

N° SPÉCIAL

■ POUR LA

# SCIENCE

Décembre 1998

édition française de

SCIENTIFIC  
AMERICAN



# L'intelligence

Canada : \$ 8,75

BLOC-NOTES de Didier Nordon 7

JEU-CONCOURS par Pierre Tougnon 8

Géométrie archaïque 9

TRIBUNE DES LECTEURS 9

POINT DE VUE par Jean-Jacques Duby 10

La grande peur de la science

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE par James Livingston 12

Mémoires magnétiques

SCIENCE ET ÉCONOMIE par B. Guerrien et S. Jallais 16

La Bourse... ou la vie (du PIB)?

SCIENCE ET ASTRONOMIE par Hervé This 20

Fils et arumeaux

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 22

Un détecteur de fossiles ■ Graines de plastique

■ Un temps plus sûr ■ Antidépresseur d'un troisième type

■ Les diamants du manteau ■ Leptine multifonction ■ Des moteurs

protéiques ■ Drôles de mouvements ■ Le monde des dunes

## INTRODUCTION

**Qu'est-ce que l'intelligence?** par Jean-Pol Tassin 30

L'intelligence est modelée par le patrimoine génétique et par l'environnement culturel et affectif.

**Intelligence et instinct,** par Alain Prochiantz 34

La pensée est le rapport adaptatif qui lie l'individu à son milieu.



## L'ÉMERGENCE DE L'INTELLIGENCE

**La conscience est le propre de l'homme,** par Daniel Povinelli 40

Bien que les chimpanzés se reconnaissent dans un miroir, ils n'ont pas conscience d'eux-mêmes.

**Conscience de soi et conscience des autres,** par Gordon Gallup 45

Les chimpanzés et les orangs-outans sont conscients de leur propre existence.

**Le raisonnement des animaux,** par James Gould et Carol Grant Gould 50

De nombreuses espèces animales ont des capacités d'abstraction et de planification.

**L'intelligence sociale des singes,** par Bernard Thierry 58

La vie sociale des primates requiert des facultés cognitives élaborées.

**Conversation avec un perroquet,** par Irene Pepperberg 60

Réputés excellents imitateurs, les perroquets comprennent aussi ce qu'ils disent.

**La transmission de la «culture» chez l'animal,** par Éric Joulian 66

Certains comportements apprennent à l'imitation, mais l'homme ne sont pas son apanage.

**Les stratégies alimentaires des Néandertaliens,** par M. P. Mathis 74

Les comportements alimentaires des Néandertaliens révèlent une intelligence semblable à la nôtre.

**Les inventions des derniers Néandertaliens,** 80

par Francesco d'Errico, Dominique Baffier et Michèle Julien

L'expression de la pensée symbolique des Néandertaliens ressemble à celle des hommes modernes.

## INTELLIGENCE ET MÉMOIRE

**Plasticité cérébrale et apprentissage,** par Jean-Pierre Changeux 86

L'acétylcholine et la nicotine modulent la mémoire et l'apprentissage.

**Les mécanismes de la mémoire,** par Serge Laroche 94

La mémoire est l'une des composantes essentielles de l'intelligence.



## L'INTELLIGENCE EN SCIENCE

185

## ■ L'intelligence en physique.

par Pierre Gilles de Gennes

## ■ L'intelligence du chimiste,

par Jean-Marie Lehn

## ■ L'intelligence en mathématiques,

par Alain Connes

## ■ L'intelligence en biologie,

par Jean-Didier Vincent

## LOGIQUE ET CALCUL par Jean-Paul Delahaye

196

## Champernowne, et quelques autres

## ANALYSES DE LIVRES

202

■ *Le darwinisme social en France (1859-1918). Fascination et rejet d'une idéologie.* de Jean-Marc Bernardini■ *La mesure*, de Jean Perdijon■ *Analyse mathématique*, de Roger Godement

## INDEX ANNUEL 1998

206

## La localisation de la mémoire, par Joaquín Foster

102

Aucune zone cérébrale n'est spécifiquement dédiée à un type particulier de mémoire.

## Les pilules de l'intelligence, par Marguerite Holloway

108

Les nouveaux traitements des maladies neurologiques amélioreront-ils la mémoire?

## L'INTELLIGENCE HUMAINE

## L'intelligence de l'enfant, par Bernard This

114

Le QI mesure autant la motivation de l'enfant que sa capacité à réussir le test.

## Génétique et intelligence, par Robert Plomin et John DeFries

120

Comment les gènes déterminent-ils les aspects variés de l'intelligence?

## Les surdoués, par Ellen Winner

128

Quel enseignement dispenser aux enfants surdoués?

## Les formes d'intelligence, par Howard Gardner

136

L'intelligence n'est pas une faculté homogène que noterait le QI.

## Le facteur global d'intelligence, par Linda Gottfredson

144

Les tenants d'une possible mesure de l'intelligence sont voués aux gémones.

## Les tests d'intelligence sont-ils intelligents?, par Robert Sternberg

152

Les tests d'intelligence classiques ne mesurent pas les aptitudes essentielles.

## L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

## L'intelligence artificielle, par Kenneth Ford et Patrick Hayes

158

L'intelligence artificielle ne se contente pas d'imiter la pensée humaine.

## L'intelligence des réseaux de neurones, par Jean-Pierre Nadal

172

Les réseaux de neurones révèlent les mécanismes du cerveau.

## L'intelligence des jeux, par Matthew Ginsberg

172

Les ordinateurs de jeux proposent de nouvelles méthodes de résolution de problèmes.

## L'intelligence des robots, par Arab Ali Chérif

178

Des règles économiques et constitutionnelles régulent les tâches d'un groupe de robots mobiles.

Par Didier Nordon

## À pisser de honte

**A**nnick Le Guérin, dans son livre *Les pouvoirs de l'odeur* (Odile Jacob, 1998), rapporte : «Le coefficient urotoxique est chez les Allemands au moins d'un quart plus élevé que chez les Français. [...] Si 45 centimètres cubes d'urine française sont nécessaires pour tuer un kilogramme de cobaye, le même résultat sera obtenu avec environ 30 centimètres cubes d'urine allemande. [...] La principale particularité organique de l'Allemand actuel, c'est qu'impuissant à éliminer par sa fonction rénale surmenée l'élimination des éléments uriques, il y ajoute la région plantaire. Cette conception peut s'exprimer en disant que l'Allemand urine par les pieds.»

Eh bien, non : on ne rit pas. Ce passage est extrait de *La bromidrose fétide des Allemands*, publiée par un certain docteur Bérillon en 1915. Autrement dit, il fait partie de l'inépuisable cohorte des «considérations savantes» qui, de part et d'autre de la frontière franco-allemande, ont contribué à rendre possible l'une des pires boucheries qu'ait connues l'Europe. En matière de racisme, les propos les plus fous sont toujours susceptibles d'être pris au sérieux, et de mener à l'horreur.

le café délicieux. En déduire que le Monsieur est un scientifique de premier plan. *Solution* : Si le café est au goût du Monsieur, c'est que ce dernier n'y a mis ni trop ni trop peu de sucre. Or la quantité de sucre adéquate dépend de la force du café et du pouvoir sucrant du sucre utilisé : le Monsieur a déterminé ces deux paramètres à vue, ce qui montre qu'il est excellent chimiste. Cette quantité dépend aussi du volume du café : le Monsieur est un excellent physicien, qui a su évaluer le volume d'une tasse qu'il ne connaissait pas (c'était sa première visite). Et il a réussi tout cela en s'avançant, c'est-à-dire sans avoir l'esprit occupé par les difficiles calculs qu'il aurait exigés une mise en équation du problème. Il n'a donc pas eu recours aux mathématiques. Cela prouve qu'il est excellent mathématicien, car comme aimerait à dire le prix Nobel David Lubitsch : «La preuve qu'on maîtrise parfaitement un outil, c'est qu'on sait s'en passer quand il n'est pas indispensable.»

certainement sérieuse, puisqu'elle se lit dans le commentaire officiel du programme des sciences de la vie et de la terre (classe de troisième).

Maintenant, halte-là, les mauvais esprits ! En réalité, ce commentaire concerne le chapitre «Protection de l'organisme» (antigènes, systèmes immunitaires, vaccins, infections, etc.). Honni soit qui mal y pense : il est écrit en toute naïveté. Il faut avoir l'esprit mal placé pour y voir une réponse positive à la question initiale. La queue demeure donc entière.

La vérité sort de la bouche des enfants, dit-on... Elle sort entre aussi par les oreilles : confrontés à la possibilité de pénétration de paroles émises par leurs professeurs, gagions que (pour une fois) ils sauront écouter — et s'esclaffer — si ces derniers ont le malheur de s'exprimer aussi maladroitement que le commentaire ci-dessus. Quant à la sexualité, a-t-elle un avenir ? C'est une bonne question, et je vous remercie de me l'avoir posée.

## Le sexe de nos petits anges

**L**a sexualité a-t-elle un avenir ? Éternelle question. Mais certainement sérieuse, puisqu'une société grave et savante, l'an dernier, n'a pas hésité à organiser tout un forum chargé de l'examiner avec componction.

Des orateurs ont glosé sur l'animation salvatrice que l'organisme est constamment confronté à la possibilité de pénétration d'éléments émanant de son environnement. Étrange remarque. Mais

## Supprimer la nature

l'expérience consistant à interdire les voitures en ville pendant un jour ne semble pas avoir donné de résultats probants. Rien d'étonnant : nos dirigeants sont trop timorés. Pour percevoir ce que serait la vie dans des villes sans voitures, il faudrait un laps de temps beaucoup plus conséquent que vingt-quatre heures.

Seulement, la pollution en ville n'est pas due qu'à la circulation automobile. Elle proviendrait aussi d'hydrocarbures naturels émis par la végétation (*Le Monde*, 15 septembre 1998). Oui, les arbres peuvent nous pomper l'air plus que les voitures ! Du coup, Toulouse, moins saturée en voitures que Paris mais plus proche de la forêt landaise, serait parfois plus polluée que Paris. Les dangers de la nature métonneront ceux qui avaient oublié que la nature, c'est aussi le cobra, l'amarante phalloïde et la belladone.

