléculaires, les brins composés des groupes phosphate et des groupes sucre sont en rouge, et les bases sont en bleu et en jaune.





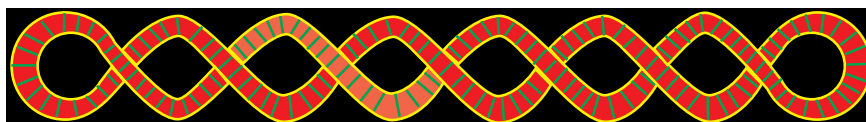
2. L'ÉTIREMENT DE L'ADN (en jaune) peut, selon les cas, conduire à deux types de structures : soit le diamètre de la molécule est réduit, soit la molécule se déroule. Le type de déformation effectivement

observé dépend des extrémités de la molécule sur lesquelles les forces de traction sont exercées. Sur cette figure, on a représenté par des sphères jaunes les points d'attache des bases.

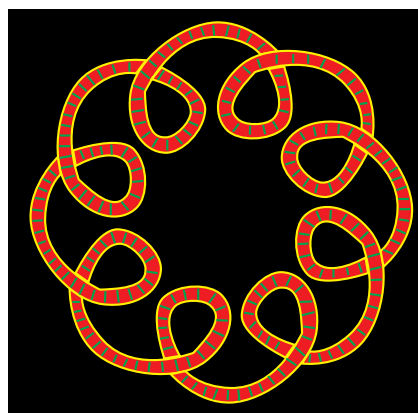
double hélice. Un exemple très révélateur a été la découverte des vagues de superhélicité positives et négatives engendrées par le déplacement de l'enzyme nommée ARN polymérase (voir la figure 5) : cette dernière, qui synthétise l'ARN à partir de l'ADN, forme un gros complexe de forte inertie avec la chaîne naissante d'ARN sur laquelle des structures nommées ribosomes commencent à se fixer afin de fabriquer les protéines codées par les gènes. Cette inertie peut même être renforcée par un attachement à des membranes,

comme dans le cas de la synthèse de protéines qui sont excrétées par les cellules ou qui vont se loger dans les membranes. Lorsque le complexe formé autour de l'ARN polymérase se déplace le long de la molécule d'ADN, afin de transcrire l'ADN en ARN, il conserve son orientation, en raison de sa liaison à la membrane, de sorte que c'est la double hélice qui tourne autour de son axe. Toutefois, la double hélice ayant également une forte inertie, le déplacement de l'ARN polymérase augmente la torsion (suren-

roulement) en avant du complexe de transcription et la diminue (désenroulement) en arrière. Ces modifications devraient ralentir considérablement la progression de l'ARN polymérase, qui aurait à dérouler une hélice excessivement tordue. Cependant des enzymes cellulaires nommées topo-isomérases relaxent ces tensions de surenroulement ou de désenroulement en coupant un des brins et en laissant les deux brins tourner l'un autour de l'autre jusqu'à ce que la torsion soit nulle. Ces actions enzymatiques ont un délai d'action, de sorte que la propagation et l'interaction de ces contraintes locales peut favoriser ou inhiber l'expression des gènes voisins.



3. LA DOUBLE HELICE d'ADN est généralement sous-enroulée d'environ cinq pour cent, ce qui la conduit à présenter des entortillements analogues à ceux des cordons de téléphone. Ces structures qui se nomment plectonèmes sont, selon les conditions, linéaires (en haut) ou solénoïdales (en bas). Ces entortillements engendrent des zones de forte courbure et des zones de courbures réduites (respectivement les extrémités et la partie centrale de la structure ci-dessus), que diverses enzymes peuvent modifier. Les biologistes découvrent aujourd'hui que ces parties de courbure différente de la courbure moyenne résultent de la séquence particulière de l'ADN, c'est-à-dire de la nature des sous-unités dont l'enchaînement constitue l'ADN.



Les deux élasticités de l'ADN

Dans cet article, nous examinerons l'importance des techniques de physique dans l'étude des propriétés d'élasticité de l'ADN. Nous envisagerons successivement les propriétés d'extensibilité et de superhélicité.

Pour étudier l'élasticité d'une molécule telle que l'ADN, il faut pouvoir l'attraper par les deux bouts. C'est possible avec l'ADN, car les biologistes maîtrisent l'utilisation des enzymes qui coupent, qui réparent, qui acco-

lent d'autres molécules sur un brin d'ADN. Les biologistes disposent également de «scotch» moléculaire spécifique : la biotine présente ainsi une grande affinité pour l'avidine (une protéine), et la dioxygénine vient s'accrocher à son anticorps : l'anti-dioxygénine. Or on sait accrocher une molécule de biotine à une extrémité de l'ADN, et une dioxygénine à l'autre extrémité. L'ADN ainsi préparé se lie spontanément à une bille couverte d'avidine, d'un côté, tandis qu'il se lie à une surface couverte d'anti-dioxygénine de l'autre côté. Toutes les expériences que nous allons considérer utilisent de telles fixations.

On s'attend à détecter deux régimes d'élasticité de l'ADN : un régime élastique à hautes forces, où la molécule est complètement étirée et où la force appliquée à la molécule conduit à des déformations élastiques, réversibles : dans ce régime, l'ADN réagit comme un ressort d'acier.

Le second régime est celui des forces faibles : les nombreux chocs des molécules d'eau contre la molécule d'ADN replient cette dernière en une pelote qui fluctue sans cesse ; quand on étire cette pelote, les chocs perpendiculaires à la direction d'étirement sont plus efficaces que ceux qui s'exercent dans la direction d'étirement et tendent à raccourcir la molécule, ce qui conduit à une élasticité du même type que celle qui est responsable des spectaculaires propriétés élastiques du caoutchouc (on décrit également cette force par la notion d'entropie : dans la configuration naturelle, les fluctuations conduisent à un désordre, ou entropie, maxi-

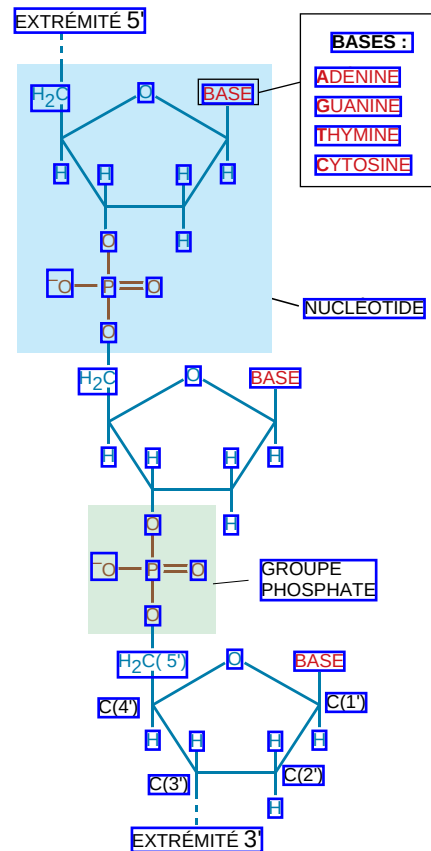
mal ; dans la configuration étirée, l'allongement de la molécule réduit le désordre moléculaire).

Tant que l'extension de la molécule d'ADN est faible, seule l'élasticité entropique joue un rôle, mais dès que cette extension est du même ordre de grandeur que la longueur de la molécule, l'élasticité intrinsèque des liaisons chimiques domine. La transition entre les deux régimes se fait pour une force de dix piconewtons environ (dix millièmes de milliardième de newton).

L'ADN étiré

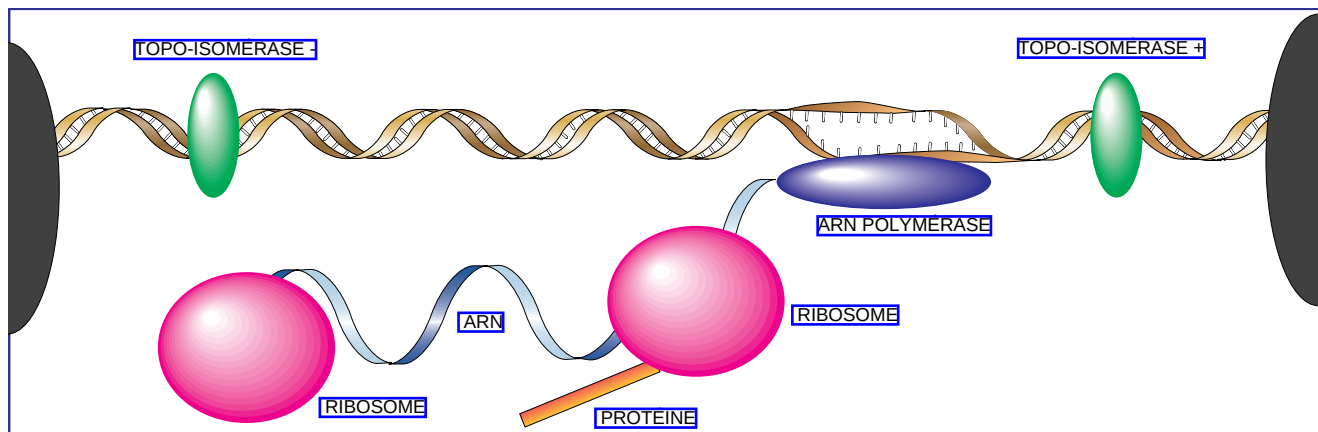
Les premières mesures de ce type ont été effectuées en 1992, par Carlos Bustamante et ses collègues de l'Université de l'Oregon. Ils utilisaient une combinaison de forces hydrodynamiques et magnétiques exercées sur une bille magnétique ; celle-ci était fixée à l'extrémité d'un brin d'ADN qui était attaché par l'autre extrémité à une lamelle de microscope. La bille était ainsi soumise à trois forces : une force hydrodynamique créée par l'écoulement d'un liquide, une force magnétique créée par un aimant, et la force d'élasticité de l'ADN. En variant la force hydrodynamique, les physiciens américains ont observé que la bille prenait diverses positions d'équilibre à partir desquelles ils ont constitué un diagramme où l'extension était portée en fonction de la force.

Ce type d'expériences nécessite des calibrations (pour chaque type de forces) difficiles, notamment en raison des interactions de l'ADN, de la bille



4. CHAQUE BRIN de la molécule d'ADN est un enchaînement de nucléotides. Les nucléotides sont composés d'un sucre nommé désoxyribose (cycles pentagonaux), d'un groupe phosphate (en vert) et d'une base. L'appariement des bases complémentaires A et T, et G et C, permet de lier deux brins ensemble, formant ainsi une double hélice.

et des parois. Néanmoins ces expériences ont une remarquable sensibilité dans le domaine des très faibles forces (inférieures à un piconewton). Les essais de traction sur l'ADN se terminent souvent lorsque la liaison la



5. DIVERSES ENZYMES modifient l'enroulement de l'ADN. Les enzymes ARN polymérases (en bleu) fabriquent un brin d'ARN en ouvrant localement la double hélice et en assemblant des nucléotides à la chaîne d'ARN en croissance. Des complexes d'acides nucléiques et de protéines nommés ribosomes (en rouge) se lient à cet ARN pour

assembler les protéines codées par les gènes. Comme l'ADN est généralement tenu à ses extrémités, et comme l'ARN polymérase a une forte inertie, la chaîne d'ADN est entortillée par la transcription. Des enzymes nommées topo-isomérases, devant et derrière l'ARN polymérase, ouvrent l'ADN et le détortillent.

plus faible cède : c'est généralement la liaison de l'ADN à la surface. Toutefois une technique de «peignage moléculaire», que nous avons récemment mise au point, donne accès à la force de rupture de la molécule. Cette technique utilise des surfaces spécialement traitées, sur lesquelles l'ADN s'ancré spontanément par ses extrémités. Lorsque la solution aqueuse où baigne l'ADN s'évapore, la partie de la molécule en solution est entraînée par le déplacement de l'interface eau-air (ménisque), car l'ADN, hydrophile, se place plutôt dans l'eau que dans l'air. La partie de la molécule qui se trouve derrière cette interface (à l'air) adhère fortement à la surface après s'être alignée perpendiculairement au ménisque, comme les algues sur la plage quand la marée descend. En marquant l'ADN par une sonde fluorescente, on visualise les molécules ainsi étirées. Par cette technique, nous avons ainsi montré qu'une molécule s'allonge plus de deux fois avant de casser, lorsque l'intensité de la force attei-

gnait 500 piconewtons.

Nous avons également étudié l'ADN dans son régime élastique à «haute force» jusqu'à la rupture de sa liaison avec la surface. Le principe de ces nouvelles expériences est inspiré des techniques utilisées en microscopie à force atomique, et des mesures réalisées sur les protéines mus-

culaires par T. Yanagida et ses collègues de l'Université d'Osaka : on fixe une des extrémités d'un brin d'ADN à un ressort de rigidité connue et l'autre extrémité à une bille dont on commande la position, afin de définir l'extension du brin.

En pratique, le ressort est une fibre optique dont on mesure la flexion. La constante de rigidité de la fibre est imposée par sa forme (diamètre et longueur). Par une attaque chimique, on peut réduire le diamètre de la fibre jusqu'à dix micromètres (ou millièmes de mètre). Pour déterminer sa flexion, nous envoyons un faisceau laser dans la fibre, dont l'extrémité apparaît comme un point lumineux intense, dont on mesure le déplacement à l'aide d'une photodiode située derrière un microscope. Grâce à l'agrandissement dû au microscope, on obtient aisément une sensibilité dans les mesures de déplacement de l'ordre du nanomètre (milliardième de mètre). On commande l'extension de l'ADN en déplaçant la bille à l'aide d'un micromanipulateur piézo-électrique sur lequel est fixé une pipette qui tient la bille par aspiration.

Le micromanipulateur permet de déplacer la bille sur des distances de 20 micromètres, à 20 nanomètres près. Un micro-ordinateur impose les déplacements de la bille tout en enregistrant la position de la fibre.

Plusieurs précautions sont à prendre pour réaliser des expériences contrôlées et reproductibles. Tout d'abord, les expériences doivent être réalisées dans des cellules thermostatées de petite dimension, afin de limiter la convection du fluide où se déroulent les expériences. Celles-ci ayant lieu en milieu ouvert, il est également utile de placer, à la surface libre du liquide, une mince couche d'une huile visqueuse qui évite toute évaporation. Il faut également isoler le dispositif expérimental des vibrations extérieures.

Les mesures révèlent un résultat inattendu : l'existence d'une transition

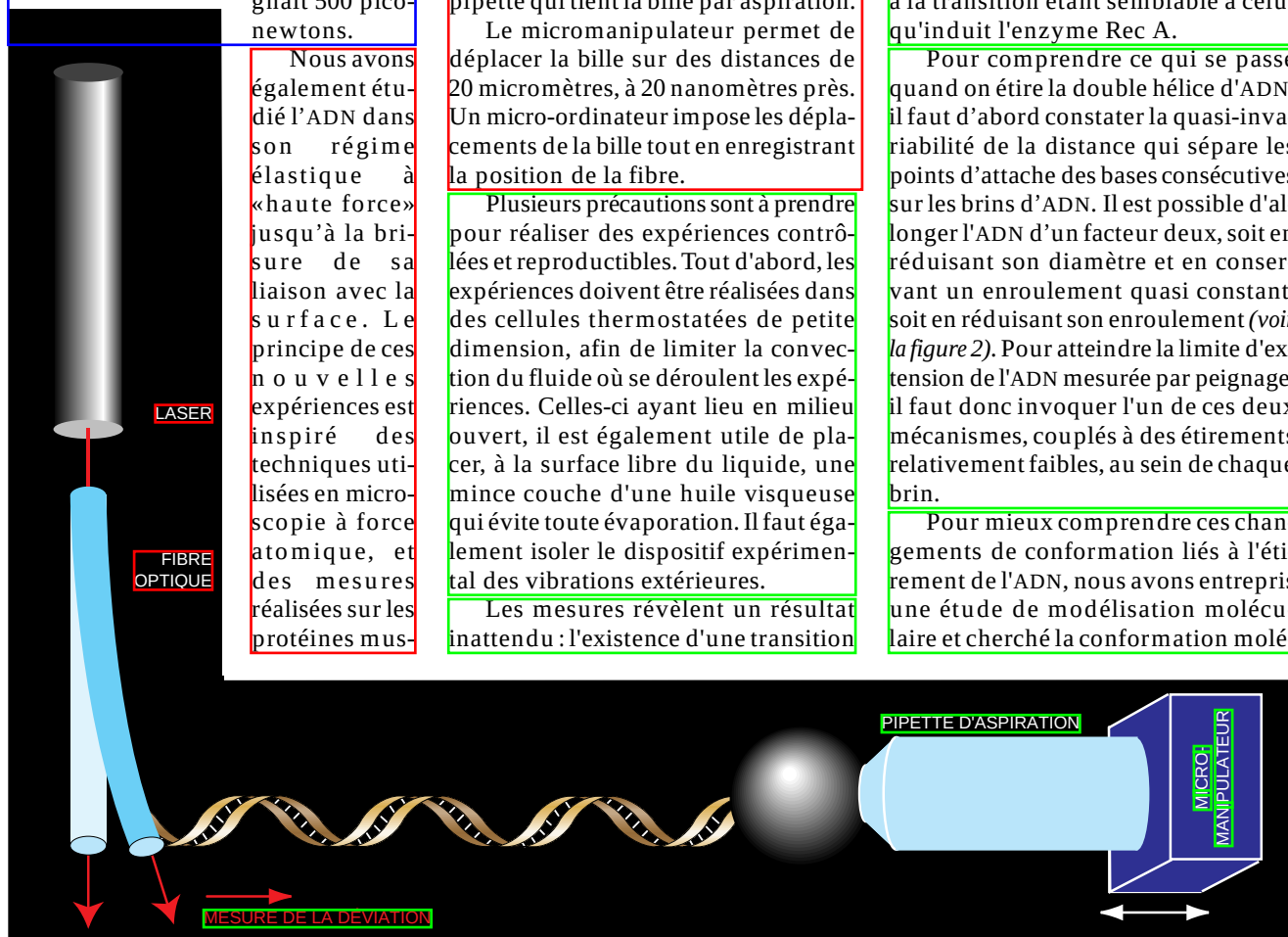
de structure de l'ADN, lorsque l'extension est supérieure à la longueur normale de la molécule. Cette transition se traduit par une extension de la molécule, lorsque la force appliquée reste quasi constante et égale à 70 piconewtons ; elle disparaît si l'on réalise la même expérience en présence de bromure d'éthidium, un composé qui, en s'insérant entre deux paires de bases, allonge la double hélice, redresse ses montants et change l'hélicité de l'ADN.

Modélisation de l'étirement

Par ordinateur, on a modélisé l'extension observée et confirmé qu'elle révèle la présence d'une forme étirée, où les bases restent appariées, mais s'inclinent le long de l'axe d'étirement, jusqu'à devenir presque parallèle à lui. Simultanément le grand sillon s'ouvre, ce qui favorise l'accès aux bases. Ce résultat pourrait être important pour comprendre certains phénomènes de reconnaissance d'acides nucléiques, l'allongement dû à la transition étant semblable à celui qu'induit l'enzyme Rec A.

Pour comprendre ce qui se passe quand on étire la double hélice d'ADN, il faut d'abord constater la quasi-invariabilité de la distance qui sépare les points d'attache des bases consécutives sur les brins d'ADN. Il est possible d'allonger l'ADN d'un facteur deux, soit en réduisant son diamètre et en conservant un enroulement quasi constant, soit en réduisant son enroulement (voir la figure 2). Pour atteindre la limite d'extension de l'ADN mesurée par peignage, il faut donc invoquer l'un de ces deux mécanismes, couplés à des étirements relativement faibles, au sein de chaque brin.

Pour mieux comprendre ces changements de conformation liés à l'étirement de l'ADN, nous avons entrepris une étude de modélisation moléculaire et cherché la conformation molé-



6. ON MESURE l'allongement de l'ADN en le couplant à une fibre optique, d'un côté, et à une bille métallique, de l'autre. On aspire

alors la bille à l'aide d'une pipette actionnée par un micromanipulateur à cristal piézo-électrique.

culaire la plus stable en fonction de la longueur de l'ADN, de sa séquence de bases et de la façon de l'étirer. Nous avons simulé l'étirement d'ADN ayant des séquences simples et répétitives (par exemple, *GCGCGCGC...* ou *ATA-TATAT...*). Notons tout d'abord que, selon les extrémités des brins que l'on tire, la molécule peut se déformer différemment. Ainsi, si l'on étire deux extrémités n'appartenant pas au même brin, les paires de bases s'inclinent dans la direction de ces extrémités. Les extrémités des brins sont notées 5' et 3' selon l'orientation des sucres, comme indiqué dans la figure 4. Puisque les deux brins de l'ADN sont antiparallèles, chaque bout de la molécule comporte une extrémité 5' et une extrémité 3'.

Quand on étire l'ADN par les deux extrémités 3', l'hélice s'allonge principalement en se déroulant, et les paires de base se séparent le long de l'axe de la molécule. Pendant l'étirement, les bases restent quasi perpendiculaires à l'axe de la double hélice, et la conformation finale ressemble à une échelle droite, avec les paires de base au centre, et les bords formés par les brins désoxyribose-phosphate. Au-delà d'une extension supérieure à 2,1, les brins ne peuvent plus s'allonger et les liaisons entre les paires de base cèdent.

Quand on étire l'ADN par les deux extrémités 5', la déformation de la double hélice résulte principalement d'une réduction de diamètre, en raison d'une forte inclinaison des bases. L'ADN ainsi étiré ressemble à une fibre mince, la déformation rapprochant les deux brins désoxyribose-phosphate sur le côté du petit sillon de la molécule et exposant les bases du côté du grand sillon. Elle conduit également à la rupture progressive des liaisons entre les paires de base et, comme dans le cas de l'étirement par les extrémités 3', les paires de bases sont complètement séparées au-delà d'une extension d'un facteur supérieur à 2,1.

Enfin, quand on étire les deux extrémités d'un même brin, ou les deux brins simultanément, la conformation finale ressemble soit à la conformation obtenue par traction sur les deux extrémités 5', soit à la conformation obtenue par traction sur les extrémités 3', selon la séquence des bases. Quelle que soit la façon d'étirer l'ADN, la modélisation confirme que l'extension est principalement associée

au repositionnement relatif des deux brins de la double hélice. Le changement de conformation interne des brins résulte de deux phénomènes : une augmentation de certains angles que font les liaisons entre les atomes de carbone, d'oxygène et de phosphore ; une rotation autour de la liaison entre le sucre et la base (angle glycosidique) qui permet la réorientation des bases par rapport au brin.

Du point de vue énergétique, l'étirement par les extrémités 5' semble plus facile que l'étirement par les extrémités 3', car il conserve mieux l'empilement des paires de bases.

La superhélicité

Nos études de la superhélicité de l'ADN s'inspirent, enfin, de celles de C. Bustamante, mais avec la possibilité d'ajouter une torsion à la molécule. Elles apportent, par ailleurs, des améliorations qui en étendent et simplifient l'analyse, permettant l'accès direct au diagramme force-extension, sans calibrage des forces.

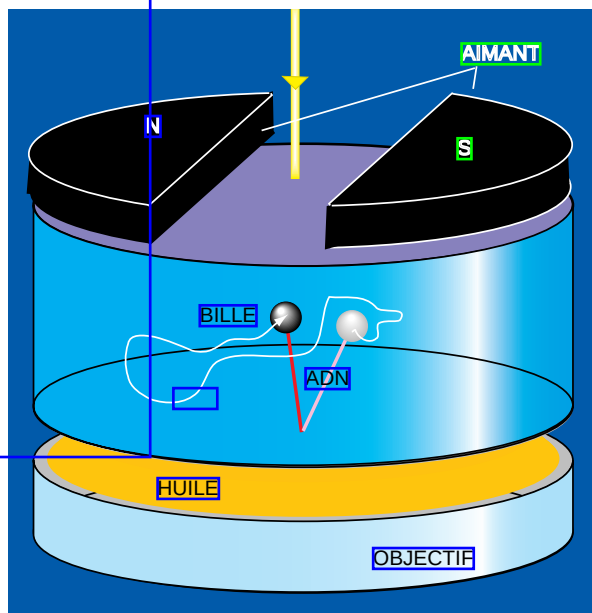
La molécule d'ADN étant ancrée par une de ses extrémités à une surface, l'autre extrémité est tirée par une microbille magnétique (l'ancrage est ici réalisé en plusieurs points, de sorte que l'extrémité ancrée ne puisse pas tourner par rapport à la surface). En présence d'un aimant, la bille est soumise à une force magnétique d'autant plus grande que l'aimant est plus près. Toutefois la microbille se comporte comme une boussole : on peut la faire tourner en faisant tourner l'aimant. À l'aide du système représenté sur la figure 7, on peut alors tirer et enrouler simultanément l'ADN. On peut alors étudier l'élasticité de la molécule après l'avoir enroulée d'un nombre de tours déterminés.

En utilisant des billes de diverses grosseurs et des aimants qui focalisent le champ magnétique sur les billes, on peut exercer des forces comprises entre 0,005 et 100 piconewtons, gamme qui permet

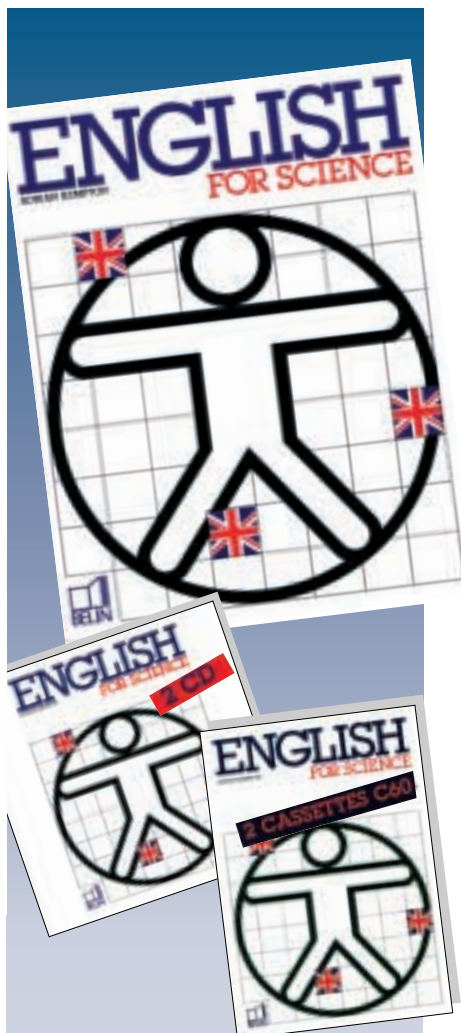
d'étudier l'élasticité de la molécule aussi bien dans son régime entropique que dans son régime élastique. On mesure alors la force appliquée à la bille en observant le mouvement brownien de celle-ci : plus la force de traction sur la molécule d'ADN est grande, plus le mouvement brownien est de faible amplitude. En enregistrant les fluctuations thermiques de la bille grâce à un ordinateur, on réalise une mesure de force sans contact.

Cette technique a plusieurs avantages : comme il suffit d'observer, on peut étudier des échantillons fermés, à l'abri de toute contamination (celle de l'expérimentateur, notamment), et comme la force est inversement proportionnelle au carré des fluctuations, elle permet une très large gamme de mesures. Le seul inconvénient est la durée des mesures : pour estimer précisément les fluctuations, il faut enregistrer le mouvement brownien pendant plusieurs dizaines de minutes.

Ces études révèlent la dépendance de l'élasticité entropique d'une seule molécule d'ADN en fonction de l'enroulement. Comme notre expérience quotidienne avec des cordons de téléphone le montre, une molécule sur-enroulée ou sous-enroulée est plus rigide que la même molécule quand elle est relaxée. Lorsque la force de traction atteint 0,4 piconewton, indépen-



7. ON TORD ET ON ÉTIRE L'ADN dans une cellule où la molécule est fixée à sa base au fond de la cellule et liée, à l'autre extrémité, à une bille magnétique sur laquelle agit un champ magnétique. On détermine l'élasticité de la molécule d'ADN en étudiant le mouvement brownien de la bille.



ENGLISH FOR SCIENCE

Enrichissez et améliorez
votre vocabulaire,
maîtrisez les expressions
et la prononciation
de l'anglais scientifique.

Le livre : 256 pages – 135 F **Code 1647**

Le corrigé : 112 pages – 50 F **Code 1648**

2 cassettes : 250 F **Code 0680**

Le CD : 250 F **Code 0699**



Bon de commande en p. 98

damment du degré d'enroulement de la molécule, l'ADN sous-enroulé s'allonge brusquement. Cette transition reflète sans doute la formation de régions d'ADN dénaturé (ce que nous nommons des bulles) dans la structure double hélice standard, dite forme B, en raison d'une dissociation des paires de bases. En absorbant le déficit d'enroulement, ces bulles permettent la relaxation torsionnelle du reste de la molécule. À des forces supérieures (au-delà de un piconewton), l'extension de la molécule est similaire à celle d'un ADN relaxé.

On observe un comportement qualitativement similaire pour une molécule d'ADN surenroulée, mais à des forces d'intensité supérieure. La molécule d'ADN étant chirale (enroulée comme une vis), on s'attend bien à des différences selon qu'on l'enroule dans le sens de l'hélice (surenroulement) ou dans le sens inverse. De fait, à partir d'une force critique de trois piconewtons, environ, la molécule surenroulée s'allonge brusquement. Comme précédemment, cette transition révèle la présence de zones qui absorbent l'excès de surenroulement, probablement par la formation d'une forme plus enroulée que la forme B naturelle ou par dénaturation partielle de la molécule (formation de bulles).

Ces expériences indiquent qu'une molécule d'ADN enroulée et soumise à des tractions relativement faibles peut modifier localement sa structure afin de réduire ses contraintes de torsion. Elles sont en très bon accord avec une théorie récente due à J. Marko et E. Siggia, de l'Université Cornell. Celle-ci décrit l'ADN comme un fil, caractérisé par des modules de flexion et de torsion, en équilibre thermodynamique avec la solution environnante. Les brusques transitions observées dans nos expériences sont bien décrites par les différences d'énergie entre la forme B de l'ADN et ses autres structures.

Autrement dit, nous disposons d'un système expérimental dont la compréhension théorique nous permettra d'aborder des phénomènes plus complexes, telle l'interaction de l'ADN et de certaines protéines, notamment les enzymes topo-isomérases qui assurent la relaxation des contraintes de torsion dans l'ADN, lors de la transcription de la molécule en ARN et de sa réplication.

L'ensemble des résultats présentés ici montrent le rôle considérable que peuvent jouer les propriétés élastiques de l'ADN. Dans les prochaines années, on s'efforcera de comprendre le rôle physique de la superhélicité dans les phénomènes cellulaires aussi fondamentaux que l'initiation de la transcription ou le démarrage de la réplication, et aussi le rôle de l'extensibilité de la molécule dans les phénomènes de reconnaissances mutuelles entre acides nucléiques, par leurs séquences.

Un des aspects fondamentaux de la mécanique cellulaire réside dans l'interaction des protéines et de l'ADN. Les biologistes disposent aujourd'hui de tous les outils permettant de connaître l'agencement chimique des molécules, mais peu de moyens sont à leur disposition pour aborder la dynamique de ces protéines. Quelques belles expériences ont été réalisées récemment : notamment Hong Yin et ses collègues de l'Université Brandeis ont utilisé des pinces optiques pour mesurer la force que peut développer la polymérase en se déplaçant sur l'ADN. Gageons que l'apport des techniques physiques fines à ce domaine de la biologie jouera un rôle important dans l'avenir.

Aaron BENSIMON est à l'Institut Pasteur. Jean-François ALLEMAND, David BENSIMON, François CARON, Vincent CROQUETTE et Terence STRICK sont à l'École Normale Supérieure de Paris. Didier CHATENAY est à l'Institut Curie, à Paris. Jean-Louis VIOVY est à l'ESPCI et à l'Institut Curie. Christophe HELLER est à l'ESPCI. Richard LAVERY et Anne LEBRUN sont à l'Institut de Biologie Physico-Chimique, à Paris.

D. BENSIMON, A.-J. SIMON, V. CROQUETTE et A. BENSIMON, *Stretching DNA with a receding meniscus : Experiments and models*, in *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, pp. 4754-4757, 1995.

C. BUSTAMANTE, J. F. MARKO, E. D. SIGGIA et S. SMITH, *Entropic elasticity of λ -phage DNA*, in *Science*, vol. 265, pp. 1599-1600, 1994.

Ph. CLUZEL, A. LEBRUN, C. HELLER, R. LAVERY, J.-L. VIOVY, D. CHATENAY et F. CARON, *DNA : An extensible Molecule*, in *Science*, vol. 271, 792-794, 1996.

T. STRICK, J. F. ALLEMAND, D. BENSIMON, A. BENSIMON, V. CROQUETTE, *The Elasticity of a single Supercoiled DNA Molecule*, in *Science*, vol. 271, p. 1835, mars 1996.

À la recherche de la vie

ROGER ANGEL • NEVILLE WOOLF

Nous ne connaissons la vie que sur la Terre, mais un nouveau télescope sera lancé dans l'espace pour chercher des signes de vie sur d'autres planètes.

Sommes-nous seuls dans l'Univers? Au début du XVII^e siècle, quand Galilée tourna la lunette qu'il avait inventée vers les cieux, il vit des montagnes sur la Lune et observa que les autres planètes étaient sphériques, comme la Terre. Des peuples habitaient-ils ces mondes extraterrestres? Environ 60 ans plus tard, d'autres contemplateurs du ciel observèrent des calottes glaciaires aux pôles de Mars, ainsi que des variations de couleur de la surface de la planète, qu'ils attribuèrent à des changements saisonniers de végétation (nous savons aujourd'hui qu'elles résultent de tempêtes de poussières). Plus récemment, des caméras embarquées dans des sondes spatiales ont pris des photographies rapprochées de Mars, montrant des canaux creusés par des fleuves disparus depuis longtemps. On a pensé que la vie s'était développée sur Mars, dans un lointain passé, mais les échantillons de sol martien que les sondes *Viking* ont prélevés dans les années 1970 n'ont pas retrouvé de vestiges d'une telle vie. Ailleurs que sur la Terre, la vie terrestre serait impossible dans notre Système solaire.

Et ailleurs qu'autour du Soleil? Après des années d'observations, les astronomes ont détecté des planètes en orbite autour d'étoiles lointaines, sem-

blables au Soleil (voir l'encadré de la page 87). Ces planètes abritent-elles des organismes vivants?

Aujourd'hui le télescope spatial *Hubble*, en orbite autour de la Terre, distingue à peine les montagnes de Mars. Pour obtenir des images suffisamment détaillées du relief de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, il faudrait un réseau de télescopes spatiaux de la taille de l'Europe tout entière. En outre, Carl Sagan, de l'Université Cornell, a calculé que seules des images de très haute résolution pourraient révéler la présence de vie sur la Terre. Des images détaillées pourraient être obtenues par une sonde inhabitée, lancée vers d'autres systèmes planétaires, mais les distances entre la Terre et toute planète extrasolaire sont excessives : on n'obtiendrait les images que dans plusieurs décennies.

Les photographies ne sont cependant pas le meilleur moyen d'étudier la vie extraterrestre ; la spectroscopie, notamment, donne des informations plus globales. Cette méthode consiste à analyser la lumière provenant d'un objet afin de déterminer des caractéristiques telles que la température du corps, la pression de son atmosphère et sa composition chimique.

Les signes de vie les plus faciles à reconnaître seraient des signaux radio

1. UN TÉLESCOPE SPATIAL d'une longueur de 50 à 75 mètres pourrait rechercher la vie sur d'autres planètes que la Terre. L'instrument pourrait être assemblé près de la future station spatiale internationale (en bas à gauche). Par la suite, le dispositif serait placé sur une orbite héliocentrique comparable à celle de Jupiter. Une telle mission constitue l'un des programmes clés de la NASA pour l'étude de systèmes planétaires voisins.





émis par des extraterrestres pour communiquer à travers l'espace interstellaire : facilement discernables des signaux associés aux phénomènes naturels, ils nous permettraient de localiser une vie intelligente ailleurs que sur la Terre. Cependant les surveillances de systèmes planétaires lointains n'ont révélé aucun signal, ce qui indique que les extraterrestres qui maîtrisent les radiocommunications interstellaires ne sont pas légion.

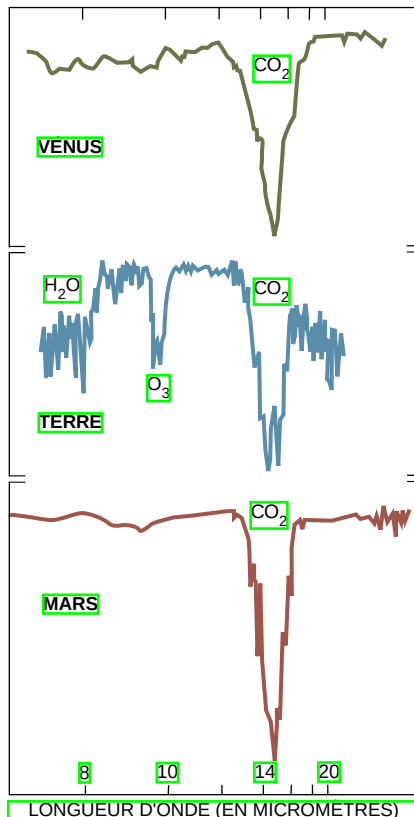
Des planètes abritent-elles alors des formes de vie moins évoluées ? Afin de chercher les traces d'organismes très simples, nous avons proposé un nouveau type de télescope.