Pour chercher comment améliorer la qualité de vie dans les villes, une autre expérience s'impose : supprimer la nature qui les entoure et qui les asphyxie. Rasons forêts et collines, comblons lacs et rivières, recouvrons d'asphalte l'immense plaine ainsi obtenue, puis voyons ce que cela donne. Comme je ne suis pas moins timoré que nos dirigeants, je propose que cette expérience-là, elle aussi, soit prévue pour durer vingt-quatre heures.

## Pour mieux boire la tasse

**E**xercice : le Monsieur est retenu à prendre le café par des amis chez lesquels il n'était encore jamais allé. Tout en tournant la cuillère dans sa tasse, le Monsieur bave d'agréablement. Il trouve

## Entérons les haches préhistoriques...

... Comme les Indiens d'Amérique, pour mieux les préserver. Je m'explique : quelle minutie est celle des archéologues, lorsque, au cours d'une fouille, ils découvrent un objet ancien ! Quelle méticulosité, ensuite, lorsqu'ils archivent l'objet dans une collection de musée ou de laboratoire ! À juste titre : protégé par la terre et les hasards des conditions naturelles, l'objet, parfois, avait traversé des millénaires et des millénaires avant de nous parvenir. C'est bien le moins que de ne pas l'abîmer par des manipulations désinvoltes.

Restons pourtant sans illusions. Inséré dans le circuit des hommes, l'objet affronte tous les risques. Guerres, pillages, vols, pertes, accidents, maladroites de manutention, pannes, négligences, extinction progressive de la curiosité à son égard, etc., représentent autant de dangers potentiels. Et il gisait dans sa couche alluviale protectrice. Il lui faudra plus de hasards heureux pour survivre quelques siècles entre les mains des hommes qu'il ne lui en avait fallu pour triompher des millénaires au sein de la terre. Quant aux articles le décrivant, faible est, pour eux aussi, la chance qu'ils soient encore utilisables et compréhensibles d'ici quelques siècles.

Ainsi, l'archéologie n'échappe pas à cette vieille critique faite contre la science : elle doit tuer pour connaître.

# JEU-CONCOURS N° 54

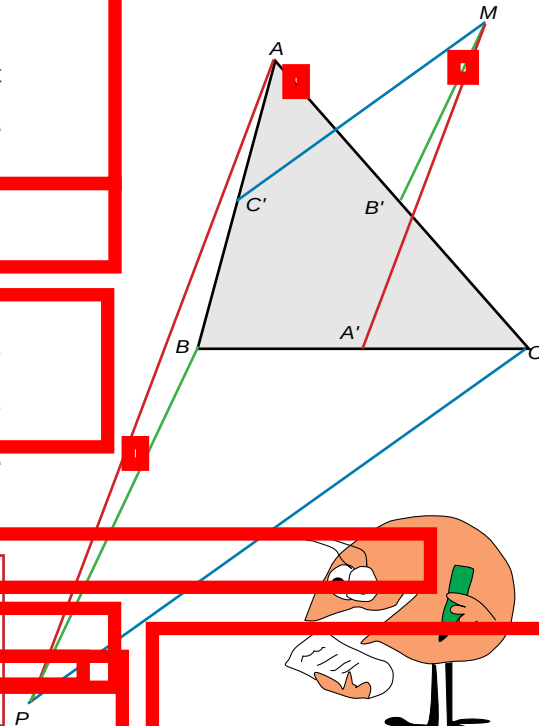
PARIS POUR LA SCIENCE

## Géométrie «shadok»

Un grand principe des shadoks est : «Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué?»

Voici une transformation géométrique qu'ils auraient pu inventer. Soit  $ABC$ , un triangle quelconque du plan et  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$  les milieux respectifs des côtés  $BC$ ,  $AC$  et  $AB$ .  $M$  étant un point quelconque du plan, on trace par  $A$  la droite parallèle à  $MA'$ , par  $B$  la droite parallèle à  $MB'$  et enfin par  $C$  la droite parallèle à  $MC'$  (voir la figure). Ces trois droites concourent en un point  $P$  (à démontrer), et l'on a ainsi défini une transformation géométrique de  $M$  en  $P$ .

Quelle transformation géométrique simple se cache derrière cette construction?



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 décembre 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 52

Rappelons les trois relations définissant la fonction  $A(m, n)$  :

- (1)  $A(0, n) = n + 1, n \geq 0$  ;
- (2)  $A(m, 0) = A(m - 1, 1), m > 0$  ;
- (3)  $A(m, n) = A(m - 1, 1) + A(m, n - 1), m, n > 0$ .

L'examen de la formule (3) montre que, pour calculer  $A(m, n)$ , il faut connaître  $A(1, n), A(2, n), \dots, A(m - 1, n)$ . Commençons par  $A(1, n)$  : d'après (1) et (2), on a  $A(1, 0) = A(0, 1) = 2$ . D'autre part, (3) et (2) permettent d'écrire  $A(1, n) = A(0, A(1, n - 1)) = A(1, n - 1) + 1$ , c'est-à-dire que  $A(1, n)$  est donné par une progression arithmétique de raison 1 et de premier terme 2, soit  $A(1, n) = n + 2$  (4). De même pour  $A(2, n)$ , les relations (2), (3) et (4) permettent d'écrire  $A(2, 0) = A(1, 1) = 3$  et  $A(2, n) = A(1, A(2, n - 1)) = A(2, n - 1) + 2$ , soit une progression arithmétique de raison 2 dont la solution est  $A(2, n) = 2n + 3$  (5). Pour  $A(3, n)$ , (2), (3) et (5) conduisent à  $A(3, 0) = A(2, 1) = 5$  et  $A(3, n) =$

$A(2, A(3, n - 1)) = 2A(3, n - 1) + 3$ . De cette dernière relation, on déduit :  $A(3, n) - 3 = 2(A(3, n - 1) + 3)$ , c'est-à-dire que  $A(3, n)$  est donné par une progression géométrique de raison 2, d'où  $A(3, n) = 2^{n+3} - 3$  (6). (3) et (6) donnent les relations suivantes :

$A(4, 0) = A(3, 1) = 13$  ;  $A(4, n) = A(3, A(4, n - 1)) = 2^{A(4, n - 1) + 3} - 3$ .

En explicitant l'expression de  $A(4, n)$  pour  $n = 1, 2, 3, 4$ , on obtient :

$A(4, 1) = 2^{16} - 1 = 65\,533$  ;  $A(4, 2) = 2^{2^{16} - 1 + 3} - 3 = 2^{65\,536} - 3$  ;  $A(4, 3) = 2^{2^{65\,536} - 1 + 3} - 3$  ;  $A(4, 4) = 2^{2^{2^{65\,536} - 1} + 3} - 3$ .

L'écriture décimale de  $A(4, 4)$  comporterait approximativement  $10^{10\,738}$  chiffres ! Il est difficile d'imaginer la croissance explosive de cette fonction quand on lit sa définition récursive. Une telle fonction a été introduite par le logicien W. Ackermann dans ses travaux sur la récursivité.

## Manchots inspirateurs

Ce qui suit n'est pas un commentaire savant de l'article de Yann Tremblay et Yves Cherel sur les manchots (voir *Pour la Science*, octobre 1998), mais c'était vraiment trop tentant. On peut aussi le considérer comme une astuce mnémotechnique. Naturellement, toute ressemblance avec une chanson connue serait parfaitement intentionnelle.

Dans l'île d'Amsterdam  
Y a des gorilles sauteurs  
Affamés, qui réclament  
Aux premières lueurs.  
Dans l'île d'Amsterdam  
Y a des gorilles plongeurs  
Et qui sans épitrament  
Dans l'eau des profondeurs.

Et ils plongent et ils plongent  
Et ils replongent encore  
S'arrêtant tout à coup  
Dans un commun accord.  
Alors cessant leur nage  
Alors le regard fier  
Ils terminent leur plumage  
Juste en pleine lumière.

Maurice CLERC, Annecy

## Porteurs sains

Dans l'article *Les pandémies de choléra* (voir *Pour la Science* n° 252, octobre 1998), il est introduit la notion de porteur sain. Parmi cette notion, celle que dans le cas de maladies génétiques, au lieu d'elle m'apparaît plus obscure en ce qui concerne une infection microbienne comme le choléra. Un porteur sain présente-t-il une souche du vibron moins virulente? Une quantité insuffisante de vibrons? Des défenses immunitaires plus efficaces?

Mathieu LEGROS, Lyon

## Réponse de P. Berche

Les êtres humains sont profondément inégaux devant les maladies et, particulièrement, devant les maladies infectieuses. En effet, très souvent le contact avec un agent infectieux ne déclenche pas une maladie clinique, mais seulement un portage asymptomatique attesté par l'apparition d'anticorps. Ainsi, dans le cas du choléra, près de 90 pour cent des sujets en contact avec la bactérie pathogène ne présentent aucun symptôme, alors même qu'ils s'immunisent contre *Vibrio cholerae*. Ces porteurs éliminent pendant quelques jours un taux relativement important de bactéries dans leurs

selles. Ces bactéries ont la même virulence que celles qui déclenchent le choléra, et les porteurs sains concourent de façon majeure à propager la maladie. Cette inégalité devant la maladie est probablement d'origine génétique, les porteurs asymptomatiques pouvant être, par exemple, insensibles à la toxine cholérique qui déclenche la diarrhée. Dans d'autres cas, il peut s'agir d'un effet de barrière de la flore digestive normale qui diffère d'un individu à l'autre et gêne l'action de la toxine ou l'implantation des bactéries sur la muqueuse, ou encore de défenses immunitaires non spécifiques ou spécifiques du fait de contacts préalables avec des toxines ou des adhésines qui ressemblent aux facteurs de virulence de *Vibrio cholerae*. Les porteurs sains existent pour de nombreux autres agents pathogènes. Le portage est habituellement de courte durée, mais peut, dans quelques cas, durer des années.