Sur notre planète, les formes de vie les plus simples ont modifié l'environnement d'une façon qui serait perceptible par un observateur lointain : au cours du milliard d'années qui a suivi la formation de la Terre, dès la fin du bombardement intensif par les astéroïdes, des organismes primitifs comme les bactéries et les algues avaient recouvert la quasi-totalité du Globe. Ces organismes constituèrent la seule vie terrestre pendant les deux milliards d'années suivants ; par conséquent, si la vie existe sur d'autres planètes, elle pourrait très bien se trouver sous cette forme.

Les algues et l'atmosphère

Les algues bleu-vert terrestres ne maîtrisent pas les communications radio, mais elles modifient la chimie du Globe : en proliférant, elles ont progressivement enrichi l'atmosphère en oxygène. Plus généralement, les organismes les plus élémentaires consomment de l'eau, de l'azote et du dioxyde de carbone, et libèrent de l'oxygène dans l'atmosphère. Or l'oxygène est un gaz chimiquement réactif, dont la concentration chuterait sans un apport continu par les algues et, plus tard dans l'évolution terrestre, par les plantes. Aussi l'abondance d'oxygène dans l'atmosphère d'une planète est un bon indicateur de l'existence d'une forme de vie carbonée.

L'oxygène présent sur une planète modifie le rayonnement de cette dernière. Ainsi une partie de la lumière solaire atteignant la surface terrestre est réfléchie, vers l'espace, à travers l'atmosphère. L'oxygène atmosphérique absorbe une partie de ce rayonnement, de sorte qu'un observateur extraterrestre étudiant par spectro-



2. LA SIGNATURE INFRAROUGE DE LA VIE ne s'observe que sur la Terre : si Vénus, la Terre et Mars possèdent tous trois une atmosphère riche en dioxyde de carbone (CO₂), seule la Terre contient en abondance de l'eau (H₂O) et de l'ozone (O₃), une forme d'oxygène que l'on trouve habituellement dans la haute atmosphère. L'eau est indispensable au maintien d'une vie carbonée ; l'oxygène est un signe de sa présence. Le rayonnement infrarouge émanant de planètes membres de systèmes planétaires lointains pourrait dévoiler d'autres mondes semblables au nôtre.

scopie la lumière réfléchie par la Terre détecterait la présence de l'oxygène.

En 1980, à l'Université d'État de Stony Brook, Toby Owen proposa de rechercher la vie extraterrestre en analysant la lumière rouge réfléchie par les planètes. Puis, en 1993, C. Sagan utilisa le vaisseau spatial *Galileo* pour enregistrer le spectre distinctif de l'oxygène dans la région rouge de la lumière réfléchie par la Terre. Ce signe de vie existe depuis plus de 500 millions d'années. Est-il parfaitement convaincant ?

Des planètes sans vie ne pourraient-elles néanmoins contenir une source non biologique d'oxygène ? Et d'autres formes de vie pourraient-elles ne pas produire d'oxygène ? Des arguments convaincants nous conduisent à supposer que la vie sur d'autres planètes serait fondée sur une chimie semblable à la nôtre, car le carbone se prête remarquablement bien à la construction de

la vie ; il est abondant dans l'Univers, et aucun autre élément connu ne peut former la myriade de molécules stables qui sont nécessaires à la vie que nous connaissons.

À la recherche d'une autre Terre

La présence d'eau sur notre planète a manifestement favorisé le développement de la vie. L'eau est un solvant où les réactions biochimiques se déroulent et elle sert de source d'hydrogène pour la matière vivante. Aussi les planètes comparables à la Terre, en taille et en distance par rapport à leur étoile, sont les pouponnières de vie carbonée dans les autres systèmes planétaires, parce que ces mondes pourraient contenir de l'eau liquide. Trop proches de l'étoile, les planètes sont glacées, et trop éloignées, elles ne contiennent que de la vapeur d'eau.

On peut facilement estimer « l'orbite d'or », c'est-à-dire la distance à laquelle la vie peut se développer comme elle l'a fait sur la Terre. Pour une grosse étoile chaude, 25 fois plus brillante que notre Soleil, une planète rocheuse comme la Terre occuperait à peu près l'orbite de Jupiter. Pour une petite étoile froide, dix fois moins brillante que le Soleil, la bonne orbite serait celle de Mercure.

Toutefois la distance de la planète à son étoile n'est pas une condition suffisante pour l'existence de la vie. L'attraction gravitationnelle de la planète doit, en outre, retenir des océans et une atmosphère. Si la distance à l'étoile était le seul facteur important, la Lune posséderait de l'eau liquide. Or la gravité dépend de la densité et de la taille du corps : comme la Lune est plus petite et moins dense que la Terre, son attraction gravitationnelle est bien inférieure : toute pellicule d'eau ou toute atmosphère qui s'y constituerait s'échapperait rapidement dans l'espace.

Inversement, les grosses planètes attirent les gaz de l'espace. On suppose que Jupiter a crû ainsi, accumulant une énorme enveloppe d'hydrogène et d'hélium. De ce fait, la vie terrestre ne semble pas pouvoir exister sur des planètes gazeuses massives comme Jupiter.

Si nous connaissons assez bien le type de planètes pouvant abriter la vie, nous n'avons encore découvert que peu de planètes autour d'étoiles lointaines, car les meilleures méthodes de détection de ces corps célestes sont fondées

Nouvelles planètes autour d'autres soleils

Encore récemment, les astronomes ne disposaient d'aucune preuve directe de l'existence de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, mais en octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, ont annoncé la détection d'une planète massive autour de l'étoile de type solaire 51 Pegasi. Geoffrey Marcy et Paul Butler, de l'Université de San Francisco, confirmèrent la découverte et, six mois plus tard, découvrirent trois autres corps autour d'étoiles similaires. Plus récemment, George Gatewood a découvert par astrométrie une planète analogue à Jupiter à 2,5 unités astronomiques de l'étoile Lalande 21185.

Personne n'a encore vu ces mondes extraterrestres ; tous trois furent identifiés indirectement, par la mesure de leur influence sur le mouvement de leur étoile. Quand un objet tourne autour d'une étoile, son attraction gravitationnelle fait osciller l'étoile. Ce mouvement crée un déplacement périodique, nommé décalage Doppler, du spectre de l'étoile observé de la Terre. Du décalage, on déduit la dimension et la forme de l'orbite du compagnon ; de l'amplitude du décalage, on déduit la masse minimale du compagnon. Aucune autre particularité (température ou composition, par exemple) n'est révélée par la technique Doppler.

Les planètes nouvellement découvertes ne ressemblent à rien de connu jusqu'ici. Celle qui accompagne 51 Pegasi est la plus étrange : deux fois moins massive que Jupiter, elle n'est éloignée de son étoile que de sept millions de kilomètres, soit moins d'un huitième de la distance Mercure-Soleil. À cette petite distance, la température superficielle de la planète devrait atteindre 1 300 degrés. La période orbitale est égale à 4,2 jours.

L'une des planètes découvertes par G. Marcy et P. Butler tourne autour de l'étoile 47 Ursae Majoris, et cet objet présente des caractéristiques moins extrêmes. Elle parcourt en trois ans une orbite circulaire à environ 300 millions de kilomètres de son étoile (correspondant à une orbite entre celles de Mars et de Jupiter), et sa masse est au minimum 2,3 fois celle de Jupiter ; dans notre Système solaire, elle ne semblerait pas particulièrement étrange.

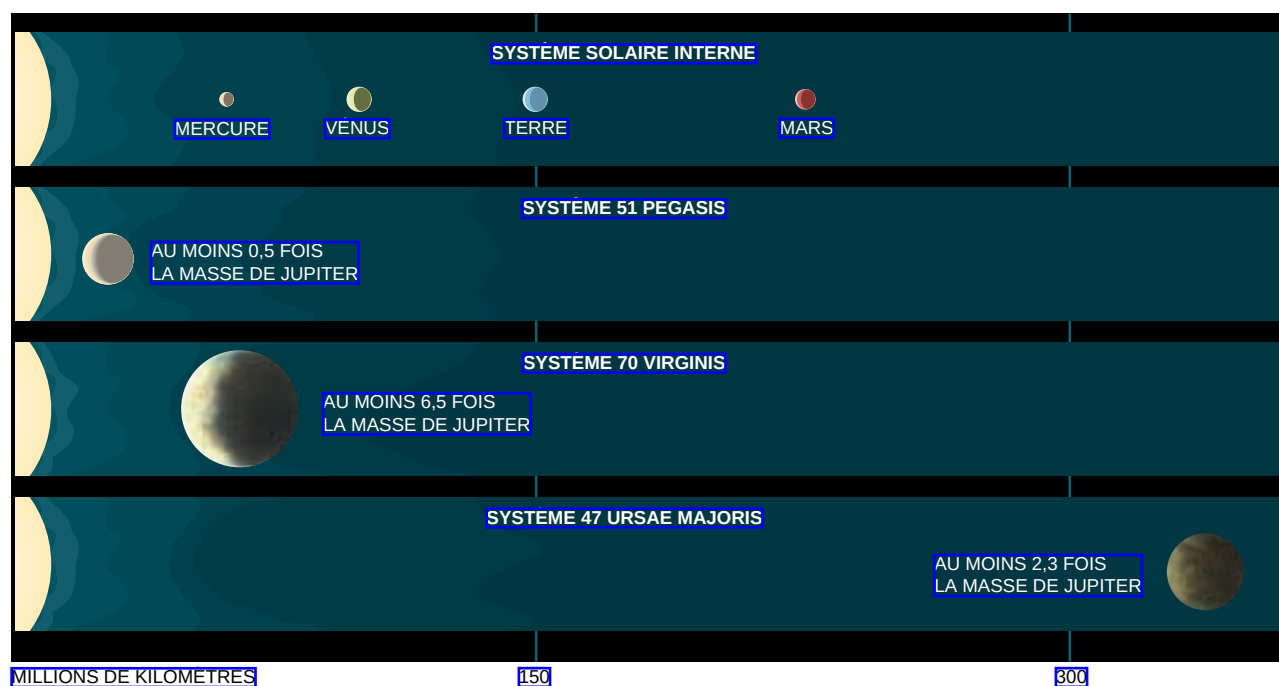
Le troisième objet, également identifié par G. Marcy et P. Butler, tourne autour de l'étoile 70 Virginis. Cette « planète » diffère sensiblement des deux autres. Elle est la plus massive du groupe, avec une

masse plus de 6,5 fois supérieure à celle de Jupiter, et son orbite, parcourue en 117 jours, est très elliptique. G. Marcy prétend qu'elle occupe la « zone d'or » : sa distance permettrait l'existence d'eau à l'état liquide. Malgré cette hypothèse optimiste, la planète possède sans doute une épaisse atmosphère qui bloque l'apparition de la vie. De surcroît, sa grande masse et son orbite elliptique font penser qu'il s'agit d'une naine brune, un objet gazeux qui se forme un peu comme une étoile mais ne possède pas suffisamment de masse pour briller.

Pourquoi les astronomes ne découvrent-ils que des objets massifs sur des orbites de périodes relativement courtes ? Parce que ce sont les plus faciles à détecter par la technique Doppler. Observer une planète sur une orbite lente, comme celle de Jupiter, nécessiterait au moins dix ans d'observations. Aussi cherche-t-on d'autres planètes à l'aide du phénomène de lentille gravitationnelle, par lequel la gravité d'une étoile amplifie temporairement la lumière d'une étoile plus lointaine, située dans la même direction. Si l'étoile qui fait office de lentille cosmique possède des planètes, ces dernières pourraient modifier la courbe de lumière (la variation de l'éclat au cours du temps) observée. De nombreuses étoiles pouvant être observées en même temps, cette approche pourrait fournir une statistique de l'abondance des planètes. Malheureusement, cette méthode ne peut servir à détecter des planètes autour d'étoiles proches.

Une autre possibilité consiste à rechercher directement le rayonnement réfléchi par de grosses planètes autour d'autres étoiles. Normalement l'atmosphère terrestre rendrait irrémédiablement floue l'image de l'étoile et de la planète. L'optique adaptative, une technique qui élimine les perturbations atmosphériques, peut pallier cette difficulté. Théoriquement un système d'optique adaptative conçu par Roger Angel et amélioré par David Sandler et Steve Stahl, de la Société Thermotrex, pourrait prendre une image d'une grosse planète à la distance de Jupiter en une seule nuit d'observation.

Les planètes nouvellement découvertes ne représentent que le sommet de l'iceberg. Des observations ininterrompues, une analyse minutieuse des données et des techniques perfectionnées, telle l'interférométrie spatiale, multiplieront bientôt le nombre de découvertes, nous procurant une meilleure perception de la réelle variété de ces mondes.



sur l'observation de leur étoile : les astronomes recherchent les variations d'éclat ou d'orbite qui ne peuvent s'expliquer que par la présence de planètes. Malheureusement ces observations indirectes des planètes nous renseignent peu sur leurs caractéristiques. Toutes les techniques indirectes ne révèlent que la masse et la position des corps célestes ; prouver qu'ils abritent des habitants demeure impossible.

Voir dans l'infrarouge

Une autre technique donnerait-elle des indications sur la nature des composés présents sur les planètes ? Nous avons vu que le rayonnement d'une planète peut révéler la présence de certaines molécules vitales, telle la molécule d'oxygène. Mais repérer les faibles signaux de l'oxygène dans la lumière réfléchie par une petite planète serait extrêmement difficile, même pour un système planétaire qui serait proche du Système solaire.

Comme les étoiles sont des milliards de fois plus brillantes que les planètes qui peuvent les accompagner, la détection d'une planète par obser-

vation directe serait aussi difficile que la recherche d'un ver luisant près d'un projecteur, à des milliers de kilomètres de nous. Et si nous pouvions recueillir spécifiquement la lumière réfléchie par une planète, la signature de l'oxygène dans son spectre visible serait faible et remarquablement difficile à isoler.

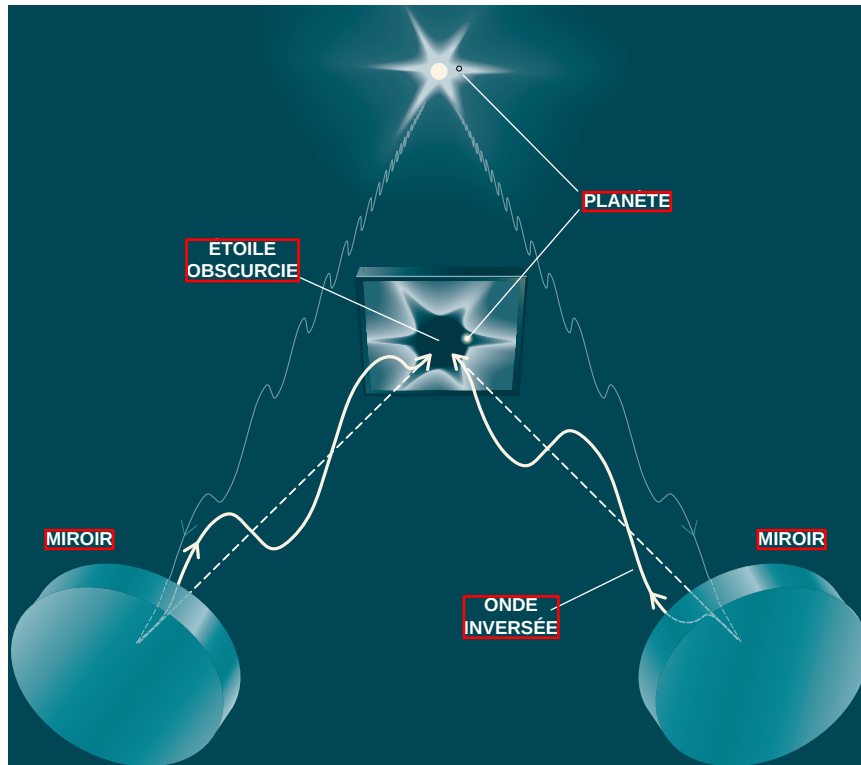
Avec Andrew Cheng, de l'Université de Hong Kong, nous avons cherché à résoudre ce problème et, en 1986, nous avons proposé de rechercher une vie extraterrestre par le rayonnement infrarouge émis par les planètes. Ce type de rayonnement, qui correspond à la chaleur dégagée par la planète, a une longueur d'onde 10 à 20 fois supérieure à celle de la lumière visible. Les planètes en émettent environ 40 fois plus qu'aux longueurs d'onde plus courtes, de sorte que l'étoile voisine n'éclipse plus la planète « que » d'un facteur dix millions : c'est 1 000 fois mieux qu'avec la lumière rouge.

En outre, le spectre infrarouge contiendrait la signature de trois composés qui apparaîtraient ensemble sur des planètes habitées : l'ozone (une forme d'oxygène habituellement loca-

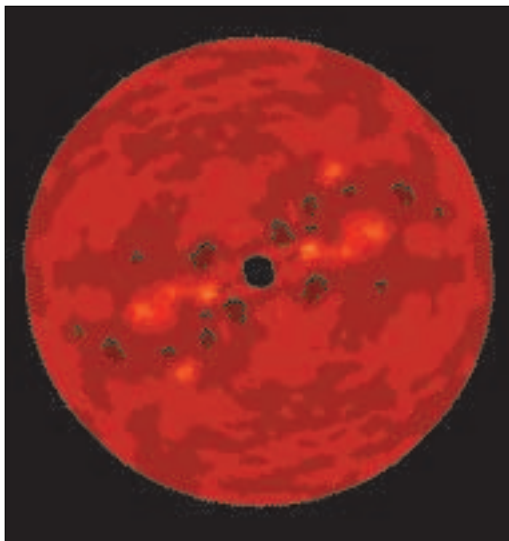
lisée dans la haute atmosphère), le dioxyde de carbone et l'eau. De nouveau, notre Système solaire a servi de banc d'essai : une étude de l'émission infrarouge des planètes de notre voisinage a montré que seule la Terre présente la signature infrarouge de la vie (voir la figure 2). Bien que la Terre, Mars et Vénus possèdent toutes trois des atmosphères contenant du dioxyde de carbone, seule la Terre porte la trace d'eau et d'ozone en abondance.

De quelle sorte de télescope avons-nous besoin pour localiser des planètes de type terrestre et analyser leurs émissions infrarouges ? Certains des télescopes qui sont aujourd'hui en fonctionnement, sur la Terre, peuvent détecter l'intense rayonnement infrarouge émanant des étoiles, mais la chaleur émise par notre atmosphère et par le télescope lui-même noierait complètement tout signal d'une planète. Même l'Antarctique n'est pas assez froid pour que nous prenions une image aussi faible. Et même si l'on refroidissait le télescope à une température inférieure à -225 degrés Celsius, la lumière s'imprégnerait des caractéristiques de l'ozone, du dioxyde de carbone et de l'eau en traversant l'atmosphère terrestre. Nous devons indéniablement transporter le télescope dans l'espace.