## Le mal de dos

Parmi les causes «mystérieuses» du mal de dos (voir *Pour la Science*, octobre 1998), on trouve presque toujours et essentiellement le mauvais chaussage. Les chaussures ne respectent pas les pieds, ni dans leur construction ni dans leurs fonctions. Un talon d'un seul millimètre soulève le côté interne du calcanéum, pilier postérieur de la voûte interne du pied. Dévié jusqu'à 15 degrés par rapport à l'axe du pied nu, l'axe des semelles de chaussures déporte le point d'appui naturel du pilier antérieur de la voûte plantaire interne. Les têtes des métatarsiens sont comprimées dans des larges chaussures plus étroites que les pieds nus, les bouts étriés resserrent les orteils les uns contre les autres jusqu'à les faire se chevaucher et les mettre «en marteau»; parfois, et notamment dans les chaussures d'enfant, des soutiens de la voûte interne suppriment son rôle primordial d'amortisseur.

Les repercussions sont multiples et concernent l'ensemble corporel. Le constant déséquilibre des appuis du pied sur le sol transforme la position et les mouvements du genou, la position et les mouvements des hanches, ceux de la ceinture pelvienne, ceux de toute la colonne vertébrale, donc la position de la tête, avec les nombreuses conséquences sur les yeux, sur l'occlusion des mâchoires, etc.

Il semble que le mal de dos est ressenti plus spécifiquement lors de la phase d'installation des déformations. Faire taire la douleur, signal d'alarme qui ne se met pas en route tout seul, ne remédie rien et même aggrave

le problème, car les déformations s'établissent alors sans bruit.

Mais la lombalgie (sans cause pathologique réelle et sérieuse) est loin d'être une fatalité. Dès le jeune âge, marcher pieds nus le plus souvent possible, porter des chaussures adaptées au pied comme s'il était nu, utiliser les forces de réaction dans le moindre geste de la vie quotidienne, enfin apprendre son corps comme on apprend le français ou les mathématiques sont des moyens de prévention utiles, épargnant ainsi un coût socio-économique important.

Thérèse LEFEBVRE DETERPIGNY,  
Neuilly-sur-Seine

## Réponse de Xavier Phelip

Parmi les très nombreuses causes possibles de «mal de dos», les troubles morphostatiques du pied peuvent effectivement avoir une place. Un chaussage inapproprié peut aussi accentuer le niveau des douleurs. Le mécanisme invoqué est celui du retentissement des anomalies statiques des membres inférieurs sur la fonction de la colonne vertébrale. Ainsi, les troubles statiques du pied peuvent influencer sur le fonctionnement des muscles, des ligaments et des articulations vertébrales dont le rôle dans les douleurs du dos est bien souligné dans l'article.

On ne peut cependant considérer comme habituelle le rôle du chaussage dans le déclenchement du mal de dos. Il est surtout un élément d'aggravation et peut ajouter ses effets à ceux d'autres causes, qui sont souvent nombreuses et intriquées. Ces intrications rendent par ailleurs difficile l'évaluation exacte du rôle des anomalies du pied dans le mal de dos.

Malgré ces imprécisions, l'examen des pieds et de la statique des membres inférieurs nus et chaussés est une démarche logique en présence d'une douleur rachidienne, et la correction du chaussage peut être une mesure utile.

## Pyramides

Il est fort possible que la grande pyramide de Gizeh, ou pyramide de Khéops, n'ait été construite que par 10 000 hommes (voir *Un main-d'œuvre pharaonique?*, *Pour la Science*, novembre 1998). En revanche, ce n'est pas celle qui est au centre de l'illustration présentée: il s'agit de la pyramide de Képhren, un peu plus petite. La pyramide de Khéops est au fond, et l'effet de perspective la fait paraître sensiblement plus petite. La pyramide de Mykérinos, située devant, est effectivement la plus petite.

M. MAMA, Paris



# La grand'peur de la science

JEAN-JACQUES DUBY

**Ne dites pas à ma mère que je suis un scientifique, elle me croit pianiste dans un bordel.**

**M**ême si tout est encore loin d'être pour le mieux dans le meilleur des mondes possible, il faut être aveugle pour ne pas constater que les hommes n'ont jamais vécu aussi longtemps, en aussi bonne santé, avec un tel niveau de vie et autant de loisirs qu'aujourd'hui. Et il faut être malhonnête pour ne pas reconnaître que la science a apporté une contribution essentielle à ces progrès, et encore plus pour affirmer qu'ils s'y opposent. C'est à l'heure où les espérances des encyclopédistes du XVIII<sup>e</sup> siècle et la foi des positivistes du XIX<sup>e</sup> devraient trouver une éclatante justification par les faits, la science et les scientifiques perdent leur prestige et leur autorité. Si cela peut consoler Jacques Seguela, il est plus honorable aujourd'hui d'être publicitaire que chercheur atomiste ou généticien...

Les scientifiques pourraient s'accommoder de cette perte de statut social, qu'ont connue d'autres professions avant eux : les instituteurs n'ont plus auprès de leurs concitoyens le prestige des hussards noirs de la Troisième République, cela ne les empêche pas d'être conscients de leur mission et fiers de leur contribution dans la société. Le problème est que les jeunes sont, eux, sensibles à ce déclin, et qu'ils se détournent des études scientifiques pour aller vers d'autres voies qui, espèrent-ils, leur apporteront plus de prestige et d'argent, et à coup sûr moins d'opprobre. Le pourcentage de bacheliers scientifiques a chuté de 50 pour cent en 1980 à 50 pour cent en 1990 et 46,6 pour cent en 1997. Le mouvement semble s'accélérer avec l'arrivée des classes creuses dans l'enseignement supérieur. En trois ans, entre les années scolaires 1994-1995 et 1997-1998, les effectifs du premier cycle universitaire ont diminué de 6,7 pour cent, mais les DEUG sciences ont baissé de 9 pour cent et les sciences «dures» (mathématiques, physique, chimie) de 16 pour cent. Pourtant, les besoins en cadres scientifiques sont toujours aussi élevés.

Cette modification de l'échelle des valeurs sociales est incontestablement liée à la montée en puissance des valeurs écologiques. Pour le maître à penser du mouvement écologique, Hans Jonas, le progrès scientifique met en péril jusqu'à l'existence de l'humanité : «Science et technique sont la cause même du danger, et si on ne faut pas compter sur elles pour combler les chausse-trappes qu'elles mêmes creusent». H. Jonas va jusqu'à ériger toute valeur à la vérité scientifique, et ose affirmer que «l'opinion utile est fautive». Fort heureusement, peu de gens lisent H. Jonas, mais son point de vue scientifique est très répandu. Les décideurs politiques : pour les Ministres de l'Environnement de l'OCDE réunis à Vienne en janvier 1991, l'absence de certitudes scientifiques est tout au plus un «prétexte» qui ne saurait de toute façon justifier qu'ils ajournent leurs décisions.

**S**elon le principe que, pour être lu, mieux vaut passer des trains qui sont en retard que de ceux qui arrivent à l'heure, certains journalistes entretiennent cette crainte du progrès scientifique et technique. Les exemples abondent de ce qu'il faut bien appeler de la désinformation, que ce soit la soi-disant «catastrophe écologique» de Seveso en juillet 1976, qui n'a laissé aucune séquelle, ni humaine, ni environnementale ; la «mort des forêts» au début des années 1980, qui n'était qu'un affaiblissement de la végétation dû à la conjonction de plusieurs facteurs climatiques, systémiques, physiologiques et pas seulement environnementaux ; la «mort du Rhin» annoncée à la suite de l'incendie de la raffinerie Sandoz à Bâle en novembre 1986, alors qu'un an après la faune du fleuve était revenue à son niveau antérieur. Dans les cas exceptionnels où des démentis sont publiés, ce n'est pas en première page ni en ouverture du journal télévisé de 20 heures.

Une autre forme de désinformation, plus insidieuse, consiste à faire grand cas de travaux scientifiques non validés,

et controversés de préférence, tournant ainsi au désavantage de la science ce qui devrait être à son honneur, à savoir le processus – parfois long et pénible, mais toujours rigoureux – d'élaboration de la vérité scientifique. C'est ainsi qu'un grand quotidien national a accordé la plus grande place à la fusion froide et à la mémoire de l'eau, théories dont on ne peut pas dire qu'elles ont changé les bases de la physique autant qu'elles étaient censées le faire. En dernier ressort, une telle relativisation de la vérité scientifique incite la population à considérer sur un pied d'égalité l'astronomie et l'astrologie, la médecine et les grigouls, la prévision et les prédictions.

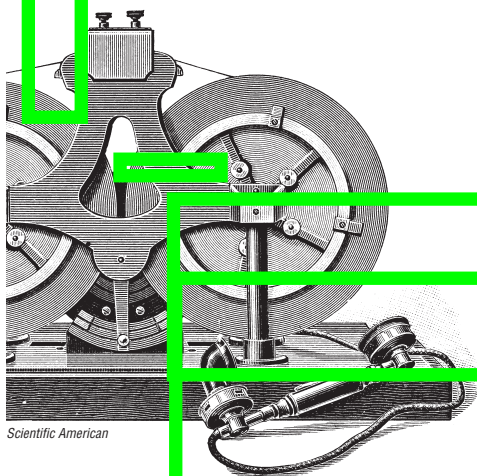
Les sociétés modernes ont de plus en plus besoin de risque zéro, d'assurances absolues. Les adversaires de la science, qui dénigrent ses valeurs, sont pourtant les premiers à la vilipender si elle n'apporte pas de réponse à toutes les questions qu'elles posent. Ceux-là même qui professent le «pieux mensonge» selon lequel les scientifiques ne leur fournissent des certitudes, faute de quoi ils les accusent d'être au mieux des incapables, au pis des apprentis sorciers menant l'humanité à la perte. Pascal leur avait répondu par avance, même s'il s'adressait alors à un père provincial des jésuites : «Vous exigez de nous, au nom de nos principes, que vous nous refusez au nom des vôtres.»

Ce qui est en jeu, ce n'est pas seulement l'ego dans une compétition, d'est le devenir d'une civilisation humaine qui, jusqu'à aujourd'hui, a été un moteur du progrès de l'humanité. C'est à juste titre que les scientifiques s'inquiètent, qu'ils lancent l'appel de Haldane, qu'ils publient des livres au titre provocateur (Gerald Holton, *The Rebellion against science at the end of the twentieth century*, Addison Wesley, 1990).

Scientifiques de tous les pays, unissez-vous !

**Jean-Jacques DUBY est directeur général de l'École supérieure d'électricité.**





Scientific American

# Mémoires magnétiques

JAMES LIVINGSTON

**L'enregistrement magnétique a 100 ans. Aujourd'hui omniprésent, ses débuts furent difficiles.**

La plupart des informations, données informatiques, films, chansons, messages des répondeurs téléphoniques, sont aujourd'hui stockées sur des supports magnétiques ; ceux-ci enregistrent les mots, les nombres, les images, les sons sous la forme d'arrangements inépuisables des pôles Nord et des pôles Sud de minuscules aimants.

Au cours des dernières décennies, les enregistrements magnétiques ont eu une influence notable sur la société, jusqu'en politique : dans les années 1970, les enregistrements réalisés dans le bureau ovale de la Maison-Blanche ont contraint Richard Nixon à démissionner de son poste de président des États-Unis.

Plus discrets, les enregistrements magnétiques des ordinateurs conservent la trace de nos personnes et de leurs biens. En cet Âge de l'information, ils ont de nombreuses applications domestiques, médicales, industrielles et financières. D'autres sup-

ports, tels le papier ou les disques optiques, sont très répandus, mais les enregistrements magnétiques ont un avantage considérable : ils sont effaçables et réutilisables.

Pourtant, l'enregistrement magnétique, découvert il y a 100 ans, a mis plusieurs décennies avant que l'on n'en trouve des applications intéressantes. Les raisons sont multiples : la science du magnétisme est restée longtemps mal maîtrisée, les applications concrètes manquaient, des obstacles économiques et politiques ont entravé son essor. Puis, à partir de 1900, les applications n'ont cessé de se multiplier.

Deux siècles avant notre ère, les magiciens de l'empereur de Chine fabriquent des boussoles en utilisant de la magnétite, une pierre riche en fer, qui a les propriétés des aimants. Pourtant, il faut attendre le XIX<sup>e</sup> siècle pour que l'on commence à comprendre le lien entre électricité et magnétisme, et

à utiliser les aimants dans les télégraphes, les téléphones, les générateurs, les transformateurs ou encore les moteurs.

## LES PREMIERS ENREGISTREMENTS

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les premiers enregistrements de la voix se font... entendre. Valdemar Poulsen, un ingénieur danois, baptise son dispositif le télégraphone. Employé à la Compagnie de téléphone de Copenhague, il pense que les personnes qui téléphonent aimeraient enregistrer leurs conversations. Ainsi met-il au point un dispositif qu'il fait découvrir à quelques amis : il tend une corde à piano en travers de son laboratoire ; il fait glisser un électro-aimant sur le fil et commence à crier dans un combiné de téléphone relié à l'aimant. Le microphone transforme les vibrations mécaniques

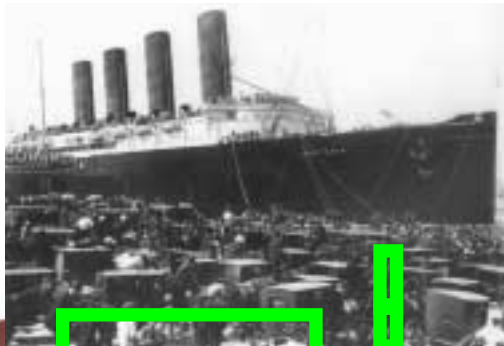
Telebladet-Tele Danmark



1898

**Valdemar Poulsen, ingénieur danois, invente le premier dispositif d'enregistrement magnétique du son sur des fils ou sur des bandes en acier, le télégraphone (en haut).**

Corbis-Bettmann



1915

**Le Lusitania est coulé. Les Alliés craignent que les Allemands n'utilisent les télégraphes pour enregistrer des messages qui ne leur sont pas destinés.**

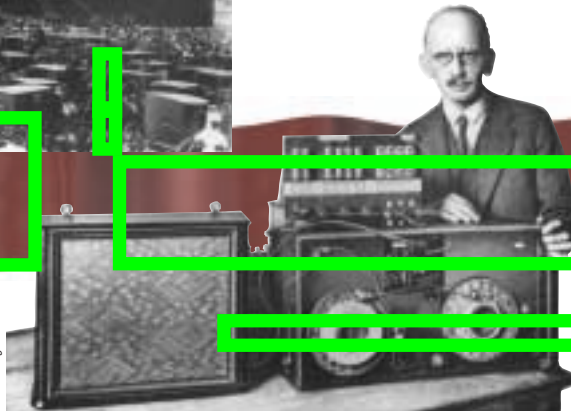
UPI/Corbis-Bettmann



1900

**François-Joseph, empereur d'Autriche, enregistre sa voix sur un télégraphone, à l'Exposition de Paris, où le dispositif fait sensation.**

EMTEC Magnetics



1928

**Fritz Pfelemer, chimiste autrichien, invente un nouveau dispositif : les enregistrements sont réalisés sur des bandes légères recouvertes de particules aimantées.**

transmise par les mots en un signal électrique qui alimente l'électro-aimant. Le champ magnétique est modulé par l'intensité et par la hauteur de la voix ; il est « imprimé » dans le fil d'acier.

Lorsque l'aimant est arrivé au bout du fil, Poulsen le ramène au point de départ et remplace le microphone par un écouteur. Quand on fait à nouveau glisser l'électro-aimant le long du fil, le dispositif restitue le son enregistré : le champ imprimé dans le fil est détecté, cette information est transformée en un signal électrique (par induction électromagnétique), lequel est transformé en vibrations mécaniques : on entend finalement la voix de l'inventeur.

Poulsen perfectionne son invention, notamment en enroulant le fil autour d'un cylindre. Il dépose plusieurs brevets. Malheureusement pour lui, personne ne prête attention à son invention. Le télégraphe est exposé à l'Exposition de Paris, en 1900. Il remporte un vif succès ; l'empereur François-Joseph d'Autriche enregistre un message, le plus ancien enregistrement magnétique connu.

Poulsen n'est pas le premier à enregistrer et à reproduire la voix humaine. Plus de 20 ans auparavant, Thomas Edison avait breveté un phonographe : les sons y étaient gravés dans des sillons de profondeur inégale, creusés dans une feuille d'étain enroulée autour d'un cylindre. Les cylindres en cire, puis les disques de plastique ont remplacé les cylindres d'Edison. Le phonographe était déjà répandu lorsque Poulsen découvre son télégraphe. Le son produit est meilleur que celui du gramophone, mais une vingtaine d'années s'écouleront

avant la floraison de l'enregistrement magnétique. Plusieurs facteurs économiques et techniques ont entravé son développement.

La société américaine de téléphone AT&T refuse d'utiliser les télégraphes, estimant qu'elle perdrait un tiers de son marché si les utilisateurs apprenaient que les conversations pouvaient être enregistrées. Les premières applications des enregistrements magnétiques sont les dictaphones. L'amélioration du télégraphe est freinée parce que l'on maîtrise mal les principes physiques du dispositif. D'après l'invention du téléphone, on sait qu'un son peut être converti en un champ électrique, puis en un champ magnétique, mais on ne comprend pas comment des champs magnétiques peuvent être enregistrés sur un support (par exemple dans une corde de piano). De surcroît, la qualité de la restitution des sons par un télégraphe est médiocre.

En fait, les principales difficultés sont d'ordre politique. Parmi les quelques télégraphes vendus, certains sont installés dans les deux stations de communication transatlantique basées sur la côte Est des États-Unis (l'une dépend de la Société allemande *Telefunken*). Or la marine allemande a commandé des télégraphes pour ses sous-marins.

Lors de la Première Guerre mondiale, les militaires s'opposent à ces deux stations de transmission des informations militaires aux sous-marins allemands qui sillonnent l'océan Atlantique. Les télégraphes servaient à enregistrer des messages secrets qui seraient ensuite retransmis par radiographie sans

fil à grande vitesse, ce qui déformerait les sons. Ces signaux, captés par les sous-marins, seraient enregistrés par un télégraphe, en ajustant la vitesse de défilement de la bande, on pourrait entendre correctement le message. Les soupçons sont encore renforcés quand un télégraphiste du New Jersey découvre que les sons mystérieux qu'il a enregistrés deviennent un message en morse quand on fait défiler la bande magnétique plus lentement que la normale.

En 1915, les deux stations radio de la côte Est sont fermées, l'un après l'autre, par le gouvernement américain. L'Allemagne s'est elle-même équipée de 24 télégraphes, mais ils ne fonctionnent pas correctement. Progressivement les enregistrements sur support magnétique sont mis aux oubliettes, aux États-Unis, pour une vingtaine d'années.

## UN AVENIR MEILLEUR EN EUROPE

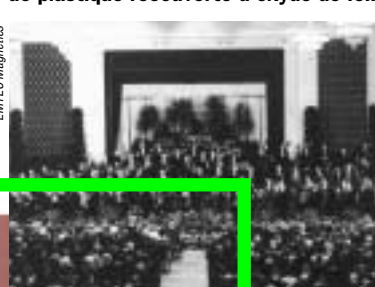
L'Europe prend le relais. Au cours des années 1920, les amplificateurs électroniques améliorent l'écoute, et l'Allemand Kurt Stille perfectionne la capacité d'enregistrement des télégraphes. Il parvient à réduire la taille des cylindres d'enregistrement : si un petit tube de 20 centimètres de longueur, il enregistre toute une symphonie.

La Société britannique d'images *Ludwig Blattnor* achète les brevets du procédé Stille et met au point un dispositif d'enregistrement magnétique, nommé *blattnorphone*. Destiné à l'enregistrement de bandes sonores de

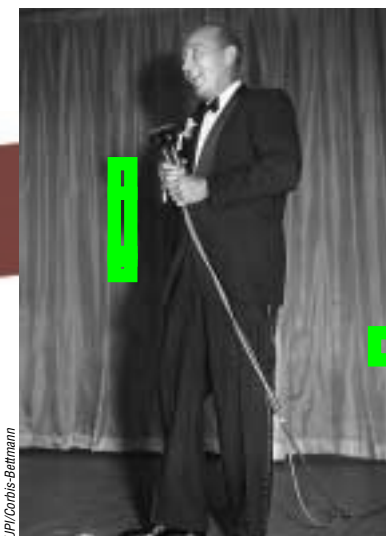


**1930**  
Ce dispositif d'enregistrement magnétique, le *blattnorphone*, est utilisé par la chaîne de radio-diffusion britannique, BBC, pour rediffuser ses émissions. Les changements de bobines (de lourdes bandes d'acier) mobilisent deux personnes.