D'autre part, pour distinguer le rayonnement de la planète de celui de son étoile, un télescope classique devrait être beaucoup plus grand que n'importe quel instrument au sol ou en orbite construit à ce jour. La lumière ne pouvant être focalisée en un point plus petit que sa longueur d'onde, la lumière d'un point distant dans le ciel peut, au mieux, être focalisée en un centre diffus entouré d'un faible halo ; même un miroir parfait ne peut former d'images parfaites. Or si le halo circumstellaire s'étend au-delà de l'orbite de la planète, on ne discernera pas cette dernière. En accroissant la taille du miroir et celle de l'image résultante, nous pouvons en principe mettre au point autant que nous le désirons l'image de l'étoile, mais la taille de l'équipement nécessaire pour atteindre une telle résolution rend le projet irréalisable. On sait calculer la performance des télescopes et prévoir la qualité des images qu'ils formeront. Par exemple, pour observer le spectre infrarouge d'une planète terrestre tournant autour d'une étoile distante de 30 années-lumière, on devrait employer un énorme télescope spatial de près de 60 mètres de diamètre !



3. LA LUMIÈRE D'UNE PLANÈTE n'est perceptible que si l'on élimine la lumière de l'étoile autour de laquelle tourne la planète. Deux télescopes braqués sur la même étoile (en haut) peuvent éliminer la majeure partie de sa lumière si un télescope inverse la lumière, transformant les crêtes en creux, et vice versa (à droite). Lorsque la lumière inversée est combinée avec la lumière stellaire donnée par le second télescope (à gauche), les ondes lumineuses interfèrent et l'image de l'étoile disparaît (au centre).



4. L'IMAGE DE PLANÈTES LOINTAINES, obtenue à partir de signaux interférométriques simulés, montre ce que les astronomes espèrent voir avec un télescope spatial. Cette étude présente un système distant d'environ 30 années-lumière, composé de quatre planètes à peu près aussi lumineuses que la Terre (chaque planète apparaît deux fois, une image de part et d'autre de l'étoile).

Réinventer le télescope

Les télescopes classiques étant insuffisants, quel nouvel instrument peut-on utiliser ? Il y a 23 ans, à l'Université de Stanford, Ronald Bracewell montra comment adapter deux petits télescopes pour rechercher de grosses planètes froides semblables à Jupiter. L'instrument qu'il proposait se composait de deux télescopes de un mètre de diamètre, séparés de 20 mètres. Chaque télescope aurait fourni une image floue qui n'aurait jamais permis à R. Bracewell de résoudre les images faibles des planètes, mais il en imagina une astucieuse combinaison.

Il proposa de pointer les deux télescopes sur la même étoile et d'inverser les ondes lumineuses de l'un des télescopes, transformant les crêtes en creux, et vice versa. La première image étant alors l'inverse de la seconde, leur recouvrement précis annulerait la lumière de l'étoile, halo compris (l'énergie étant conservée, la lumière ne disparaîtrait pas, mais apparaîtrait dans une autre partie de l'instrument). On nomme interféromètre ce type de dispositif, qui révèle des détails de la source lumineuse à partir d'une interférence des ondes lumineuses.

L'interféromètre de R. Bracewell n'obscurcit une étoile que si celle-ci est perpendiculaire à la ligne joignant les centres des deux télescopes : c'est seulement dans cette configuration que les

deux télescopes reçoivent exactement le même train d'ondes lumineuses de l'étoile. Aussi R. Bracewell avait proposé de balayer le ciel avec l'instrument et de repérer le moment où l'étoile observée s'éteint.

À ce moment, une planète accompagnant l'étoile ne sera pas alignée avec le dispositif, de sorte que les deux télescopes enregistreront son rayonnement : si de la lumière traverse l'interféromètre alors que l'image de l'étoile est éteinte, nous saurons qu'une source de rayonnement infrarouge – peut-être une planète – existe au voisinage de l'étoile. Nous pourrions analyser ce signal en tournant l'interféromètre autour de l'axe joignant l'instrument et l'étoile ; l'intensité de l'image variera avec la rotation du dispositif, et les planètes seront repérables à une variation reconnaissable de la

luminosité (voir la figure 5).

Après avoir conçu cet interféromètre, R. Bracewell comprit que l'obstacle principal à la localisation d'une planète comme Jupiter ne venait pas de la lumière beaucoup plus intense de l'étoile voisine, mais de la chaleur rayonnée par les poussières de notre Système solaire. En raison de cette « lumière zodiacale », le faible signal d'une planète lointaine serait quasi imperceptible sur ce fond éclatant. Une planète n'apparaîtrait qu'au prix du moyennage des données sur au moins un mois. De surcroît, l'interféromètre initial de R. Bracewell n'élimine pas parfaitement la lumière stellaire, de sorte que de la lumière stellaire s'insinue le long des bords et gêne l'observation des petites planètes faibles comme la Terre.

Pour pallier ces inconvénients, de nombreux astronomes ont imaginé de nouvelles méthodes. L'un de nous (R. Angel) proposa, en 1990, d'utiliser quatre miroirs en réseau, afin de mieux supprimer la lumière stellaire. Toutefois l'élimination de la lumière zodiacale nécessitait des miroirs de huit mètres de diamètre. Alain Léger et ses collègues français M. Mariotti, J.-C. Puget, D. Rouan et J. Schneider ont proposé la première solution pratique à cette complication : ils ont imaginé d'installer le dispositif sur une orbite héliocentrique, à peu près à la même distance que Jupiter,

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES HORLOGES DE LA VIE



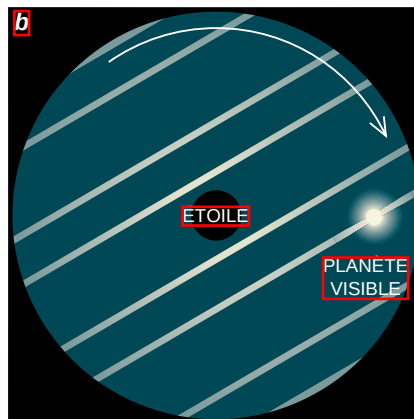
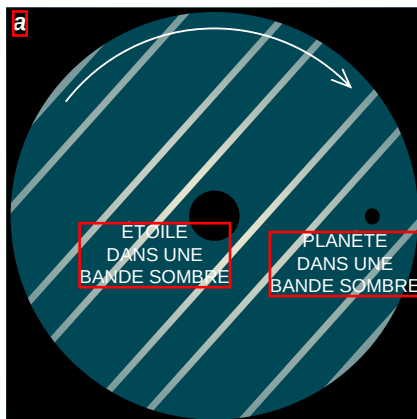
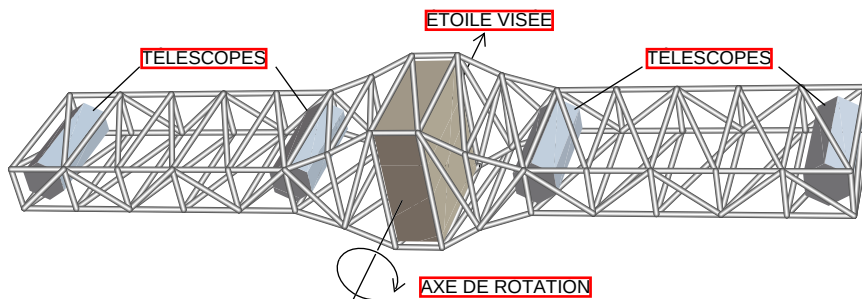
LES HORLOGES DE LA VIE

Des horloges internes déterminent la durée de notre sommeil et commandent plusieurs de nos fonctions physiologiques. Quand nous subissons un décalage horaire, ces horloges se recalent sur les variations lumineuses associées aux levers et aux couchers du soleil. L'un des meilleurs spécialistes des rythmes biologiques, Arthur Winfree, nous révèle le monde mathématique simple de ces resynchronisations.

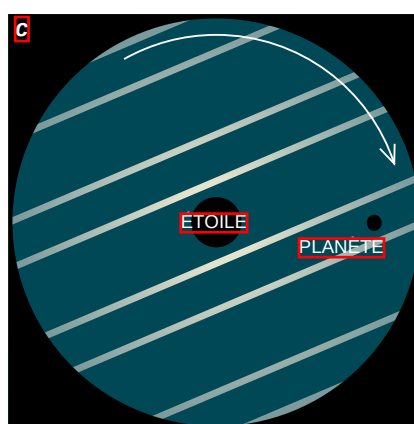
192 pages – 190 F
Code 1860

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98



5. UN INTERFEROMETRE ROTATIF pourrait révéler l'existence d'une planète autour d'une étoile lointaine. Les quatre télescopes produiraient une vue du ciel partiellement obscurcie par de nombreuses bandes ; l'étoile à masquer serait dissimulée par une bande. Lors d'une rotation de l'interféromètre autour d'un axe joignant le centre du dispositif à l'étoile, les bandes sombres tourneraient également. Une planète voisine serait alternativement masquée, puis découverte (a-c). L'analyse des clignotements permettrait de déterminer la distance séparant la planète de son étoile.



de sorte que le télescope serait naturellement refroidi et que la lumière zodiacale serait minimisée. En raison de la diminution de la lumière de fond, l'interféromètre orbital pourrait être réduit : quatre télescopes de un mètre de diamètre chacun constitueraient un instrument sensible, avec toutefois un inconvénient : il éliminerait si efficacement la lumière stellaire qu'il masquerait parfois une planète proche.

Cette idée a fait l'objet, sous le nom de *Mission Darwin*, d'une proposition de l'Agence spatiale européenne. Elle a été retenue comme l'une des trois pierres angulaires possibles de l'Agence pour les années 2015. En attendant, le CNES décidera peut-être d'un projet plus modeste, nommé *Corot*, pouvant également détecter, par occultation, des planètes de la taille de la Terre sur des orbites analogues à celle de Mercure, ou plus serrées encore.

Enfin, le 7 mai 1996, le CNRS a créé une action spécifique « Planètes extrasolaires ».

Puis, en 1995, la NASA lança un appel d'offres pour l'exploration d'autres systèmes planétaires et sélectionna finalement trois équipes afin de comparer différentes techniques de détection. Nous avons constitué une équipe avec R. Bracewell, A. Léger, Jean-Marie Mariotti et une vingtaine d'autres scientifiques et ingénieurs. Nous avons notamment conçu un interféromètre comportant deux paires de miroirs disposés en ligne droite. Chaque paire de miroirs obscurcira l'image principale de l'étoile, et chaque paire éliminera en outre la lumière parasite de l'autre paire.

Cet interféromètre pourrait atteindre 50 à 75 mètres de longueur.

Avec une telle configuration, les signaux de planètes sont complexes et caractéristiques, et une méthode d'analyse appropriée permettra d'utiliser les données de l'interféromètre pour reconstruire l'image d'un système solaire lointain (voir la figure 4). Cet interféromètre orbital pourrait observer chaque jour une étoile différente, revenant parfois à des systèmes intéressants pour des observations plus approfondies.

S'il était pointé sur notre Système solaire à partir d'une étoile voisine, l'interféromètre repèrerait Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, et l'analyse des données révélerait la composition chimique de l'atmosphère de chaque planète. De notre Système solaire, le dispositif pourra facilement étudier la planète récemment découverte autour de l'étoile 47 Ursae Majoris. De surcroît, il pourra identifier des planètes de type terrestre qui, autrement, nous échapperaient, et rechercher la présence de dioxyde de carbone, d'eau et d'ozone sur toutes ces planètes.

Un tel instrument pourrait être construit en collaboration avec des astronomes de plusieurs pays. Nous estimons le coût de ce projet à moins de deux milliards de dollars, soit dix pour cent du budget de la NASA consacré à la recherche spatiale pour les dix prochaines années. La découverte de la vie sur une autre planète serait le couronnement de l'exploration spatiale.

La technique nécessaire à cette découverte est à notre portée. Après des siècles d'interrogations, nous devrions bientôt être à même de savoir si nous sommes les seuls êtres vivants dans l'Univers.

Roger ANGEL et Neville WOOLF sont astronomes à l'Université de l'Arizona.

J. Roger P. ANGEL, *Use of a 16 Meter Telescope to Detect Earthlike Planets*, in *The Next Generation Space Telescope*, sous la direction de P. Bely et C.J. Borrows, Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1990.

La vie dans l'Univers, numéro spécial de *Pour la Science*, décembre 1994.

A. LÉGER, M. MARIOTTI, J.-C. PUGET, D. ROUAN et J. SCHNEIDER, *How Detect Signs of Primitive Life on Exoplanets, The Darwin Mission*, in *Astrophysics and Space Science*, vol. 233, janvier 1995.

La naissance des cellules complexes

CHRISTIAN DE DUVE

L'homme, les animaux, les plantes et les champignons existent parce que de minuscules bactéries primitives se sont, un jour, transformées en cellules de grande taille dotées d'une remarquable organisation.

Les premiers organismes vivants sont apparus sur la Terre il y a environ 3,7 milliards d'années, sous la forme de petits microbes unicellulaires semblables à certaines bactéries modernes. De telles cellules sont dites procaryotes, parce qu'elles sont dépourvues de noyau (en grec, *karyon* signifie noyau), le compartiment qui contient la machinerie génétique. Grâce à leur remarquable faculté d'évolution et d'adaptation, les procaryotes se sont diversifiés en une multitude d'espèces et ont colonisé tous les habitats disponibles.

La Terre serait encore exclusivement peuplée de procaryotes si un phénomène évolutif extraordinaire n'avait fait apparaître une nouvelle variété de cellules, dites eucaryotes, dotées d'un vrai noyau (en grec, *eu* signifie bien). Les conséquences de cet événement furent d'une portée exceptionnelle. Aujourd'hui, tous les organismes pluricellulaires se composent de cellules eucaryotes, immensément plus complexes que les procaryotes. Sans l'apparition des cellules eucaryotes, l'exubérante variété de la vie végétale

et animale n'existerait pas, et l'homme ne serait pas là pour jouir de cette diversité et en percer les secrets.

Les cellules eucaryotes proviennent sans doute de cellules procaryotes ancestrales, mais on ignore comment s'est effectué le passage, car aucun intermédiaire de cette transition n'a survécu ni laissé de fossiles, témoins directs. On ne peut qu'observer le produit final eucaryote, totalement différent de n'importe quelle cellule procaryote. Toutefois, grâce aux nouveaux outils dont ils disposent, les biologistes ont découvert entre certains caractères des eucaryotes et des procaryotes des parentés qui éclairent leur filiation.

Pour apprécier cet étonnant périple évolutif, on doit considérer les principales différences qui distinguent les deux types cellulaires. Les cellules eucaryotes sont beaucoup plus grandes que les procaryotes (leur volume est environ 10 000 fois supérieur), et l'information génétique y est entreposée sous une forme beaucoup plus organisée. Chez les procaryotes, tout le message génétique est concen-

tré sur un unique chromosome, qui a la forme d'un anneau d'ADN, en contact direct avec les autres constituants cellulaires. Chez les eucaryotes, la majeure partie de l'ADN est contenue dans des chromosomes structurés et regroupés à l'intérieur d'un enclos central bien délimité, le noyau. La région qui entoure le noyau, ou cytoplasme, est cloisonnée par des membranes en un réseau élaboré de compartiments qui accomplissent une multitude de fonctions. Des éléments cytosquelettiques présents dans le cytoplasme assurent aux cellules eucaryotes un support structural interne et, à l'aide de minuscules moteurs moléculaires, leur permettent de brasser leur contenu et de se propulser d'un endroit à un autre.

Les cellules eucaryotes se distinguent encore des cellules procaryotes par la présence dans leur cytoplasme d'un grand nombre – parfois des milliers – de structures spécialisées, ou organelles, dont la taille est approximative-

1. LES CELLULES PROCARYOTES ET EUARYOTES diffèrent par la taille et par leur complexité. Les cellules procaryotes (ci-contre) ont un diamètre de un micromètre environ, tandis que celui des cellules eucaryotes est compris le plus souvent entre 10 et 30 micromètres. Une cellule eucaryote, représentée ici par une algue verte hypothétique (à l'extrême droite), renferme une grande variété de structures spécialisées, dont un noyau entouré d'une enveloppe qui contient l'essentiel du patrimoine génétique de la cellule.



ment celle d'une cellule procaryote. Les plus importants de ces organites sont les peroxysomes (qui remplissent diverses fonctions métaboliques), les mitochondries (les centrales qui alimentent les cellules en énergie) et, chez les plantes et les algues, les plastides (les sites de la photosynthèse). En réalité, avec leurs multiples organites et leurs structures internes compliquées, même les eucaryotes unicellulaires, telles les levures ou les amibes, sont déjà des organismes très complexes.

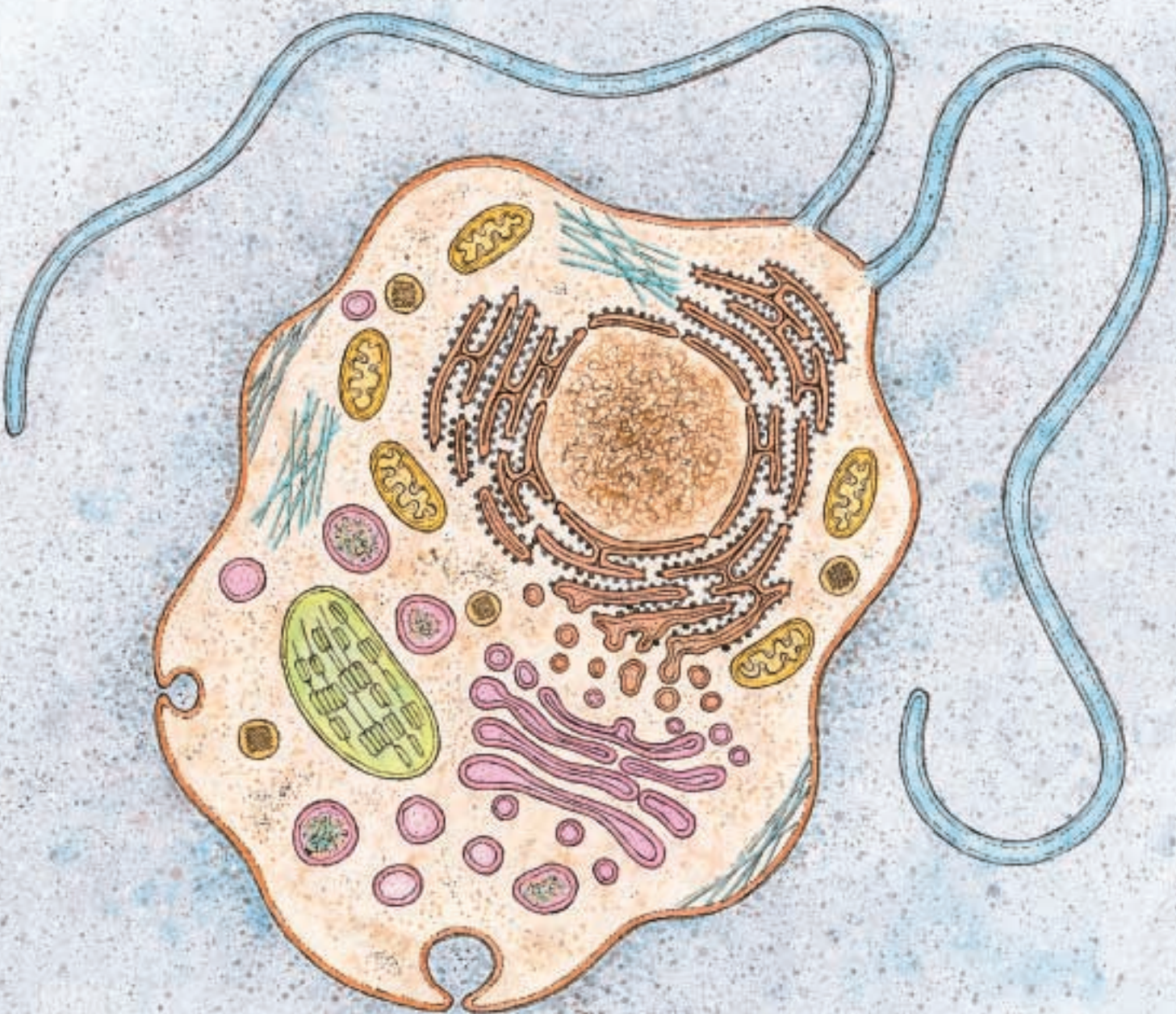
L'organisation des cellules procaryotes est beaucoup plus rudimentaire. Néanmoins, les deux types cellulaires sont indéniablement apparentés. C'est ce que démontrent leurs nombreuses similitudes génétiques. Celles-ci ont même permis de dater approximativement le moment où la branche eucaryote de l'arbre phylogénique s'est séparée du tronc procaryote. Cette divergence a probablement commencé il y a plus de trois milliards d'années. Les évé-

nements qui se sont produits ensuite, sur un milliard d'années ou plus, ont conduit aux eucaryotes ; ils seraient restés enveloppés de mystère si l'étude des nombreux organites contenus dans le cytoplasme n'avait apporté un indice révélateur.

Un repas fatidique

Les biologistes soupçonnent depuis longtemps que les mitochondries et les plastides proviennent de bactéries

CELLULE EUCARYOTE



Premières étapes de l'évolution vers une cellule eucaryote

La transformation d'une cellule procaryote en une cellule eucaryote a peut-être commencé par les étapes schématisées sur ces deux pages.

PAROI CELLULAIRE

BOUCLE D'ADN

MEMBRANE NUE

CIRCONVOLUTION

VESICULE INTRACELLULAIRE

LA PERTE DE LA PAROI CELLULAIRE a probablement été le premier événement. La cellule n'était plus délimitée que par une membrane souple où étaient fixés de nombreux ribosomes (*les points noirs*), sièges de la synthèse protéique, servant ici à l'assemblage des enzymes digestives qui sont déversées à l'extérieur.

L'APPARITION DE CIRCONVOLUTIONS dans la membrane cellulaire permet à la cellule de grossir, car les plis augmentaient la surface d'absorption des éléments nutritifs prélevés dans l'environnement (*en vert*). À ce stade, les enzymes digestives accomplissent leur travail de morcellement uniquement à l'extérieur de la cellule.

qu'une cellule hôte ancestrale aurait adoptées comme endosymbiontes (ce mot dérivé du grec signifie qui vivent ensemble, l'un dans l'autre). Émise il y a plus de 100 ans, cette hypothèse ne rencontra que peu de succès avant d'être ressuscitée, en 1967, par Lynn Margulis, alors à l'Université de Boston, qui l'a depuis défendue sans relâche contre ce qui fut d'abord une forte opposition. Aujourd'hui, sa force de persuasion n'est plus nécessaire, car on a des preuves irréfutables de l'origine bactérienne des mitochondries et des plastides.

La présence, à l'intérieur de ces organites, d'un vestige encore fonctionnel de système génétique est l'indice le plus convaincant. Ce système contient des gènes composés d'ADN, la machinerie de réplication de cet ADN, et tous les outils moléculaires nécessaires à l'élaboration de protéines à partir de modèles codés par l'ADN. Diverses propriétés caractérisent cet appareil génétique comme étant de nature procaryotique et le différencient de la machinerie génétique eucaryotique.

On présente souvent l'endosymbiose comme le résultat d'une ren-

contre aléatoire – prédation agressive, invasion pacifique, association mutuellement bénéfique ou fusion – entre deux procaryotes typiques. Toutefois, cette interprétation n'est pas satisfaisante, car les bactéries modernes ne présentent pas ces comportements. De plus, l'hypothèse d'une simple union entre deux procaryotes laisse inexplicables de nombreuses caractéristiques des cellules eucaryotes. Il existe une autre explication, beaucoup plus simple et suggérée par la nature elle-même, notamment que les endosymbiontes furent originellement ingurgités par une cellule hôte de grande taille ayant déjà acquis diverses propriétés caractéristiques des cellules eucaryotes.

De nombreuses cellules eucaryotes modernes – les leucocytes, par exemple – capturent des procaryotes. Normalement, les micro-organismes ingérés sont tués et dégradés. Parfois, ils échappent à cette destruction et se retournent contre leurs ravisseurs, lésant ou tuant ceux-ci. Exceptionnellement, ravisseur et victime survivent dans un état de tolérance réciproque, qui peut se muer en assis-

LE REPLIEMENT de la membrane vers l'intérieur lui a permis de fusionner par endroits ; les vésicules qui se sont ainsi détachées ont formé des compartiments internes isolés. Dès lors, la digestion pouvait s'effectuer à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur de la cellule. L'intériorisation du fragment de membrane où était fixé l'ADN a créé un sac porteur d'ADN, précurseur du noyau cellulaire.

tance, puis en dépendance mutuelle. C'est ainsi que les mitochondries et les plastides auraient pu devenir les invités permanents des cellules hôtes.

Si cette hypothèse est exacte, elle explique plusieurs aspects de l'évolution primitive de l'hôte. Quelque ancêtre procaryote des eucaryotes a d'abord dû évoluer en phagocyte primitif (ou cellule mangeuse), capable d'engloutir de gros objets tels que des bactéries. Si cette cellule ancienne ressemblait quelque peu aux phago-

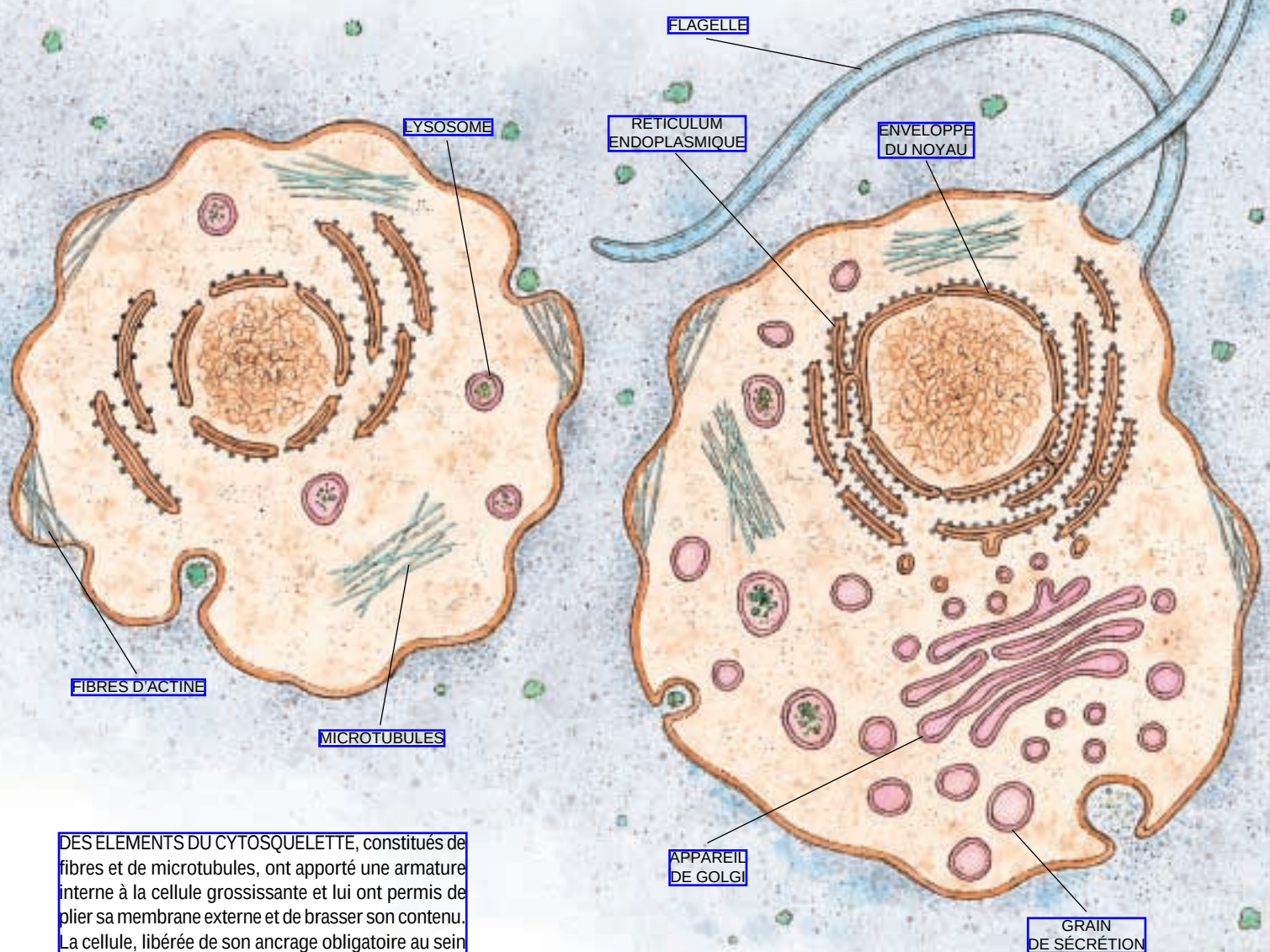
cytes modernes, elle devait être beaucoup plus grande que ses proies et entourée d'une membrane externe suffisamment souple pour envelopper des objets extracellulaires volumineux. Ce phagocyte primitif était vraisemblablement doté d'un réseau interne de compartiments reliés à la membrane externe et spécialisés dans le traitement des matériaux ingérés. Un squelette interne lui assurait sans doute un soutien structural et il possédait probablement une machinerie moléculaire lui permettant de replier sa membrane externe et de brasser ses

constituants internes. L'apparition de telles structures cellulaires constitue l'essentiel de la transition procaryote-eucaryote.

Dès lors, le principal problème qui se pose est d'expliquer d'une manière plausible l'élaboration progressive de ces caractéristiques par le jeu de la sélection naturelle : chaque petite modification a dû améliorer les chances de survie et de reproduction de la cellule, lui conférant ainsi un avantage sélectif, de telle sorte que le trait modifié se répandait de plus en plus largement dans la population.

Genèse d'une cellule mangeuse

Quelles sont les forces qui auraient pu pousser un procaryote primitif à évoluer vers une cellule eucaryote moderne? Pour répondre à cette question, je suppose tout d'abord que la cellule ancestrale se nourrissait de débris et de résidus provenant d'autres organismes, comportement que les biologistes qualifient d'hétérotrophe ; elle vivait donc dans un environnement qui lui procurait sa nourriture. Selon une hypothèse



DES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE, constitués de fibres et de microtubules, ont apporté une armature interne à la cellule grossissante et lui ont permis de plier sa membrane externe et de brasser son contenu. La cellule, libérée de son ancrage obligatoire au sein d'une source de nourriture, devint capable de happer, d'ingérer et de digérer de grandes particules. Elle finit par capturer tous ses aliments de cette façon, utilisant pour les digérer des enzymes déversées dans des sacs intracellulaires par un réseau de plus en plus étendu de compartiments internes. Certains de ces compartiments s'aplatirent et enveloppèrent l'amas croissant d'ADN.

UN PHAGOCYTE PRIMITIF, une «cellule mangeuse», finit par se développer de cette succession d'étapes évolutives. Pour se propulser, cette cellule utilisait des flagelles, des prolongements ressemblant à des fouets. Le phagocyte acquit également un vrai noyau (quand les compartiments qui entouraient l'ADN fusionnèrent), ainsi qu'un ensemble de structures cellulaires, de plus en plus élaborées, issues de fragments intériorisés de la membrane cellulaire.

séduisante, elle vivait dans le genre de colonies procaryotes dont la fossilisation a donné naissance à des roches stratifiées appelées stromatolithes. De telles colonies vivantes existent encore aujourd'hui : ce sont des couches d'organismes hétérotrophes surmontées par des organismes photosynthétiques qui se multiplient grâce à la lumière et fournissent leur nourriture aux couches inférieures. Les fossiles indiquent que de telles colonies existaient déjà il y a plus de 3,5 milliards d'années.

Ma deuxième hypothèse, corollaire de la précédente, stipule que l'organisme primitif digérait ses aliments. Je suppose qu'il le faisait, comme la plupart des procaryotes hétérotrophes modernes, à l'aide d'enzymes sécré-

tées qui dégradent les aliments à l'extérieur de la cellule : la digestion précédait l'ingestion.

Enfin, troisième hypothèse, cet organisme aurait perdu la capacité de fabriquer une paroi cellulaire, enveloppe rigide qui entoure presque tous les procaryotes, en maintenant la structure et en assurant la protection. Nonobstant leur fragilité, des formes dénudées de ce genre existent naturellement aujourd'hui, parfois même dans des environnements défavorables. Dans le cas présent, la colonie de stromatolithes aurait offert un excellent abri à l'organisme ancestral.

Ces trois hypothèses admises, on imagine cet organisme comme un petit globule aplati et souple, hautement déformable et en contact étroit avec

sa source de nourriture. Une telle cellule devrait pouvoir se développer mieux et plus vite que ses parentes entourées par une paroi rigide, sans cependant répondre nécessairement à la croissance par la division, comme c'est le cas pour les autres cellules. Un autre comportement aurait pu être l'expansion et le plissement de la membrane externe, permettant ainsi une augmentation de la surface disponible pour l'ingestion des substances nutritives et pour l'élimination des déchets (facteurs qui limitent la croissance de toute cellule).

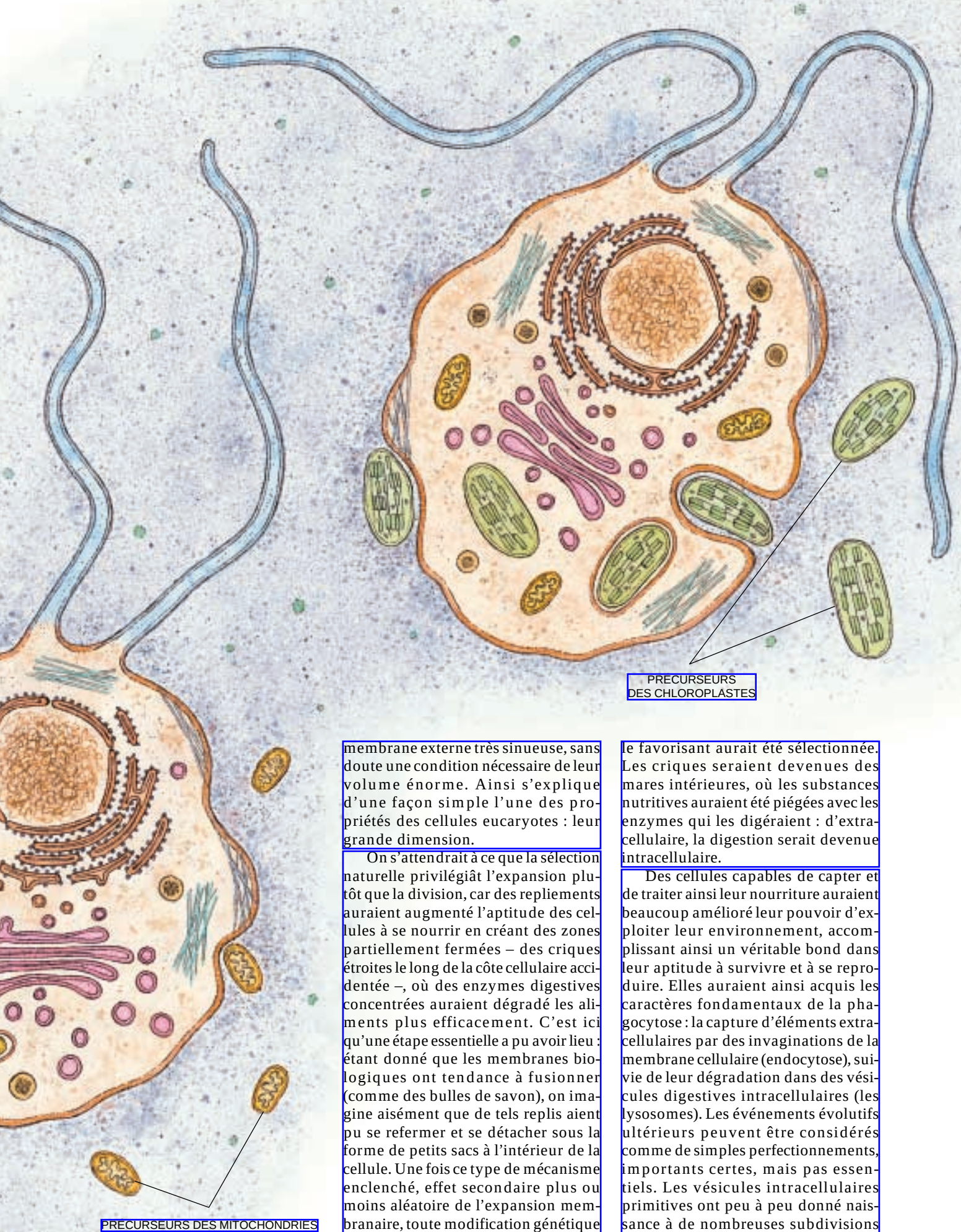
Grâce à sa surface plissée, cet organisme aurait pu atteindre une taille bien supérieure à celle des procaryotes ordinaires. Effectivement, certains procaryotes géants modernes ont une

Les dernières étapes de l'évolution d'une cellule eucaryote

L'adoption de procaryotes en tant qu'«invités permanents» de volumineux phagocytes a marqué la dernière phase de l'évolution des cellules eucaryotes. Les précurseurs des peroxysomes (*en beige*, à gauche) ont peut-être été les premiers procaryotes à évoluer en organites eucaryotes. Ils rendaient inoffensifs les composés toxiques créés par la teneur croissante en oxygène de l'atmosphère. Les précurseurs des mitochondries (*en jaune*, au centre) se sont révélés encore plus efficaces pour protéger les cellules hôtes contre l'oxy-

gène, avec comme avantage supplémentaire un approvisionnement abondant en adénosine triphosphate (ATP), des molécules riches en énergie. L'apparition des peroxysomes et des mitochondries a ensuite permis l'adoption des précurseurs des plastides, tels les chloroplastes (*en vert*, à droite), les centres de la photosynthèse productrice d'oxygène. Cette dernière étape bénéficia à la cellule hôte en lui permettant de fabriquer de la matière organique à l'aide de l'énergie de la lumière solaire.