**1936**  
L'orchestre philharmonique de Londres est enregistré, à Ludwigshafen, par un magnétophone ; le support est une bande de plastique recouverte d'oxyde de fer.

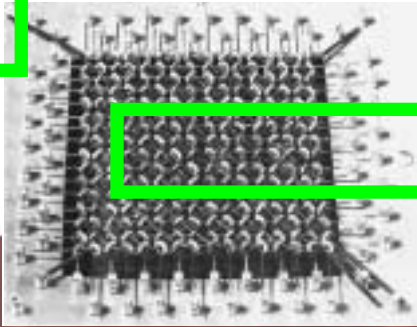


**1947**  
Bing Crosby chante pour la radio. Son programme est l'un des premiers à être enregistré sur bandes magnétiques avant d'être diffusé. Auparavant les émissions étaient toutes en direct.



**1933**  
Adolf Hitler devient chancelier d'Allemagne. La Gestapo utilisera les bandes magnétiques pour enregistrer les interrogatoires.

Mitre Corporation Archives

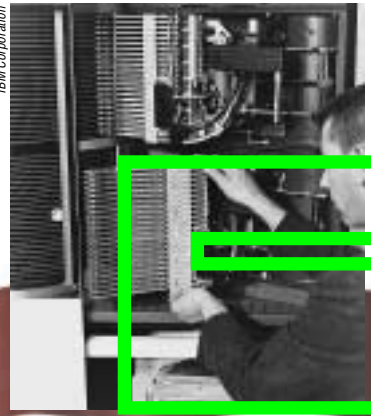


1956

Le premier prototype de magnétoscope est ici en démonstration. L'équipement est complexe, et le support utilisé est une bande magnétique de cinq centimètres de largeur.



IBM Corporation



1952

L'ordinateur Whirlwind I a une mémoire centrale de 32 octets.

JAMPE Archive



1957

La technique du disque dur est mise au point pour le stockage des données informatiques, et la société IBM produit le premier disque dur en 1957. Un dispositif intérieur (ci-dessus) est équipé de 50 disques, ce qui représente une capacité totale de stockage de 6 mégaoctets.

films, il est en fait un véritable studio, alors en plein développement. La radio-diffusion britannique, BBC, est créée en 1931 ; elle utilise un blattnerphone pour la retransmission mondiale de ses émissions. Pour conserver la trace des discours et des événements

important. Le blattnerphone mesure 1,5 mètre de hauteur et de largeur, et plus de 50 cm d'épaisseur. Il pèse près de 100 kg. Les informations sont enregistrées sur des bandes d'acier qui défilent devant les têtes de lecture à une vitesse de l'ordre de un mètre par seconde. Une demi-heure d'enregistrement nécessite environ un kilomètre et demi de bande. Le blattnerphone sera utilisé jusqu'en 1945.

de papier recouverte de particules aimantées. Le chimiste cherche à fabriquer du papier dur pour les embouts de cigarette. Il utilise des particules de braise dans de la colle et en appliquant le mélange sur le papier à cigarette. Il comprend qu'il pourrait procéder de la même façon avec des particules d'acier. En 1928, il construit un enregistreur qui fonctionne avec de telles bandes de papier. La machine de Pfleumer est si séduisante que la Société AEG lui achète tous ses brevets en 1932.

Cette société travaille avec I. G. Farben (aujourd'hui BASF) pour rechercher d'autres types de particules et de bandes. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des bandes de plastique recouvertes de particules d'oxyde de fer. Leurs recherches aboutissent à la fabrication du «magnétophone», exposé pour la première fois au public, à Berlin, en 1935, et l'ancêtre des dispositifs utilisés aujourd'hui.

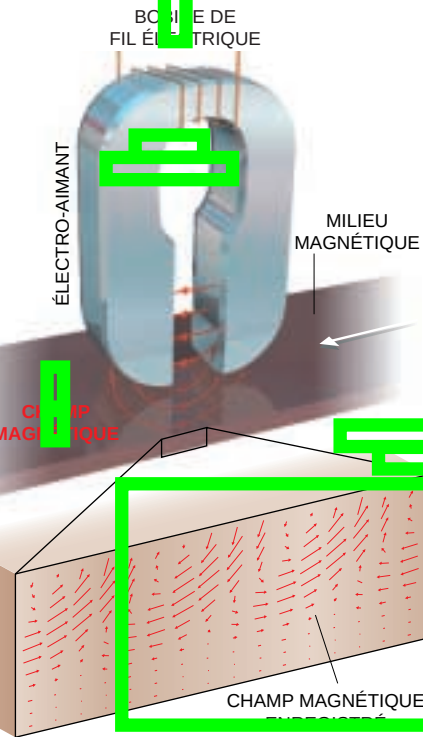
Ces succès européens piquent au vif les ingénieurs d'AT&T, qui recommencent à travailler sur l'enregistrement magnétique. Ces travaux n'aboutissent pas immédiatement à des produits commercialisés, mais ils fournissent des magnétophones utilisés pendant la Seconde Guerre mondiale. Plusieurs sociétés américaines travaillent ensemble sur un projet conduit par Semi Bogan, un ingénieur qui a travaillé avec Stille avant de fuir l'Allemagne nazie en 1935. Les premiers disques magnétiques sont produits pour l'enregistrement de messages diffusés dans les avions ou dans les bateaux, voire sur les champs de bataille.

Les Alliés qui surveillent les messages des Allemands savent que ceux-ci ont des dispositifs d'enregistrement plus

## LA MACHINE DE PFLEUMER

En 1925, Stille et ses collègues construisent un dispositif qui combine un dictaphone et un répondeur téléphonique. Contrairement à la Société AT&T, les sociétés européennes de téléphone autorisent la connexion de dispositifs d'enregistrement magnétique à leurs lignes de téléphone. Toutefois les difficultés économiques du moment empêchent le développement de ces machines. En 1933, une version améliorée de la machine de Stille est mise sur le marché par la Société Lorenz. La police nazie, la Gestapo, achète en quantité ces dispositifs pour espionner les conversations téléphoniques et enregistrer les interrogatoires des prisonniers. Tandis que la radio américaine ne diffuse que des émissions en direct, les radios européennes émettent des programmes enregistrés sur support magnétique.

Malgré ces succès européens, les enregistrements sur support magnétique ont un inconvénient notable : ils nécessitent d'immenses bandes (ou des fils) d'acier pesant, et ces fils d'acier sont de médiocres supports. Une étape cruciale est franchie, en 1927, le chimiste autrichien Fritz Pfleumer met au point un nouveau support : une bande



LES ENREGISTREMENTS MAGNÉTIQUES stockent des sons, des images ou des données informatiques. Les informations sont d'abord transformées en courant électrique, qui circule dans une bobine enroulée autour d'un électro-aimant. Le champ magnétique de l'électro-aimant (en rouge sur l'agrandissement) varie en fonction du temps et est imprimé dans le milieu magnétique qui se déplace par rapport à l'aimant.



1959

**Nikita Khrushchev, premier secrétaire du Parti communiste de l'URSS discute avec Richard Nixon, président des États-Unis, tout en visitant une exposition d'équipements ménagers, à Moscou. Ce «débat» autour d'une casserole a été enregistré sur une bande vidéo.**

Donal Philips / FPG International



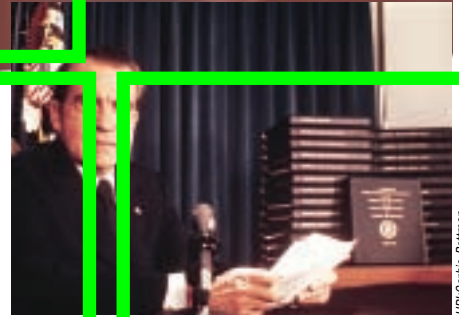
1963

**Premières cassettes audio de la Société Philips.**



1974

**Richard Nixon démissionne de la présidence des États-Unis, après que des enregistrements ont révélé le scandale du Watergate.**



UPI/Corbis-Bettman

performants, mais il n'en découvrent le détail qu'au cours des derniers mois de la guerre. Quand les troupes américaines prennent d'assaut les studios de la station Radio Luxembourg, ils trouvent un magnétophone qui diffuse un des derniers discours d'Hitler, enregistré sur une bande de Pfleumer. Les Américains démontrent plusieurs des dispositifs confisqués et les expédient par bateau vers les États-Unis.

Les recherches sur les enregistrements magnétiques reprennent après la guerre. En 1948, la Société *Ampex* produit une version améliorée du magnétophone, et la Société *3M* fabrique de meilleures bandes magnétiques. En quelques années, les films disparaissent au profit des bandes magnétiques, et les programmes de radio enregistrés se multiplient. Ces bandes sont faciles à manipuler, ce qui explique leur succès : on enregistre une chanson plusieurs fois et l'on diffuse le meilleur enregistrement, ou encore on efface les passages qui ne sont pas satisfaisants.

## CINÉMA, TÉLÉVISION, ORDINATEURS

Les bandes sonores des films sont désormais enregistrées sur des bandes magnétiques, support qui autorise des enregistrements successifs de certains passages, le mélange des dialogues et des effets sonores. En 1951, les bandes sonores de la quasi totalité des films produits à Hollywood sont enregistrées sur des bandes magnétiques.

La télévision est aussi un grand consommateur de bandes magnétiques sonores, et attend impatientement les enregistrements magnétiques vidéo. Toutefois, les ingénieurs ont une difficulté

technique à résoudre : le défilement de la bande d'un enregistrement audio nécessite la reproduction de signaux dont la fréquence atteint 20 000 cycles par seconde (c'est la limite détectable par l'oreille humaine), un enregistrement vidéo doit traiter beaucoup plus de données. Pour produire l'illusion d'un mouvement continu, la télévision délivre 25 images par seconde (30 aux États-Unis), chaque image étant constituée de plusieurs centaines de lignes horizontales contenant elles-mêmes plusieurs centaines de points. Au lieu de se contenter d'accélérer le défilement de la bande, les ingénieurs montent la tête de lecture sur un rotor, ce qui augmente la vitesse relative de défilement de la bande par rapport à la tête de lecture. La Société *Ampex* commercialise le premier magnétophone en 1956.