PRÉCURSEURS DES PEROXYSOMES



PRECURSEURS
DES CHLOROPLASTES

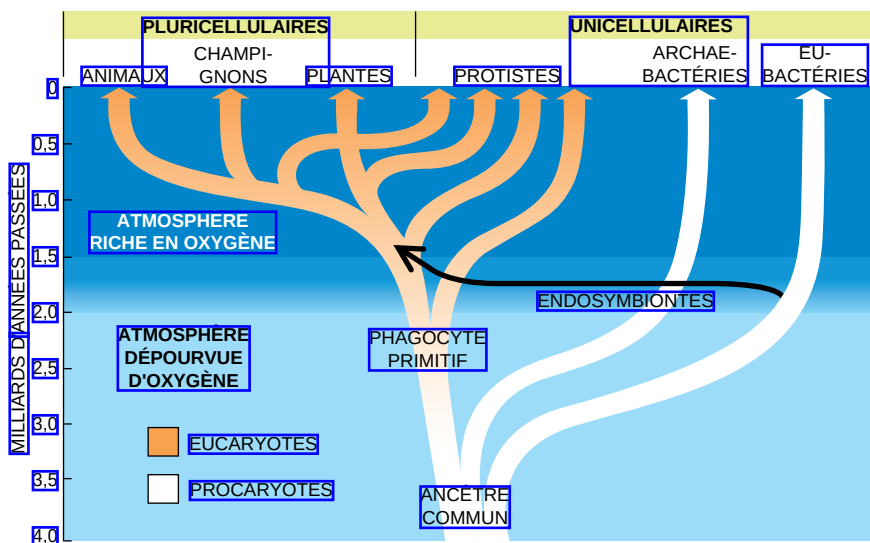
membrane externe très sinueuse, sans doute une condition nécessaire de leur volume énorme. Ainsi s'explique d'une façon simple l'une des propriétés des cellules eucaryotes : leur grande dimension.

On s'attendrait à ce que la sélection naturelle privilégiait l'expansion plutôt que la division, car des repliements auraient augmenté l'aptitude des cellules à se nourrir en créant des zones partiellement fermées – des criques étroites le long de la côte cellulaire accidentée –, où des enzymes digestives concentrées auraient dégradé les aliments plus efficacement. C'est ici qu'une étape essentielle a pu avoir lieu : étant donné que les membranes biologiques ont tendance à fusionner (comme des bulles de savon), on imagine aisément que de tels replis aient pu se refermer et se détacher sous la forme de petits sacs à l'intérieur de la cellule. Une fois ce type de mécanisme enclenché, effet secondaire plus ou moins aléatoire de l'expansion membranaire, toute modification génétique

le favorisant aurait été sélectionnée. Les criques seraient devenues des mares intérieures, où les substances nutritives auraient été piégées avec les enzymes qui les digéraient : d'extracellulaire, la digestion serait devenue intracellulaire.

Des cellules capables de capter et de traiter ainsi leur nourriture auraient beaucoup amélioré leur pouvoir d'exploiter leur environnement, accomplissant ainsi un véritable bond dans leur aptitude à survivre et à se reproduire. Elles auraient ainsi acquis les caractères fondamentaux de la phagocytose : la capture d'éléments extracellulaires par des invaginations de la membrane cellulaire (endocytose), suivie de leur dégradation dans des vésicules digestives intracellulaires (les lysosomes). Les événements évolutifs ultérieurs peuvent être considérés comme de simples perfectionnements, importants certes, mais pas essentiels. Les vésicules intracellulaires primitives ont peu à peu donné naissance à de nombreuses subdivisions

PRECURSEURS DES MITOCHONDRIES



2. CET ARBRE PHYLOGENIQUE retrace les principaux événements de l'histoire de la vie. Cette chronologie, bien acceptée par la communauté scientifique, a été récemment remise en cause par Russell Doolittle et ses collègues de l'Université de Californie à San Diego, qui affirment que le dernier ancêtre commun de tous les organismes vivants existait il y a à peine plus de deux milliards d'années.

spécialisées, formant le système cytomembranaire, caractéristique des cellules eucaryotes modernes. Le fait qu'on trouve dans le système cytomembranaire des cellules eucaryotes de nombreux éléments qui appartiennent à la membrane cellulaire chez les procaryotes constitue un argument puissant en faveur du modèle proposé.

Fait intéressant, la genèse du noyau – apanage des cellules eucaryotes – peut aussi s'expliquer, du moins schématiquement, comme liée à l'intériorisation d'une partie de la membrane cellulaire externe. Dans les procaryotes, le chromosome d'ADN circulaire est fixé à la membrane cellulaire. Le repliement de cette portion de la membrane aurait créé un sac intracellulaire portant le chromosome à sa surface. Une telle structure pourrait avoir été à l'origine du noyau eucaryote, qu'entoure une double membrane issue d'éléments aplatis du système cytomembranaire intracellulaire, qui ont fusionné pour donner une enveloppe sphérique.

Ce scénario explique comment un petit procaryote pourrait avoir évolué en une cellule géante dotée de quelques-unes des caractéristiques des cellules eucaryotes, notamment un noyau bien délimité, un vaste réseau de membranes internes et la capacité d'ingérer de la nourriture et de la digérer intérieurement. Une telle progression aurait pu se faire par un très grand nombre d'étapes presque imperceptibles, dont chacune augmentait

l'autonomie de la cellule et lui conférait un avantage sélectif. Toutefois, il y avait une condition : ayant perdu la protection de son enveloppe externe rigide, la cellule avait besoin de supports internes suffisants pour sa taille croissante.

Les cellules eucaryotes modernes sont consolidées par des structures fibreuses et tubulaires, souvent associées à de minuscules dispositifs propulseurs qui permettent aux cellules de se déplacer et animent leur trafic intérieur. Chez les procaryotes, on ne trouve aucune des nombreuses protéines qui assurent ces fonctions. Ainsi, la mise en place du cytosquelette a dû nécessiter un grand nombre d'authentiques innovations. On ignore tout de ces événements évolutifs fondamentaux, sinon qu'ils ont vraisemblablement accompagné, souvent en en fixant l'allure, l'accroissement de la cellule et l'expansion de sa membrane.

Au terme de ce long parcours se trouvait le phagocyte primitif : une cellule organisée efficacement pour se nourrir de bactéries, un chasseur puissant qui n'était plus condamné à résider au sein de sa source alimentaire, mais qui était libre de parcourir le monde et de poursuivre activement ses proies, une cellule prête, le moment venu, à héberger des endosymbiontes.

On peut imaginer que de telles cellules, encore dépourvues de mitochondries et autres organites caractéristiques des eucaryotes d'au-

jourd'hui, aient pu coloniser des niches variées, les peuplant d'une descendance diversement adaptée. Et, cependant, la totalité – ou la quasi-totalité – de ces lignées évolutives ont disparu. On connaît quelques eucaryotes unicellulaires dépourvus de mitochondries, mais on ne peut exclure que leurs ancêtres en aient eues autrefois, puis qu'ils les aient perdues. Tous les eucaryotes pourraient donc être issus de phagocytes primitifs qui adoptèrent des précurseurs de mitochondries. Encore que la question reste sujette à discussion, on admet généralement que toutes les mitochondries ont la même origine. Il semble que l'acquisition de mitochondries ait empêché une lignée eucaryote de disparaître, ou lui ait conféré un avantage sélectif tel qu'il aurait entraîné l'extinction de presque tous les autres eucaryotes. Pourquoi les mitochondries ont-elles eu une telle importance?

Extermination par l'oxygène

Aujourd'hui, la principale fonction des mitochondries est d'assurer la combustion des substances nutritives à l'aide d'oxygène, avec l'assemblage simultané de molécules d'adénosine triphosphate (ATP), riches en énergie. La vie est suspendue à ce mécanisme : c'est la principale source d'énergie de la grande majorité des organismes vivants, ceux dits aérobies, c'est-à-dire qui ont besoin d'air pour vivre. Pourtant, lorsque les premières cellules sont apparues sur la Terre, l'atmosphère ne contenait pas d'oxygène. L'oxygène moléculaire libre est un sous-produit de la vie et n'apparut qu'avec les cyanobactéries, des micro-organismes photosynthétiques qui utilisent l'énergie solaire pour extraire de molécules d'eau l'hydrogène qui leur est nécessaire pour l'élaboration de leur propre substance, libérant ainsi de l'oxygène moléculaire. La concentration en oxygène de l'atmosphère commença à être appréciable il y a environ deux milliards d'années, puis augmenta progressivement pour se stabiliser il y a à peu près 1,5 milliard d'années.

Avant l'apparition de l'oxygène atmosphérique, toutes les formes de vie devaient être adaptées à un milieu dépourvu d'oxygène (anaérobie) et étaient sans doute très sensibles à l'oxygène, comme le sont les organismes

anaérobies modernes. Au sein des cellules, l'oxygène donne facilement naissance à plusieurs groupes chimiques toxiques, dont l'ion superoxyde, le radical hydroxyle et le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée).

Lorsque la concentration en oxygène s'est élevée, il y a deux milliards d'années, de nombreux organismes primitifs ont vraisemblablement été victimes d'une extermination par l'oxygène. Les cellules qui ont survécu sont celles qui ont trouvé refuge dans des zones privées d'oxygène ou qui avaient acquis un moyen de résister à sa toxicité.

D'après une hypothèse attrayante, peut-être le précurseur phagocytaire des eucaryotes était-il anaérobie et dut-il son salut aux ancêtres aérobies des mitochondries, qui, non seulement pouvaient transformer l'oxygène nocif en eau inoffensive, mais en faisaient même un allié indispensable. Cette théorie expliquerait élégamment l'effet salvateur apparent des mitochondries.

Toutefois, elle soulève une question. Selon toute vraisemblance, l'adaptation à l'oxygène a dû être progressive et commencer avec des systèmes primitifs de détoxification. Elle doit avoir exigé un temps considérable pour atteindre l'efficacité des mitochondries actuelles. Cela étant, comment les phagocytes anaérobies ont-ils survécu pendant toute la période d'évolution des ancêtres des mitochondries?

Les peroxysomes pourraient être une réponse à cette question : ce sont des organites utilisateurs d'oxygène caractéristiques des cellules eucaryotes et aussi répandus dans le monde animal et végétal que les mitochondries, mais dont la structure et la composition sont beaucoup plus rudimentaires. Comme les mitochondries, les peroxysomes assurent de nombreuses réactions métaboliques oxydatives, mais, contrairement aux mitochondries, ils n'utilisent pas l'énergie libérée par ces réactions pour former de l'ATP, mais la dissipent en chaleur. Pour ce faire, ils transforment l'oxygène en eau oxygénée, qui est détruite ensuite par une enzyme, la catalase. Les peroxysomes contiennent également une enzyme qui élimine les ions superoxyde. Ce sont là des qualités qui conviennent parfaitement aux premiers défenseurs contre la toxicité de l'oxygène.

J'ai fait cette suggestion pour la première fois en 1969, alors que l'on considérait encore les peroxysomes comme faisant partie du système cytomembranaire. J'ai donc inclus les peroxysomes dans le modèle d'expansion membranaire que j'avais proposé pour le développement du phagocyte primitif. Ultérieurement, des expériences réalisées par mes collègues de l'Université Rockefeller, Brian Poole (aujourd'hui décédé) et Paul Lazarow, démontrèrent que les peroxysomes sont totalement indépendants du système cytomembranaire : ils acquièrent leurs protéines par un mécanisme identique à celui qui fonctionne dans les mitochondries et les plastides. Dès lors, on pouvait imaginer que les trois types d'organites avaient d'abord été des endosymbiontes. C'est pourquoi, en 1982, j'ai modifié ma première hypothèse et proposé que les peroxysomes proviendraient de bactéries aérobies primitives qui auraient été adoptées avant les mitochondries. Ces défenseurs primitifs auraient protégé leurs cellules hôtes contre l'oxygène toxique pendant toute la période qui a été nécessaire aux ancêtres des mitochondries pour acquérir l'efficacité qu'ils possédaient à l'époque où ils ont été adoptés.

Jusqu'à présent, aucune preuve n'est venue confirmer ni infirmer cette hypothèse. Contrairement aux mitochondries et aux plastides, les peroxysomes ne contiennent pas de vestiges d'un génome indépendant. Toutefois, cela n'est pas incompatible avec la théorie stipulant que les peroxysomes sont issus d'un endosymbionte : les mitochondries et les plastides ont perdu la plupart de leurs gènes au profit du noyau, et les peroxysomes, encore plus anciens, pourraient les avoir tous perdus.

Quelle que soit leur origine, les peroxysomes peuvent fort bien avoir permis aux premiers eucaryotes de résister à l'oxygène, ce qui expliquerait leur omniprésence. L'adoption ultérieure des mitochondries s'expliquerait par le gain d'énergie utilisable assuré par le couplage de la consommation d'oxygène à la formation d'ATP. Les mitochondries ont en outre l'avantage de maintenir la concentration environnante en oxygène très inférieure à celle qu'assurent les peroxysomes.

Pourquoi les peroxysomes n'ont-ils pas disparu après la mise en place

LA FIN

DU MONDE

ANTÉDILUVIEN

Livre de F. R. Trestournel

de 216 pages, 29 figures

et 8 hiéroglyphes en couleurs.

Où il est montré et démon-

tré qu'à l'extrême fin du

Tertiaire, une planète a

fracassé la Terre primitive

(l'Éden) :

• la dérive des continents

• la surrection du grand

Plissement alpin

• la formation des océans,

de l'océan Pacifique

et des guirlandes d'îles

circumpacifiques

• l'inclinaison de l'axe

de rotation de la Terre...

• le déluge ; l'origine

des sentiments religieux

et des religions

monothéistes : juive,

chrétienne et islamique.

Commandez ce livre

à votre libraire ou aux

Éditions Charles Corlet

14110 Condé-sur-Noireau

Prix : 100F

des mitochondries? Il est vraisemblable que, lorsque les cellules eucaryotes ont acquis leurs mitochondries, certaines activités des peroxy-somes, par exemple le métabolisme de certains acides gras, étaient devenues tellement vitales que la sélection naturelle ne les a pas éliminés. C'est pourquoi on trouve aujourd'hui peroxy-somes et mitochondries ensemble dans la plupart des eucaryotes.

Les plastides sont d'autres organites issus d'endosymbiontes ; les principaux représentants en sont les chloroplastes, ces organites verts assurant la photosynthèse des algues unicellulaires et des végétaux pluricellulaires. Les plastides dérivent de cyanobactéries, les procaryotes responsables de la crise de l'oxygène. Ils ont probablement été adoptés comme endosymbiontes après les mitochondries. Les avantages sélectifs qui ont favorisé l'adoption d'endosymbiontes photosynthétiques sont évidents : des cellules qui, auparavant, avaient eu besoin d'un approvisionnement régulier en substances nutritives se contentaient désormais d'air, d'eau, de quelques minéraux solubles et de lumière. En réalité, on a la preuve que l'acquisition de plastides par des cellules eucaryotes a eu lieu indépendamment au moins trois fois, ce qui a donné naissance aux algues vertes, aux algues rouges et aux algues brunes. Les membres du premier groupe ont donné les végétaux pluricellulaires.

De la prison à l'esclavage

Ce qui fut d'abord une trêve fragile devint bientôt un esclavage progressif des endosymbiontes prisonniers de leurs hôtes phagocytaires. Cet asservissement fut accompli par le transfert de la plupart des gènes des endosymbiontes dans le noyau de la cellule hôte. En soi, la capture de gènes par un noyau n'est pas extraordinaire. Quand on introduit des gènes étrangers dans le cytoplasme d'une cellule (comme dans les expériences de biotechnologie), ils pénètrent dans le noyau et y fonctionnent : ils se répliquent au cours de la division cellu-



3. QUATRE ORGANITES sont visibles dans une cellule de feuille de tabac. Les deux chloroplastes (à gauche et en bas) et la mitochondrie (au centre, à droite) sont issus d'endosymbiontes procaryotes. Le peroxy-some (au centre), qui contient une volumineuse inclusion cristalline, sans doute constituée d'une enzyme, la catalase, pourrait provenir également d'un endosymbionte.

laire et s'expriment sous la forme des protéines correspondantes. Toutefois, la migration de gènes d'endosymbiontes vers le noyau est étonnante, car elle semble avoir soulevé plus de difficultés qu'elle n'en a résolues. Une fois les gènes transférés, les protéines qu'ils codaient ont commencé à être synthétisées dans le cytoplasme de la cellule hôte, où s'élaborent tous les produits des gènes nucléaires. Ces molécules ont dû migrer à l'intérieur de l'endosymbionte pour être utiles. Ce scénario, en apparence improbable, a non seulement résisté aux aléas de l'évolution, mais s'est même révélé si avantageux que tous les endosymbiontes qui avaient conservé des copies des gènes transférés finirent par disparaître.

Aujourd'hui, les mitochondries, les plastides et les peroxy-somes acquièrent leurs protéines du cytoplasme environnant avec l'aide de structures de transport complexes localisées dans leurs membranes. Ces structures reconnaissent des portions de protéines nouvellement synthétisées comme des «étiquettes» spécifiques de chaque organite. La machinerie de transport permet alors aux molécules concernées de traverser la membrane avec l'aide d'énergie et de protéines spécialisées, qui ont reçu le nom suggestif de chaperons. Ces systèmes de transport qui font pénétrer dans les organites des protéines synthétisées à l'extérieur

sont peut-être issus de systèmes servant à la sécrétion des protéines, qui étaient présents originellement dans les membranes des endosymbiontes. Alors la polarité des systèmes a dû être inversée, dirigée désormais de l'extérieur vers l'intérieur.

L'adoption d'endosymbiontes a certainement joué un rôle essentiel dans la naissance des eucaryotes. Toutefois l'événement clé, celui qui a requis beaucoup plus d'innovations évolutives, a été le mécanisme long et mystérieux qui a rendu ces acquisitions possibles : la lente transformation, pendant un milliard d'années ou plus, d'un ancêtre procaryote en un gros microbe phagocytaire doté de la plupart des attributs des cellules eucaryotes modernes. La science commence à lever le voile qui entoure cette transformation prodigieuse sans laquelle une bonne part du monde vivant, dont l'homme, n'existerait pas.

Christian de DUVE a partagé le prix Nobel de physiologie ou de médecine, en 1974, avec Albert Claude et George Palade pour «leurs découvertes concernant l'organisation structurale et fonctionnelle des cellules». Il est professeur émérite de biochimie à l'Université de Louvain et à l'Université Rockefeller, à New York. En Belgique, il a fondé l'International Institute of Cellular and Molecular Pathology (ICP).

Christian de DUVE, *Les microcorpuscules de la cellule vivante*, in *Pour la Science*, n° 69, juillet 1983.

Christian de DUVE, *Une visite guidée de la cellule vivante*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1987 ; collection «L'Univers des Sciences», éditions *Pour la Science*, diffusion Belin, Paris, 1987.

T. CAVALIER-SMITH, *The Origin of Eukaryote and Archaeobacterial Cells*, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 503, pp. 17-54, juillet 1987.

Christian de DUVE, *Construire une cellule : Essai sur la nature et l'origine de la vie*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1990 ; InterÉditions, Paris, 1990.

Christian de DUVE, *Poussière de vie : Une histoire du vivant*, Éditions Fayard, Paris, 1996.

La matrice magique de Markov

Soit M , la matrice de transition entre deux états de distribution des probabilités. Si la distribution des probabilités à un moment du jeu est donnée par une colonne de 40 nombres, la distribution des probabilités après un jet de dé est donnée par le produit de la matrice M par cette colonne. Nous calculerons tout d'abord un ensemble de 40 nombres nommés valeurs propres de M . Un nombre m est une valeur propre de M si l'on peut écrire une colonne de 40 nombres, nommée vecteur propre, telle que si l'on multiplie la matrice M à cette colonne, on retrouve la colonne initiale multipliée par le nombre m . Comme cette matrice possède une structure particulière (voir la figure 3), on peut effectuer sa multiplication avec la colonne sans connaître l'algèbre ! Écrivons chaque nombre de la colonne sur les 40 cases de la représentation mathématique du jeu. La multiplication de la matrice par la colonne est obtenue en séparant chaque nombre en six parties égales que l'on place parmi les six cases suivantes. Le problème est que les valeurs propres ne sont pas nécessairement des réels compris entre 0 et 1 : elles peuvent être des nombres complexes, de la forme $a + ib$, avec $i^2 = -1$.

Lorsque les 40 valeurs propres sont déterminées, il ne reste qu'à trouver la plus grande (en module, en raison du caractère complexe de certaines valeurs propres). La dis-

tribution des probabilités sera alors approchée d'aussi près que l'on voudra par le vecteur propre correspondant «normalisé», c'est-à-dire tel que la somme de ses composantes soit égale à 1, comme toute probabilité qui se respecte. Il suffit pour cela de diviser chaque composante par la somme de toutes les autres.

En raison des symétries de la matrice, il est relativement aisé de déterminer les valeurs propres, et donc les vecteurs propres. Un de ces vecteurs propres a toutes ses composantes égales à $1/40$: quelle est la valeur propre associée ? Supposons que nous partions de cette distribution des probabilités : la probabilité de tomber sur n'importe quelle case du plateau de jeu est égale à $1/40$. Pour chaque case, partageons alors $1/40$ en 6 parties égales, soit $1/240$, et plaçons $1/240$ sur les six cases suivantes. Chaque case recevra alors exactement six contributions égales dont la somme sera $6 \times 1/240$, soit $1/40$. La valeur propre associée est donc égale à 1. Je n'explicitai pas les 39 autres valeurs propres, dont les expressions sont superbes (du moins pour le mathématicien !). Hormis la valeur propre égale à 1, la deuxième valeur propre dans l'ordre décroissant est égale à $0,964\dots$, de sorte que 1 est celle de plus grand module et son vecteur propre représente l'état à long terme de la distribution des probabilités.

ment, nous allons simplifier le problème. Au lieu de considérer le jet simultané des deux dés, nous imaginerons que les dés sont lancés l'un après l'autre. Chaque joueur jette donc les dés en deux coups : un coup fantôme, pour lequel il ne tient pas compte de la case où il atterrit, et un coup réel. De surcroît, nous représenterons le plateau de jeu comme un cercle (voir la figure 1).

Par commodité, numérotons les cases de 0 à 39, la case 40 coïncidant avec la case 0, la case «Départ». Nous considérerons ces nombres comme des

entiers modulo 40 : tout entier supérieur à 39 est remplacé par le reste de la division de cet entier par 40. Imaginons à présent un unique joueur qui effectue des jets successifs d'un dé unique et se qui se déplace en conséquence. Quelle est alors la probabilité de tomber sur une case donnée après un nombre donné de jets ? Pour chaque case, on espère que, lorsque le nombre de jets croît, cette probabilité s'approche de $1/40$. En d'autres termes, les événements «atterrir sur une case du plateau de jeu» devraient devenir équiprobables.

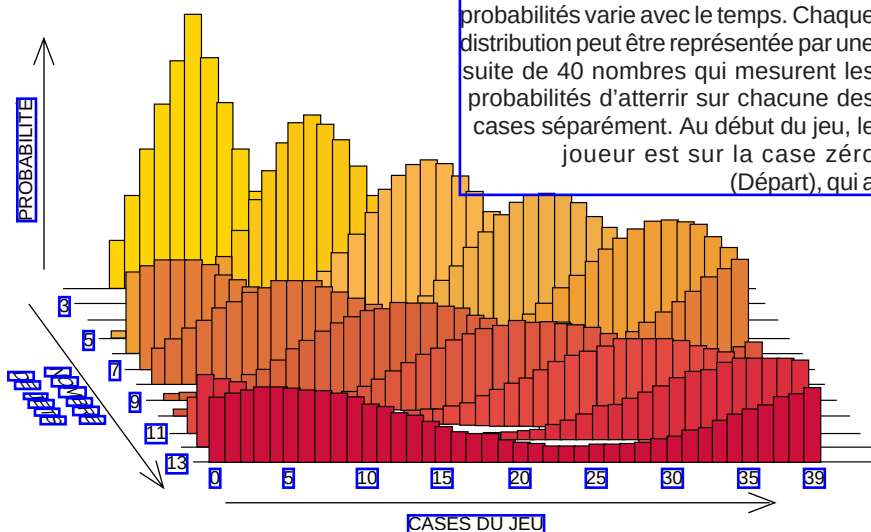
Étudions comment la distribution des probabilités varie avec le temps. Chaque distribution peut être représentée par une suite de 40 nombres qui mesurent les probabilités d'atterrir sur chacune des cases séparément. Au début du jeu, le joueur est sur la case zéro (Départ), qui a

donc la probabilité 1. La distribution des probabilités est donc 1 pour la case «Départ», puis des zéros pour les 39 cases suivantes. Après un premier jet fantôme, la distribution devient 0, $1/6$, $1/6$, $1/6$, $1/6$, $1/6$, 0, ..., 0 : la probabilité d'atterrir sur les cases numérotées de 1 à 6 est égale à $1/6$, et les autres cases sont inaccessibles.

LA RÉPARTITION DES PROBABILITÉS

Notez que la probabilité totale 1, d'abord concentrée sur la case 0, s'est répartie en six parties égales, sur les cases 1 à 6. C'est le mécanisme général : après chaque jet de dé, la probabilité de tomber sur chaque case est divisée en six parties égales, qui sont distribuées aux six cases qui la suivent. Ainsi, au deuxième jet, la probabilité de $1/6$ de la case 1 est redistribuée comme suit : 0, 0 , $1/36$, $1/36$, $1/36$, $1/36$, $1/36$, $1/36$, 0, ..., 0. Les probabilités de $1/6$ des cases 2 à 6 sont de même redistribuées, après décalage d'une case à chaque étape.

Finalement, on ajoute sur chaque case les redistributions des cases précédentes. Par exemple, la case 6 reçoit $1/36$ de chacune des cases 1 à 5 et 0 de la dernière, d'où un total de $5/36$. La distribution après le deuxième jet de dé est : 0, 0, $1/36$, $2/36$, $3/36$, $4/36$, $5/36$, $6/36$, $6/36$, $5/36$, $4/36$, $3/36$, $2/36$, $1/36$, 0, ..., 0. Nous retrouvons là notre évaluation initiale pour un jet à deux dés. Poursuivons avec le troi-



2. L'évolution de la répartition de probabilité sur les 40 cases du jeu est représenté au cours de 13 jets de dé. La hauteur de chaque rectangle indique la probabilité d'atterrir sur la case correspondante.

	0	1	2	3	...	39
0	0	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
1	0	0	1/6	1/6	1/6	1/6
2	0	0	0	1/6	1/6	1/6
...	...	...	...	...	...	...
32	0	...	0	1/6	1/6	1/6
33	0	...	0	1/6	1/6	1/6
34	1/6	0	...	0	1/6	1/6
35	1/6	1/6	0	...	0	1/6
36	1/6	1/6	1/6	0	...	1/6
37	1/6	1/6	1/6	1/6	0	...
38	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	0
39	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6

3. LA MATRICE DE MARKOV permet de calculer la transition de la distribution des probabilités, provoquée par un jet de dé.

sième jet (fantôme). Nous multiplions chaque probabilité par 1/6 et plaçons ces produits sur les 6 cases suivantes. Puis, sur chaque case, nous ajoutons les nombres acquis et obtenons la distribution des probabilités après 3 jets de dé.

Il est aisé d'écrire un programme informatique qui calcule l'évolution de la distribution des probabilités. Les résultats sont représentés sur la figure 2 ; au fond est représentée la distribution triangulaire du deuxième jet. À chaque jet, le graphe se déplace de un pas dans la figure. On observe que le pic de probabilité se déplace de plusieurs cases vers la droite à chaque jet. En moyenne, il se déplace de la moyenne arithmétique des nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, soit trois cases et demie. Si l'on poursuit la simulation, on observe que la forme triangulaire s'arrondit et s'élargit. Finalement, le pic s'estompe et toutes les probabilités sont à peu près égales. Pourquoi une telle évolution ?

Pour l'expliquer, utilisons la théorie de Markov, qui fournit une méthode systématique pour suivre l'évolution des probabilités. Commençons par écrire la matrice de transition entre deux états. Cette matrice, M , est un tableau carré de 40 lignes et 40 colonnes, chacune numérotée de 0 à 39. À l'intersection de la ligne l et de la colonne c , on écrit la probabilité de se déplacer, en un jet de dé, de la case l à la case c . C'est donc 1/6 si $c = l + 1, l + 2, \dots, l + 6$, et zéro autrement (voir la figure 3). Ensuite, un calcul technique effectué sur la matrice (voir l'encadré) permet de calculer l'évolution de la distribution des probabilités. Le résultat montre qu'après de nombreux jets, la probabilité pour chaque case approche bien 1/40.

Ainsi, avec l'aide discrète de Markov, pouvons-nous prouver qu'un jeu aussi compliqué que le Monopoly est équitable. Bien sûr, le premier joueur conserve un léger avantage atténué par la finitude de son compte en banque.

Ravitaillement en vol

Photos: Xavier Ferrer et Adolfo de Sostoa
Texte: Xavier Ferrer



Pour aspirer le nectar des fleurs qui les nourrissent, les colibris volent sur place : leurs ailes battent de haut en bas et d'avant en arrière, traçant une sorte de huit horizontal. Ces oiseaux, dont on connaît environ 320 espèces, ont développé leurs capacités de vol au détriment des autres modes de locomotion : ils sont incapables de marcher, même sur quelques centimètres.

Leur métabolisme consomme beaucoup d'énergie et d'oxygène comparativement à leur poids : selon les espèces, le rythme cardiaque de ces oiseaux varie entre 500 et 1 300 pulsations par minute. Outre le nectar, ils dévorent aussi des insectes, qu'ils peuvent même happer en vol à l'aide de leur langue. La nuit, ils économisent de l'énergie en tombant dans une sorte de léthargie : leur température corporelle chute et leur rythme cardiaque passe à 40 pulsations par minute.

Les fleurs ne nourrissent pas gratuitement les colibris : elles leur confient leur pollen afin qu'ils le répandent et assurent leur reproduction. Les fleurs adaptées à cette pollinisation sont de couleur rouge ou jaune vif : la coloration rouge est particulièrement repérable par les colibris. Elles fleurissent librement et abondamment, sans feuilles ni brindilles gênantes. Leur nectar, au plus profond de la fleur, n'est accessible qu'aux oiseaux à long bec. Les étamines et le pistil sont situés de telle manière que le pollen est déposé sur la tête, la gorge ou le bec de l'oiseau, et facilement recueilli ensuite par la fleur.

La fleur papilionacée du flamboyant (*Erythrina crista-galli*), un arbre de la famille des légumineuses, attire ainsi des colibris, ici un oiseau-mouche cuivré (*Myiodynastes chrysus*). Cet arbre pousse dans une grande partie de l'Amérique du Sud, principalement dans des zones ouvertes très humides, parfois inondées, et dans la forêt galerie.

Nous avons mis cinq heures pour réaliser ces clichés, dans un bosquet de flamboyants en fleurs qui occupait une dépression, en Uruguay. Nous avons utilisé un téléobjectif de 300 millimètres et un flash : la vitesse à laquelle l'oiseau bat des ailes requiert une grande vitesse d'obturation, donc beaucoup de lumière.



Chimie

Qu'est-ce que l'alchimie ?

Pierre Laszlo. Éditions Hachette, 1996.

Que paraisse un livre sur l'alchimie et l'on accourt, on se précipite, on lit, on en parle, pour le critiquer souvent, en refusant la grande envie de céder à la fascination que cette activité ésotérique continue d'exercer sur notre imaginaire. Quoique prévenu de l'inéluctable fatalité dont la passion de l'alchimie accable l'initié, ce dernier s'inscrit, de l'Antiquité à la fin du XVIII^e siècle, dans une tradition forte.

L'alchimie se développe plus particulièrement en Occident à partir des premiers siècles de notre ère, en provenance d'Égypte puis de la Grèce, mais ses racines plongent dans la Chine

antique. De cette époque, la *Table d'Émeraude* est restée un texte fondamental. À la Renaissance, les écrits attribués à Hermès Trismégiste nourrissent une nouvelle alchimie. Au XVII^e siècle, à côté de la physique mathématique, se développant dans une communauté scientifique organisée en académies et en sociétés savantes, communiquant ouvertement et de plus en plus en langue vulgaire, l'alchimie reste secrète, initiant des adeptes et transmettant toujours son savoir en termes codés, publiant peu.

L'un et l'autre mondes coexistent comme le jour et la nuit. Un savant peut être un scientifique au jour de la société à laquelle il participe et être alchimiste à la nuit des initiés qui partagent ses convictions.

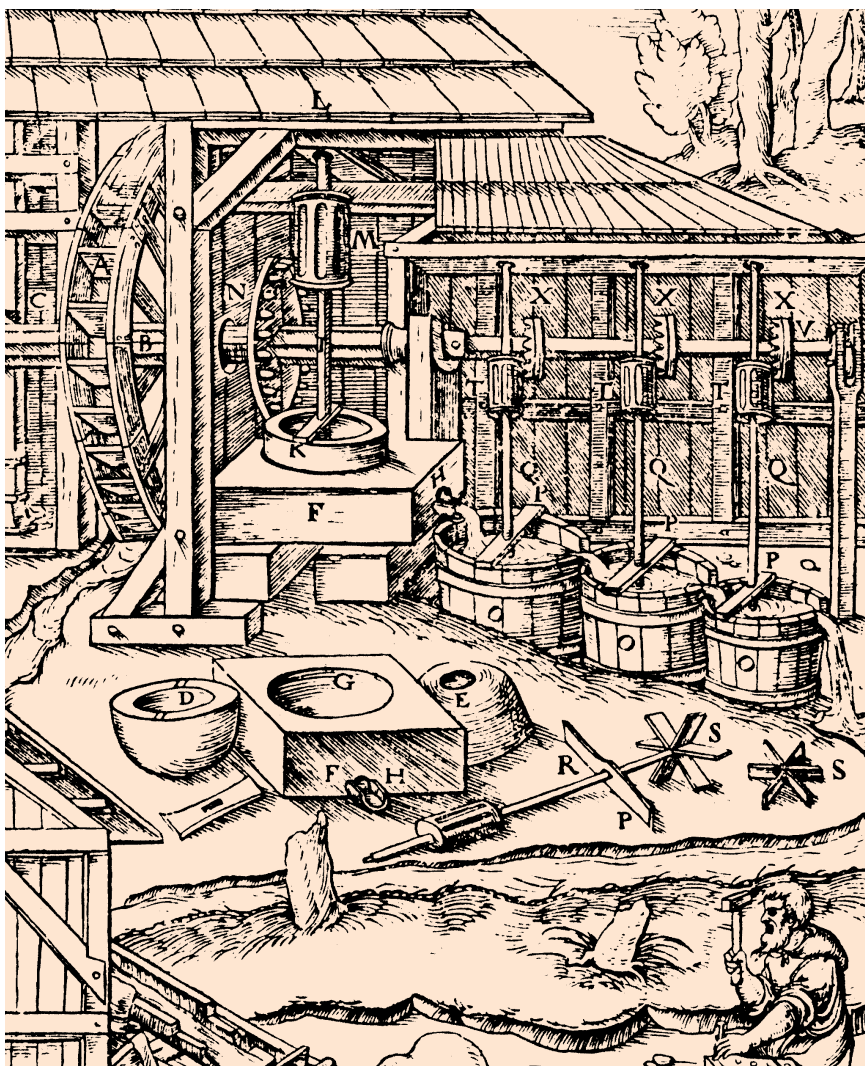
Newton était les deux. Pierre Laszlo nous fait mieux connaître cet aspect de l'activité du grand savant en quelques pages. Pendant 30 ans, Newton, mythiquement rationnel, figure emblématique de la science victorieuse de l'obscurantisme, a pratiqué l'alchimie, a écrit des

milliers de pages à son sujet sans en publier une seule, mais en a analysé les pratiques avec son intelligence logique hors du commun. Pour rien.

C'est à cette époque que s'amorce la séparation entre alchimie et chimie. Du *Skeptical Chemist*, du Britannique Robert Boyle (1666) au *Cours de chymie* de Nicolas Lémery (1675), la rupture se consomme. Ce dernier traité, longtemps réédité (la dernière édition date de 1756), est un livre en langage clair qui se veut un manuel de pratique expérimentale associé à une interprétation mécaniste des réactions. Au XVIII^e siècle, la chimie s'affirme en tant que science, et l'alchimie jette ses derniers souffres. On a cessé de croire, officiellement, à la croissance des métaux au sein de la Terre, à l'existence de la Pierre philosophale ou à l'Elixir de vie. Le but n'est plus d'atteindre l'Œuvre au rouge, mais de découvrir, selon des protocoles expérimentaux reconnus, les secrets de la matière. Pourtant les deux buts sont-ils si différents ?... Tournée vers le futur, la science observe toujours de nouveaux phénomènes, invente de nouvelles théories, éprouve de nouveaux modèles. L'alchimie garde la nostalgie d'un savoir perdu dont elle répète rituellement les arcanes, rêve d'un âge mythique où tout était plus simple et le monde meilleur. Point n'est.

La chimie est fille de l'alchimie, mais aussi de la pratique artisanale. À l'alchimie, elle doit le laboratoire avec ses feux savamment entretenus, ses méthodes expérimentales comme la distillation qui purifie, le chauffage à reflux qui, lentement, remet sans cesse au feu l'huile essentielle vaporisée afin de l'obtenir plus subtile. L'alchimie nous a donné à savoir lire la couleur des solutions, nous a appris à faire croître les cristaux aux formes géométriques au sein d'une mère... La pureté comme obsession, la séparation du corps le plus parfait de la gangue ont conduit les rêveurs alchimistes à devenir des praticiens chimistes, leur ont donné à voir, puis à atteindre l'important caché sous le visuel futile. Il flotte dans le vocabulaire chimiste des effluves de mots anciens qui suggèrent leur appartenance alchimique. Depuis Berzélius, c'est une lettre majuscule parfois suivie d'une minuscule qui transmet le message de reconnaissance d'un élément. C'est une conversion de fait des symboles alchimistes, hermétiques, dont, par ailleurs, Lavoisier lui-même ne s'était pas dispensé pour désigner les corps de la nouvelle chimie.