Les progrès réalisés dans les enregistrements magnétiques ne touchent pas seulement les variétés, le cinéma ou la télévision. Les ordinateurs en bénéficient également. Un des tout premiers ordinateurs, Whirlwind I, est mis au point par l'Institut de technologie du Massachusetts au cours des années 1940-1950. Sa mémoire centrale constituée d'un arrangement bidimensionnel de tout petits aimants de ferrite. Ces petits aimants sont aimantés dans deux directions opposées, l'une représentant 0, l'autre 1. Les mémoires d'autres ordinateurs sont des bandes (UNIVAC I, le premier ordinateur commercialisé aux États-Unis), des tambours ou des disques (rigides ou souples).

Dans les années 1970, les circuits intégrés remplacent les mémoires centrales, mais les disques magnétiques rigides restent le principal moyen de stockage des données informatiques. Récemment, les capacités de stockage sur les

disques ont notablement augmenté. Après les succès des particules d'oxyde de fer, on a fabriqué des films minces d'alliages enrichis en cobalt, dont les propriétés magnétiques sont meilleures que celles des oxydes. Ainsi, malgré la concurrence de l'enregistrement optique (le disque optique), l'enregistrement magnétique, sous toutes ses formes, reste la principale méthode de stockage des données électroniques.

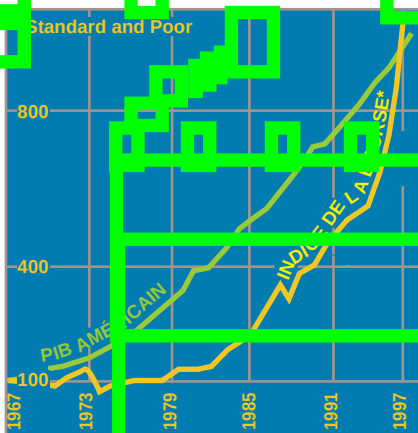
Depuis les années 1950, les produits accessibles au grand public se sont multipliés, notamment les magnétophones compacts et cassettes, les caméscopes et les magnétoscopes (la location des films enregistrés sur cassettes vidéo rapporte souvent plus d'argent que leur projection dans les salles de cinéma).

Toutefois, la possibilité d'enregistrer facilement et à l'insu des personnes concernées leurs conversations et leurs actes soulève des questions éthiques, car la mémoire d'un assemblage de particules magnétiques est bien plus fiable et plus objective que celle d'un cerveau humain. Bien que l'équilibre entre la recherche de la vérité et le respect des droits de la personne soit fragile, l'invention de Poulsen a certainement apporté davantage de bienfaits que de préjudices.

**James LIVINGSTON est professeur à l'Institut de technologie du Massachusetts, dans le département des sciences de l'ingénieur.**

**Marvin CAMRAS, *Magnetic Recording Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1988.**

***Magnetic Recording : The first 100 Years*, sous la direction de E. Daniel, C. Mee et M. Clark, IEEE Press, 1998.**



# La Bourse... ou la vie (du PIB)?

BERNARD GUERRIEN • SOPHIE MAILLIS

**Sur le long terme, baisses et hausses de la Bourse suivent le PIB. Toutefois les fortes baisses sont atténuées par l'État, car elles pénalisent l'économie.**

Lorsqu'un indice boursier baisse de 4 pour cent, c'est pour cent, au plus, on apprend que x milliards de francs sont partis en fumée», alors que, quand le même indice augmente, personne ne prétend que y milliards de francs ont surgi du néant! La hausse serait-elle normale, et pas la baisse? Le gros bon sens suggère que les gains ne peuvent indéfiniment s'accumuler, au-delà de ce qui résulte de la croissance de l'économie.

Les actions cotées en Bourse représentent des droits de propriété sur une fraction d'une entreprise, droits portant sur la valeur des entreprises – elle-même dépendante de leur production – et sur les dividendes qu'elles distribuent ou sont susceptibles de distribuer.

Les détenteurs «propriétaires» ne vendent qu'une part du «gâteau» que constitue la production de la firme, et non le pays dans son ensemble. Or les fluctuations du PIB sont faibles (une croissance moyenne annuelle autour de deux pour cent en Europe, ces dernières années), nettement moindres que celles du marché boursier pris dans son ensemble (CAC 40 ou Dow Jones).

## QUE DICTE LE BON SENS?

Si la production augmente annuellement de 2-3 pour cent, comme les actions représentent un droit sur une part de cette production, alors on peut penser que la rémunération qu'elles procurent va, en moyenne, augmenter de la même valeur. Il est vrai qu'à cette croissance du produit peut s'ajouter celle de la part dévolue aux propriétaires. C'est ce que les économistes appellent un «effet de structure».

Ainsi, en France, on a constaté, ces 20 dernières années, un réajustement de la part des salaires dans le PIB, qui est passée de 56 pour cent à 66 pour cent, celle des «revenus de la propriété» augmentant en conséquence. Toutefois, cette variation de répartition est très lente. En outre, on n'a pas observé, pendant la même période, un phénomène semblable aux États-Unis où les fluctuations boursières sont du même ordre qu'en France.

Or personne ne propose de revenir à redire lors des périodes d'euphorie où l'indice grimpe (l'indice CAC 40 a augmenté de 56 pour cent entre juillet 1997 et juillet 1998!). Tout le monde pourrait-il gagner «beaucoup plus», sans que la taille du «gâteau» augmente, ou sans que la part du revenu des propriétaires fasse un brusque bond, au détriment de celle des salariés?

La hausse, comme la baisse, est virtuelle. Supposons, par exemple, qu'en janvier 1997 j'achète une action Alcatel à 810 francs. Quatre ans plus tard, elle s'élève six mois plus tard, à 1 320 francs. Ai-je gagné 510 francs? Non! Je n'ai rien gagné tant que je n'ai pas revendu mon action. Supposons que je décide d'attendre avant de vendre. Le 19 août suivant, le cours de l'action Alcatel chute à 570 francs. Ai-je perdu 240 francs? Non, tant que je ne vends pas. Les hausses et baisses sont virtuelles.

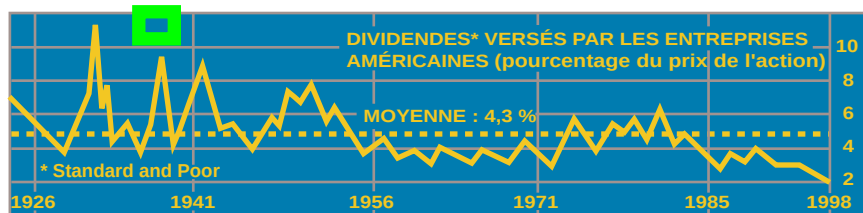
En fait, les variations boursières se traduisent essentiellement par une répartition entre les intervenants à la Bourse. Quand quelqu'un vend un titre dont le prix a augmenté, il réalise un gain; mais ce gain est fait «sur le dos» de celui qui achète. Evidemment, l'acheteur espère un gain

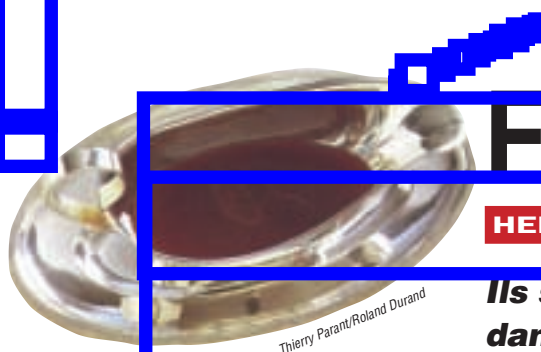
futur. Si la hausse se poursuit – ce qui semble si tant que cet espoir est partagé par les intervenants en Bourse – et si l'acheteur vend avant que l'espoir ne disparaisse, il récupère sa mise, et même plus, «sur le dos» du nouvel acheteur. Ce qui est recherché, c'est la plus-value (différence entre le prix de vente et le prix d'achat), et non le rendement des titres (rapport entre les dividendes et la valeur des titres), car ce rapport diminue en période de hausse boursière.

Toutefois, même si l'on ne peut griser par cette fuite en avant, on peut dire que la hausse ne peut durer indéfiniment. Il suffit qu'un événement soit interprété par certains comme annonciateur d'un retournement de tendance pour que celle-ci ait lieu: la baisse est aussi normale que la hausse, dont elle corrige les «excès».

## LES EFFETS SUR LA CROISSANCE

Les fluctuations boursières modifient la répartition entre propriétaires des droits sur le gâteau (constitué par la production), mais elles peuvent aussi avoir un effet sur sa taille. Notre détenteur d'un portefeuille d'actions qui voit la Bourse monter se sent plus riche – même virtuellement. Il est alors incité à plus consommer ou à investir, ce qui a un effet sur la production et sur l'emploi. Cet effet expliquerait en partie la croissance américaine de ces dernières années. En période de baisse boursière, on assiste à l'effet opposé, puisqu'il y a alors «appauvrissement» (virtuel). Cela explique les mesures destinées à rétablir la confiance: règles de sécurité imposées aux institutions financières, sauvetage par la collectivité des établissements en faillite, intervention directe de l'État dans l'activité économique. Ces interventions semblent aller de soi, du fait du caractère prétendument «anormal» des baisses de la Bourse, alors qu'elles ne le sont pas plus que ses hausses. Sur le long terme, la Bourse suit le PIB, personne n'espère mieux... sauf les joueurs.





Thierry Parant/Roland Durand

# Fils et grumeaux

HERVÉ THIS

**Ils se forment parce que l'eau diffuse lentement dans les gels et dans les empois.**

**L**es grumeaux? La honte du cuisinier. À son désespoir, ils apparaissent dans les sauces qu'il lie à la farine, telles les sauces béchamel. Les auteurs d'ouvrages de cuisine préconisent diverses façons de les éviter : certains conseillent de faire d'abord un roux, par cuisson de beurre et de farine, puis d'y ajouter du lait, froid selon certains, bouillant selon d'autres ; pour d'autres encore, on devrait suivre la méthode inverse, qui consiste à verser le roux dans du lait, froid ou bouillant selon les écoles.