La réponse à la question posée en titre du livre de P. Laszlo – Qu'est-ce que l'alchimie ? – est-elle dans l'alchimie elle-même, vide en fait de potentialités matérielles, toute à la répétition des actes passés, sans réinterprétation ? La séduc-



En 1556 paraît *De Re metallica*, où Georgius Agricola présente la pratique de la métallurgie.

tion s'efface. Ce n'était donc que cela ? Une transcription en termes actuels de quelques recettes alchimiques aurait aidé à satisfaire la curiosité du lecteur avide de concret. Par ailleurs, la précipitation des métaux à partir des solutions de sels métalliques n'a pas été seulement le fait des alchimistes, mais aussi des pratiques artisanales. La lecture de *De Re metallica* d'Agricola permet de relativiser l'impact de l'alchimie à la Renaissance et aux périodes suivantes. La technique a longtemps cheminé sur une voie parallèle et ne parcoure avec la science des chemins de traverse qu'à l'époque moderne.

Ce petit livre distraira et instruira à la fois, mais si la question posée en titre trouve ici des éléments de réponse, elle appelle une suite. En quoi consiste le contenu alchimiste ? Que construisent l'Œuvre au noir, puis l'Œuvre au blanc et, enfin, l'Œuvre au rouge ? L'interrogation reste jusqu'au débat que mène l'auteur avec Dominique Lecourt, où, enfin, comme Virgile guidant Dante, P. Laszlo conduit son lecteur à travers les cercles successifs de la symbolique d'un texte alchimique et, en particulier, nous révèle le sens caché de l'Œuvre au noir.

Écrit par un chimiste reconnu, cet ouvrage rend accessible au public moderne cette histoire alchimique trop méconnue. L'alchimie contient une forme de savoir qui a témoigné d'une façon d'appréhender le monde ; à ce titre, elle doit rester un objet d'études nécessitant l'investissement de chercheurs afin de préciser le rôle qu'elle a tenu dans la construction de la connaissance scientifique du monde.

Danielle FAUQUE

Chimie

Orbitales frontières

Nguyễn Trong Anh. InterÉditions, 1996.

La chimie organique est, encore et toujours, une science expérimentale, mais, en cette fin de xx^e siècle, les réactions doivent être extrêmement sélectives et la cible choisie doit s'obtenir en un minimum d'étapes, avec de hauts rendements. Aussi le chimiste organicien ne s'appuie-t-il plus seulement sur son expérience et sur des connaissances encyclopédiques. Il (ou elle) met aussi à profit les données de la chimie théorique pour prévoir, dans la mesure du possible, le déroulement des

processus réactionnels. Nguyễn Trong Anh a une formation initiale d'organicien de synthèse et, dans les années 1970, il s'est tourné vers la chimie théorique. C'est pourquoi son livre, fondé sur le cours qu'il professe au DEA de chimie organique d'Orsay, peut être lu (et apprécié) par tout organicien qui a quelques rudiments de mathématiques un peu avancées.

Qu'est-ce que la sélectivité des réactions de chimie organique ? Lorsqu'un réactif R rencontre un substrat S , plusieurs possibilités peuvent être envisagées, surtout si ce substrat est plurifonctionnel. La chimiosélectivité correspond à la sélection d'un seul groupe fonctionnel. De plus, si ledit substrat est substitué de façon dissymétrique, le réactif R doit se fixer très préférentiellement d'un côté et non de l'autre (régiosélectivité). Enfin, si le substrat S possède deux faces d'environnement différent, seule l'une d'elles doit être attaquée (stéréo- ou énantiosélectivité). On sait, en effet, que des isomères présentent souvent des activités biologiques qui ne sont pas identiques, et il est impératif, en synthèse de médicaments par exemple, d'obtenir le produit ayant l'activité recherchée.

Parmi les nombreux (hélas !) facteurs qui régissent le déroulement des réactions, l'interaction entre les « orbitales frontières » du réactif et du substrat est souvent primordiale. D'où l'intérêt du livre de Nguyễn Trong Anh, qui trace un panorama volontairement simplifié et pédagogique de cette approche.

Les orbitales frontières ? Dans une molécule, les électrons se répartissent dans des niveaux d'énergie quantifiés : ce sont les orbitales moléculaires (OM). Un calcul relativement simple permet d'estimer ces niveaux. Quand la molécule est trop complexe, l'estimation se fait seulement sur le fragment qui va réagir. Les électrons sont alors répartis dans ces orbitales – deux par deux, de spins opposés – de façon que les niveaux d'énergie inférieure soient tous peuplés. L'orbitale peuplée de plus haute énergie (HO) est une des orbitales frontières, alors que l'orbitale vacante de plus basse énergie (BV) est l'autre. Lorsque le réactif R et le substrat S interagissent, leurs orbitales se mélangent et l'interaction entre les orbitales frontières de l'un et de l'autre est, en général, la plus importante. Selon les caractéristiques de ces orbitales, qui sont données par le calcul, un chemin réactionnel est privilégié, ce qui détermine souvent (pas toujours...) la sélectivité de la réaction. Cette description est celle de la méthode dite des perturbations. Des problèmes structuraux peuvent également être abordés par cette méthode si l'on considère qu'une molécule complexe est formée de fragments

dont les orbitales frontières interagissent et se mélangent.

Le livre de Nguyễn Trong Anh aborde ces différents aspects des applications des orbitales frontières. Il donne les méthodes simplifiées de calcul des orbitales atomiques et moléculaires (chapitres I et III). Il envisage ensuite le problème des réactions : qui réagira le plus vite et pourquoi (chapitre IV) ; quelles seront la régio- et la stéréosélectivité des réactions (chapitres V et VI) et enfin quels problèmes structuraux peuvent être abordés dans ce contexte (chapitre VII). Dans un dernier chapitre, l'auteur jette un œil critique sur les limites de cette approche : ne faut-il pas toujours tout remettre en question ?

L'ouvrage est clair, bien présenté, bien documenté, quoique parfois un peu trop pragmatique. L'insertion des exercices en cours de texte peut gêner ; pourquoi ne pas les avoir reportés en fin de chapitre ? Le document est à recommander à tous ceux qui s'intéressent de près ou de loin à la chimie organique.

Jacqueline SEYDEN

Ethnologie

Les populations traditionnelles

Éditions Bordas.

Voici le cinquième et dernier volume d'une collection célèbre : « Les berceaux de l'humanité », publiés par les éditions Bordas. Célèbre par l'ampleur et la rigueur de l'information, mais aussi par la qualité esthétique d'une présentation somptueuse.

Cinq gros volumes auxquels ont collaboré des centaines de spécialistes, les uns remontant aux premiers hommes, à nos origines si controversées, d'autres prenant le témoin, d'autres encore plongés dans notre présent, héritier de richesses dont voici une partie de l'inventaire, analysé par des savants passionnés de découvertes.

Continuité et changements, hypothèses et certitudes : nous voici entrés de plain-pied dans les trouvailles les plus récentes où nous conduisent les archéologues, les anthropologues, les conservateurs des plus beaux musées.

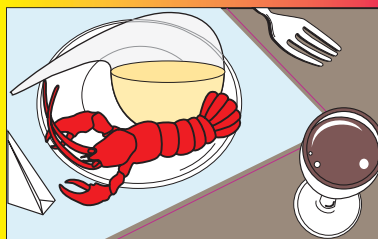
C'est que l'entreprise est universelle et, par là même, fabuleuse. Elle englobe les cultures les plus révélatrices, les religions les plus secrètes, les expressions artistiques les plus originales et les plus séduisantes. De page en page, nous voici

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 26 juin 1996.



pénétrant dans les cantons secrets de notre vieille Terre.

Il faut insister sur les qualités esthétiques de ce prodigieux ouvrage. Le texte est illustré par des centaines de photographies, des plus rustiques aux plus éblouissantes. Nous nous promenons dans un musée fantastique, participons à des fêtes dont le caractère sacré ne pourrait pas ne pas nous émouvoir. Bêtes et gens, paysages et rêves ; armes, outils, étoffes royales ; visages «plus qu'humains» : ils nous entraînent dans des lieux qui n'ont pas leurs semblables.

Maurice ZERMATTEN

Anthropologie

La contagion des idées, théorie naturaliste de la culture

Dan Sperber. Éditions Odile Jacob, 1996.

Que sont le mariage, le sacrifice, le Code pénal, l'Eglise, la recette de la sauce Mornay ? Ce sont des objets culturels, mais encore ? Le mariage, par exemple, est-il un concept ethnologique défini ou un concept fourre-tout, utile seulement dans la vie quotidienne ? De quoi parle-t-on quand on fait référence à l'institution du mariage ou, plus généralement, à toutes ces entités collectives porteuses de sens, auxquelles on attribue une efficacité causale ? Quelles raisons a-t-on de penser qu'il existe des croyances générales, hors contexte, explicites, intégrées et partagées par toute une population («les Bororos pensent que...») ? Bref, à quels objets a-t-on affaire en anthropologie et, plus généralement, dans les sciences sociales ?

Voilà les questions que pose Dan Sperber dans *La contagion des idées, théorie naturaliste de la culture*. Anthropologue de formation, élève de M. Balandier, de Joseph Needham et du peuple des Dorzé, en Éthiopie, D. Sperber est insatisfait du bric-à-brac ontologique des sciences sociales ; il recherche une explication naturaliste de la culture. À l'idée d'un environnement culturel porteur de sens, il substitue celle d'un environnement purement physique, que les organismes que nous sommes mettent à profit pour percevoir, interpréter, inférer, agir et, en particulier, communiquer. Il s'agit donc d'enraciner les sciences sociales dans les sciences de la nature, en s'appuyant sur les progrès récents des sciences cogni-

tives. D. Sperber espère ainsi étendre le champ d'investigation de l'anthropologie. Il se situe à un niveau plus fondamental, plus élémentaire que celui des théories classiques et entend préserver, pour l'essentiel, les concepts sociaux traditionnels dont l'utilité est, selon lui, «manifeste». Pour autant, bien que le titre de l'ouvrage puisse le suggérer, l'auteur ne cherche pas à établir une théorie globale ou unifiée de la culture au sens d'Auguste Comte (contrairement à ce qui est écrit sur la quatrième de couverture de son livre).

Jetons un regard matérialiste sur une recette de sauce Mornay : il s'agit de taches d'encre sur un papier, dont l'agencement forme une représentation publique, susceptible d'être lue et de causer autant de représentations mentales que la recette aura de lecteurs. Ces représentations sont différentes : elles sont semblables (plus ou moins), mais appartiennent à des systèmes cognitifs différents. De ce point de vue, la recette de la sauce Mornay est une abstraction : elle n'est pas un objet du monde. Ce qui existe, en ce dernier sens, c'est une distribution ou une répartition, dans l'espace et à travers le temps, de versions publiques et mentales alternées de la recette.

Ainsi l'ontologie du social (ce qu'est le social en soi, indépendamment de la manière dont il peut nous apparaître ou de la manière dont nous pouvons l'interpréter) ne découvre que trois éléments : les représentations mentales, qui sont les événements mentaux (donc cérébraux), c'est-à-dire tout exemplaire d'une croyance, d'une valeur, d'un projet, par exemple, qui nous vient à tel moment particulier ; les productions publiques qui sont des objets de l'environnement, des artefacts, en particulier des représentations publiques comme les livres ou les affiches (mais pas les roulements à bille) ou des comportements, y compris linguistiques comme les discours ; les enchaînements causaux des représentations mentales et des productions publiques dont l'agrégation, variable dans le temps et dans l'espace, forme des distributions.

Une représentation est culturelle lorsqu'elle est distribuée de manière suffisamment stable et large dans une population. On retrouve l'idée de la contagion, qui se propage dès les origines de la philosophie grecque, comme en témoigne Platon dans *l'Ion*. Aujourd'hui, qui dit épidémie ne dit pas seulement propagation ou contagion, mais aussi sélection. La plupart des représentations disparaissent sans laisser de trace ; seul un petit nombre acquiert une certaine permanence. Il faut alors s'interroger sur la dynamique stabilisante, sur les facteurs psychologiques et écologiques (environnementaux) qui sont

responsables de la résilience particulière de certaines représentations.

L'application du modèle darwinien à la culture n'est pas nouvelle (voir, par exemple, *La loi des gènes*, par le biologiste Richard Dawkins, dans *Pour la Science*, janvier 1996). Mais D. Sperber lui apporte un infléchissement peut-être décisif en remarquant que, contrairement aux agents pathogènes, les représentations ne se reproduisent presque jamais à l'identique au cours de leur propagation. C'est l'une des raisons pour recourir à la théorie des systèmes dynamiques. L'auteur espère ainsi apporter un nouvel éclairage sur la « dialectique » entre émergence et microstructure dans l'évolution culturelle. Il veut, en particulier, tenir compte des effets en retour exercés par l'environnement social et culturel sur le processus de sélection des représentations, sans renoncer à son ontologie élémentaire : « Ce sont les microprocessus de la transmission culturelle qui rendent possible la coévolution gène-culture et qui causent l'évolution historique des cultures et le développement culturel des individus. »

Quel est l'intérêt pour l'anthropologue du remaniement conceptuel que propose cette approche épistémologique ? Premièrement, elle permet une économie ontologique en ramenant l'anthropologie de la psychologie cognitive à celle de l'écologie. Deuxièmement, elle attire l'attention sur les micromécanismes psychologiques et écologiques, les microglissements, les microdynamiques de la transmission culturelle. Elle s'oppose donc aux approches qui biffent les différences en recourant à des entités collectives ou en invoquant exclusivement les raisons

qui poussent l'individu à agir, sans prêter attention à des phénomènes cognitifs intra-individuels plus élémentaires, plus complexes et non conscients.

Ce faisant, D. Sperber réfute ce que Maurice Bloch appelle « la théorie anthropologique de la cognition » ou ce que Pascal Boyer nomme « la théorie de la transmission culturelle exhaustive », d'après laquelle les déterminations cognitives seraient sans pertinence pour l'étude des phénomènes culturels – débat qui était déjà celui du colloque de Royaumont de 1972, *L'Unité de l'homme*. Ainsi, par exemple, la stabilisation de tels récits de tradition orale à l'intérieur d'une population donnée est sous-déterminée par la transmission – au sens où les ethnologues entendent traditionnellement ce terme –, et dépend aussi en partie du filtrage de la mémoire, c'est-à-dire de propriétés cognitives universelles de l'esprit humain. Pourquoi les sciences sociales se refusaient-elles à envisager, comme la linguistique le fait depuis plus de 30 ans, de nouveaux rapports entre la nature et la culture ?

On peut discuter la tentative de D. Sperber pour naturaliser l'anthropologie dans la perspective d'un matérialisme minimaliste et pour magnifier l'apport de la psychologie cognitive à la discipline (par exemple, parce qu'on rejette la métaphore de l'ordinateur appliquée au cerveau et à l'esprit). Il n'en demeure pas moins que le livre devrait inciter les anthropologues à surmonter leur prévention à l'égard d'un certain type de phénomènes cognitifs et communicationnels qui pourraient bien jouer un rôle essentiel dans la constitution de l'humanité.

Françoise SIRI

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : David A. Grimaldi. P. 9 : G. Dagli Orti. Pp. 10 et 11 : doc. PLS. P. 12 : California Academy of Sciences. P. 13 (à gauche) : Victor Lemoine. P. 13 (à droite) : W. Matthew. P. 14 : H. This. P. 16 : TOERGE. P. 17 (en haut) : Monique Courtois. P. 17 (en bas) : Bruno Bernard. P. 20 : doc. PLS. P. 21 : Lauros-Giraudon (Musée d'Unterlinden, Colmar). P. 22 : Dimitry Schidlovsky. P. 24 : Paul Gogan. P. 25 : Jérôme Tubiana. P. 26 : Aflio Guarnera/GANIL. Pp. 28 et 29 : PLS, d'après M. Mattauer. P. 32 : doc. PLS. P. 34 (à gauche) : Jared Schneidman Design. Pp. 34 (à droite) à 37 (à gauche) : Sam Ogden. Pp. 37 (à droite) et 38 : avec l'aimable autorisation d'Alex P. Pentland. Pp. 39 à 42 : S. Ogden. Pp. 44 et 45 : Ed Bridges, American Museum of Natural History. Pp. 46 et 47 (photographies a à i) : American Museum of Natural History. P. 46 (en bas) : Denis Finnin, American Museum of Natural History. Pp. 47 (en bas) et 48 (en haut) : D. Grimaldi. P. 48 (en bas) : Jackie Beckett, American Museum of Natural History. P. 49 : D. Grimaldi. P. 50 (en haut) : Stephen Doberstein et Michael Delannoy, Johns Hop-

kins University. P. 50 (en bas) : D. Grimaldi (dessins) et E. Bridges, American Museum of Natural History (photographie). P. 51 (en haut, à gauche et au milieu) : D. Grimaldi. P. 51 (en haut à droite) : William Crepet, Cornell University. P. 51 (en bas) : J. Beckett, American Museum of Natural History. Pp. 52 et 53 : doc. PLS. P. 53 (en bas à droite) : Barbara Osborne. P. 54 : doc. PLS. P. 55 : Petit format - Guigoz. Pp. 56 à 66 : doc. PLS. P. 69 : Marco Bonauguri. P. 70 (en haut) : doc. PLS. P. 70 (en bas) : Jean-Loup Charmet. P. 71 : doc. PLS. P. 72 : VIVI PAPI. P. 73 : avec l'aimable autorisation de Cassa di Risparmio di Fano. P. 75 : Biblioteca Vaticana, *Urb. Lat.* 632 40v. P. 77 (en haut à gauche et à droite) : C. Caron. Pp. 77 (en bas à gauche) à 81 : doc. PLS. Pp. 84 et 85 : Alfred T. Kamajian. Pp. 86 à 88 : Michael Goodman. P. 89 : University of Arizona Oases Project. P. 90 : M. Goodman. Pp. 92 à 97 : Roberto Osti. P. 100 : Dimitry Schidlovsky. P. 102 : S.E. Frederick, University of Wisconsin-Madison. Pp. 104 et 105 : Johnny Johnson. P. 106 : doc. PLS. P. 110 : Terry S. Reynolds.

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Aubineau. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Ont également collaboré à ce numéro : Jacques d'Aguilar, Bettina Debû, Paul Decaix, Marie-Thérèse Landousy, Anne Masé, Claude Olivier, Guy Paulus, Luc Robert, Jean Schneider.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Co-Chairman : Pierre Gerckens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (1) 46 34 21 42. Tél. LIBELIN 202978F. Télécopieur : 43 25 18 29.

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront en pages centrales, un encart publicitaire INRA et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.