Quelle méthode adopter? Osons gâcher un peu de farine, de beurre et de lait pour tester les quatre possibilités : nous découvrons alors que la formation des grumeaux est une question de vitesse. Quand on ajoute progressivement le roux au lait ou le lait au roux, les grumeaux n'apparaissent pas. En revanche, quand on mélange les deux ingrédients d'un coup, des grumeaux se forment, surtout quand on verse le roux dans le lait bouillant.

Cette expérience nous donne une méthode, mais elle n'explique pas le phénomène. Poursuivons l'étude en simplifiant la situation : le beurre sert principalement à cuire la farine, afin d'éviter son goût fade par création de molécules

aromatiques (le brunissement correspond aux réactions chimiques qui forment ces molécules aromatiques), mais il n'est pas la cause des grumeaux, qui s'obtiennent également par mélange de farine et d'eau. Pourquoi? La farine est principalement composée de grains d'amidon, eux-mêmes formés de molécules d'amylose et d'amylopectine. Ces deux molécules sont des polymères, c'est-à-dire des enchaînements (linéaires pour l'amylose et ramifiés pour l'amylopectine) de molécules de glucose. Ces molécules sont peu solubles dans l'eau froide, mais elles le sont dans l'eau chaude : les grains d'amidon gonflent alors, formant ce qu'on appelle un empois.

Cette observation nous donne alors une première piste, pour la compréhension des grumeaux : un bloc de farine qui tombe dans de l'eau chaude s'entourera d'une couche empoisée qui limitera alors la diffusion de l'eau vers le cœur sec du grumeau? L'explication est insuffisante, car si l'eau diffuse dans la périphérie des grumeaux, pourquoi n'atteindrait-elle pas aussi leur cœur?

Nous avons vu que tout est affaire de vitesse. Pour mesurer cette vitesse d'empoisage, simplifions encore le problème : faisons un grumeau à une seule dimension et dont on puisse observer le cœur. À cette fin, plaçons de la farine dans une éprouvette et versons de l'eau au-dessus de la farine (si l'eau est colorée, on suit sa diffusion dans la farine en observant un front coloré). Ce système, à la température ambiante, montre que l'eau s'infiltre très lentement dans la farine : moins d'un millimètre par heure.

Quand on chauffe l'eau à l'aide d'une résistance chauffante, l'eau fait gonfler les grains et c'est la diffusion de l'eau dans la partie empoisée qui limite la progression du front coloré. La vitesse de diffusion atteint alors plusieurs millimètres par heure.

Conclusion : c'est la lenteur de la diffusion de l'eau dans la périphérie empoisée des grumeaux qui explique que le cœur reste sec. Quand l'eau a diffusé et empoisé les grains d'amidon, ceux-ci, soudés, forment une couche qui ralentit la diffusion vers le cœur sec que celui-ci reste sec. Autrement dit, un

bloc de farine d'un centimètre de diamètre tombant dans l'eau chaude s'empoisera sur sa périphérie mais le cœur reste sec pendant un temps supérieur aux durées courantes de cuisson.

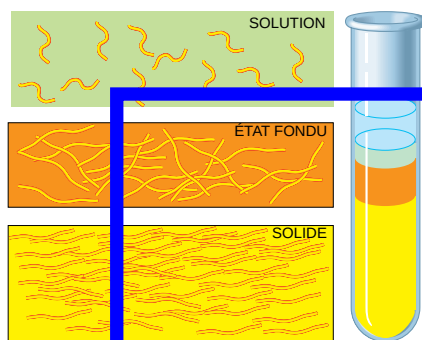
Comment se débarrasser des grumeaux? Aucune physique fondamentale n'est nécessaire pour le savoir : il suffit de diviser les grumeaux, à l'aide d'un fouet, par exemple, en blocs plus petits que l'épaisseur de la couche empoisée.

**C**ette théorie des grumeaux de farine s'applique-t-elle à des grumeaux d'autres types? Par exemple, les cuisiniers savent que les feuilles de gélatine doivent tremper dans l'eau froide avant d'être utilisées dans un liquide chaud : ceci qui contrevient à cette règle obtient des fils aussi difficiles à éliminer que des grumeaux. Les fils seraient-ils composés d'un cœur sec et d'une gaine où les molécules d'eau et de gélatine sont mêlées? Pour le savoir, mesurons d'abord la diffusion de l'eau dans une gelée froide en déposant de la poudre de café en un point de la surface : une zone colorée hémisphérique s'étend à une vitesse d'un centimètre par jour et s'arrête à cet endroit.

Puis répétons l'expérience que nous avons faite avec la farine, mais en remplaçant celle-ci par de la gélatine. On observe alors que le front de l'eau colorée ne s'enfonce que très lentement dans la gélatine... mais un nouveau phénomène apparaît : sous la couche où la gélatine est en solution, le matériau est à l'état solide.

De même, dans un bouillon chaud, une feuille de gélatine qui n'a pas trempé se dissout mal et conserve une partie centrale fondue dont les molécules adhèrent entre elles, formant les redoutables fils. En revanche, quand la feuille a trempé, l'eau a lentement diffusé jusqu'au cœur, et le chauffage provoque la dissolution : point de fils.

**Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 22 décembre 1998, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.**



Des fils apparaissent quand on place une feuille de gélatine dans l'eau chaude, parce que l'eau ne diffuse que lentement dans la feuille et que, au centre de la feuille, la gélatine est à l'état fondu. On observe ce phénomène quand on chauffe l'eau (en bleu) qui recouvre de la gélatine dans un tube : les molécules d'eau diffusent et forment une solution sur une très petite épaisseur (en vert), tandis que la chaleur qui est transmise à la gélatine fond cette dernière (en orange).



## Un détecteur de fossiles

**Il repère les ossements enfouis grâce à leur radioactivité.**

Les paléontologues rêvent d'une technique qui leur permettrait de repérer les fossiles invisibles parce qu'ils sont enfouis dans le sol. Jusqu'à présent, seuls les chercheurs fictifs (et peu crédibles) du film *Jurassic Park* disposaient d'un tel équipement (inspiré des méthodes de prospection sismique utilisées notamment dans la recherche pétrolière). Dans la réalité, nombre de techniques avaient été essayées, entre autres lors de la mise au jour du squelette de *Seismosaurus*, cet immense grand dinosaure sauropode trouvé au Nouveau-Mexique, dans les années 1980. Du radar au magnétonètre, en passant par le sismographe et le compteur Geiger, toute la panoplie déployée n'a pas donné de résultats plus convaincants que la baguette de sourcier préconisée par certains, au même titre que le pendule.

Des résultats beaucoup plus prometteurs viennent cependant d'être présentés par Ramal Jones, de l'Université de l'Utah à Salt Lake City. Ce physicien a mis au point et expérimenté depuis 1993 un équipement de détection des ossements fossiles, qui donne des résultats satisfaisants, à condition que les os soient radioactifs. Or beaucoup d'os le sont, car ils ont concentré les sels d'uranium ou de vanadium lors de la fossilisation. En milieu réducteur, par exemple en présence de restes animaux ou végétaux en décomposition, les ions uranium solubles s'unissent à l'oxygène pour former un oxyde d'uranium, l'uraninite. Ainsi les os en cours de fossilisation s'enrichissent en uraninite, qui est piégée dans la structure osseuse cristalline, ou qui précipite dans les vides et dans les fissures du fossile. La teneur des os en uraninite, et donc leur radioactivité, dépend de la concentration en ions uranium dans l'eau qui circule dans les roches.

Les os fossiles radioactifs ne sont pas rares ; la meilleure preuve en est que plusieurs sites paléontologiques importants, de la Thaïlande aux États-Unis en passant par le Niger, ont été découverts par des prospecteurs d'ura-

nium. Le détecteur inventé par R. Jones repère les ossements fossiles enfouis dans la roche en mesurant l'intensité du rayonnement gamma qu'ils émettent. Hélas, quand ces rayonnements traversent la roche, ils perdent de leur intensité, ce qui limite la profondeur à laquelle il est possible de détecter des os. Une des difficultés est le « bruit de fond » provoqué par les rayonnements gamma issus de l'uranium diffus dans la roche, qui peuvent « noyer » le signal radioactif émis par les fossiles. Le compteur de rayonnements gamma utilisé par R. Jones a été isolé par un blindage de plomb, qui ne laisse qu'une petite fenêtre de 2,5 centimètres de diamètre par où se font les mesures, ce qui élimine sensiblement le bruit de fond radioactif lorsque l'appareil est posé à une dizaine de centimètres de la surface du sol.

Lors de son exploration radiologique, un site est quadrillé, des mesures étant effectuées à chaque intersection du quadrillage. Le résultat est une carte de l'intensité du rayonnement gamma sur le site. Pour vérifier que les zones de plus forte radioactivité correspondent à des fossiles, il faut creuser, car il existe des concentrations en uranium non liées à

des fossiles. Toutefois la technique s'est révélée efficace : le premier site exploré, dans des roches du Crétacé de l'Utah, a été découvert par R. Jones et son épouse, Carol, avec les moyens habituels (détection de restes osseux en surface). L'exploration radiologique du site a d'abord localisé un groupe d'ossements appartenant à un hadrosaure. Une seconde campagne de prospection sur le même site, après l'extraction de l'hadrosaure, a révélé la présence d'autres ossements à 90 centimètres de la surface : un squelette d'ankylosaure, qui n'aurait sans doute jamais été trouvé sans le détecteur.

Sur un important gisement jurassique de l'Utah, où la plus grande partie du squelette d'un dinosaure carnivore avait été découvert, le crâne faisait défaut. Grâce à son appareil, R. Jones a localisé ce dernier à quelque distance du reste de l'animal. À l'échelle des temps géologiques, l'uranium se concentre assez rapidement dans les ossements : aussi cette technique est applicable à des sites paléontologiques beaucoup plus récents que les gisements de dinosaures. Elle a, par exemple, donné de bons résultats sur un site contenant des chevaux fossiles et remontant à l'époque pliocène (–5 à –1,8 million d'années).

L'appareil inventé par R. Jones n'est pas infallible. Les conditions *sine qua non* sont que les fossiles recherchés soient radioactifs (plus ils le sont, meilleures sont les chances de les repérer), qu'ils soient de bonne taille et qu'ils ne soient pas trop profondément enfouis. D'ores et déjà, cet instrument permet de concentrer les fouilles sur les endroits vraiment prometteurs et ainsi d'économiser du temps et de l'énergie (de l'énergie musculaire, principalement, car la fouille paléontologique est un exercice laborieux physique). Il évite ainsi des accidents fâcheux pour l'intégrité des fossiles lors de leur extraction : tout paléontologue de l'Utah a eu des surprises désagréables en rencontrant un os là où il ne l'attendait pas et où il roulait dans un peu trop de vivacité... La technique de prospection radiologique mise au point par R. Jones, certes susceptible d'être améliorée, réalise déjà, en grande partie, le rêve des paléontologues.

Eric BUFFETAUT



Ramal Jones (à gauche) démontrant l'efficacité de son détecteur de fossiles sur un site du Crétacé de l'Utah, où son appareil a permis de découvrir deux squelettes de dinosaures.

## Graines de plastiques

**Des plantes transgéniques produisent des polymères biodégradables qui concurrenceront peut-être un jour les plastiques de synthèse.**

**T**rop chers ou imparfaits, les plastiques biodégradables n'ont pas eu le succès escompté. Des chercheurs misent sur le développement des plantes génétiquement modifiées pour leur donner une nouvelle chance en abaissant les coûts de production.

Parmi les polymères biodégradables, la vaste famille des PHA (ou polyhydroxyacides) intéresse les industriels. Naturellement produits par de nombreuses bactéries qui les utilisent comme réserve d'énergie ou de carbone, les PHA présentent des aspects très différents : de rigides et cassants à souples et résistants. Ils permettent ainsi de réaliser nombre de produits, des couverts jetables pour la restauration rapide aux cartes de crédit, en passant par les films pour l'emballage de denrées alimentaires. Ces plastiques sont, en outre, totalement biodégradables : une bouteille en PHA est dégradée à 80 pour cent en 15 jours dans les conditions requises pour la production à grande échelle de compost (action simultanée de forces mécaniques et de micro-organismes à haute température).

Aujourd'hui, seul un polymère de la famille des PHA est commercialisé. Produit dans des fermenteurs industriels à partir d'une bactérie et d'un sucre (le glucose), son prix de revient le confine à des marchés de niche à haute valeur ajoutée. D'où l'idée de produire ce polymère, non plus à partir de bactéries, mais directement dans des plantes cultivées en plein champ, comme le colza ou la canne à sucre. «Cela revient à remplacer le sucre utilisé en fermentation par le gaz carbonique de l'atmosphère. La photosynthèse transforme ensuite gratuitement la plante en usine à plastique», explique le responsable du programme

industriel qui affirme avoir produit le polymère dans des graines de colza. Le seuil de rentabilité se situant entre 15 et 20 pour cent du poids sec de la graine (aujourd'hui la proportion n'excède pas cinq pour cent de la masse sèche), la commercialisation du plastique végétal n'est pas prévue avant cinq à dix ans.

Selon Yves Poirier, à l'Université de Lausanne, le défi scientifique réside dans le contrôle de la composition des polymères produits par les plantes. On cherche à obtenir des molécules aussi variées que leurs concurrentes d'origine fossile. Le biologiste est en passe de relever ce défi puisqu'il est parvenu à produire différents polymères dans une plante – *Arabidopsis thaliana* – bien connue des généticiens pour la simplicité de son génome (ensemble des gènes d'un organisme vivant).

Avec deux collègues de l'Institut californien Carnegie, Y. Poirier s'est tout d'abord intéressé au PHB (polyhydroxybutyrate), un polymère de la famille des PHA composé d'une seule séquence répétée un grand nombre de fois, et produit par plus de 100 genres de bactéries. Grâce aux techniques classiques du génie génétique, les chercheurs ont transféré dans le génome d'*Arabidopsis thaliana* les gènes de la bactérie *Ralstonia eutropha* et codant les enzymes responsables de la synthèse du PHB.

La production du polymère n'est possible que dans les compartiments cellulaires possédant la molécule (dite précurseur) sur laquelle agit la première enzyme de la chaîne de biosynthèse. Dans le cas présent, il s'agit de l'acétyl-coenzyme A, une molécule présente notamment dans le cytoplasme (milieu visqueux contenant les composants de la cellule) et dans les plastes (organites des cellules végétales, sites de la photosynthèse ou de l'accumulation des réserves) des cellules. Dans le cytoplasme, le résultat s'est révélé décevant : la concentration en PHB n'excédait pas 0,1 pour cent du poids sec des feuilles d'*Arabidopsis*, dont la croissance était en outre anormale. Dans les plastes, au contraire, la concentration en PHB atteignait 14 pour cent du poids sec. Fort de ces résultats, le chercheur lausannois a étudié un autre polymère de la famille des PHA, plus flexible que le PHB. Le trans-

fert d'un seul gène provenant, cette fois, de la bactérie

## BRÈVES

### Régénérescence de neurones

Le dogme selon lequel les quelque 100 milliards de neurones du cerveau humain disparaissent progressivement sans être remplacés est caduc. Une équipe américaine a montré que des neurones de personnes décédées contenaient des substances que seules les cellules qui se divisent incorporent : ces neurones avaient été produits peu avant le décès. Environ 500 nouveaux neurones se différencient chaque jour. Cette découverte ouvre de nouvelles voies de recherches sur les maladies neuro-dégénératives, telles la maladie de Parkinson ou celle d'Alzheimer : la perte de neurones traduit une attaque destructrice, mais peut-être aussi un défaut de régénération.

### Risques professionnels

Une cinquantaine de joueurs de football hollandais et 23 nageurs et athlètes, tous professionnels, ont subi plusieurs tests cognitifs. Les résultats sont décevants : les athlètes : les spécialistes expliquent ces déficiences non par le choix de l'activité sportive en fonction de l'intelligence, mais par la pratique du football, où les traumatismes cérébraux s'accumulent avec les chocs de ballon sur la tête. Au cours d'une saison un joueur reçoit environ 800 fois le ballon sur la tête.

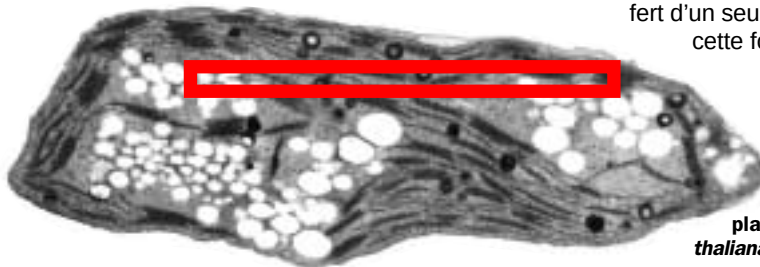
### Charbonnement académique

Les membres de l'Académie des sciences et les membres correspondants de cette même Académie ont été tous convoqués au Collège de France : le bureau de l'Académie leur propose une réforme de l'Académie des sciences telle que cette vénérable institution n'en avait connue depuis

Richelieu.

L'Académie des sciences française envisage de s'élargir, en réunissant les membres et les membres correspondants dans une seule classe. Simultanément une Académie d'ingénierie pourrait être créée à partir du CADAS (Comité des applications de l'Académie des sciences).

Suite page 24



**Inclusions de plastique (en blanc) dans les plastes d'*Arabidopsis thaliana* (x 1000).**

### Du lait maternel

Le lait maternel contient des molécules qui sont absentes des laits artificiels pour bébés, notamment des acides gras à chaîne longue comme le docosahexaénoïque (DHA) qui est important pour la croissance des neurones et des cellules photoréceptrices de la rétine du nourrisson. Les chercheurs de l'INRA ont montré que des porcelets nouveau-nés allaités uniquement avec un lait enrichi en DHA avaient une croissance adéquate. Ces résultats aideront-ils à l'amélioration de la composition des laits artificiels ?

### La pièce de deux livres

La nouvelle pièce anglaise de deux livres (environ trois euros) est une ode à la technologie. Elle a été créée par un jeune homme de 19 ans. Le chiffre 19 montre la persévérance de l'artiste graveur, mais l'incompétence mécanique des concepteurs de la Royal Mint. Comme deux roues dentées tournent en sens inverse, une chaîne comportant un nombre impair de roues ne peut que rester... perpétuellement bloquée !

### Donner du sang pour vivre vieux

La saignée était-elle bénéfique ? C'est ce que semble montrer une étude suédoise. Des chercheurs de l'université de Göteborg ont suivi pendant neuf ans, et observé que les donneurs de sang réguliers ont moins d'infarctus que ceux qui gardent leur sang. Toutefois les donneurs de sang pourraient également être des personnes plus soucieuses de leur santé que les autres. Vivant plus sainement, elles seraient moins malades.

### Un grand mangeur de poisson

Les restes fossiles d'une nouvelle espèce de dinosaure viennent d'être mis au jour dans le désert du Ténéré, au centre du Niger. Cette espèce, nommée *Suchomimus tenerensis*, fait partie du groupe des spinosauridés, des dinosaures piscivores dotés de mâchoires longues et étroites avec des dents coniques et de fortes griffes. Elle était capable de saisir des crochets à viande.



Certaines particularités du crâne, analogues à celles d'anciens crocodiliens, témoignent d'une adaptation à une alimentation incorporant des poissons et de la viande. Le museau, étroit, facilite la pénétration dans l'eau et les dents coniques sont mieux à même de percer et de saisir, que de trancher.

Suite page 26

*Pseudomonas aeruginosa* a suffi pour obtenir des granules de ce nouveau plastique dans les cellules foliaires d'*Arabidopsis*. Toutefois, la production n'a pas dépassé 0,1 pour cent du poids sec des feuilles d'*Arabidopsis thaliana*.

Les plantes oléagineuses comme le colza ou le tournesol semblent les mieux adaptées à la production en plein champ de PHA. En effet, les molécules intervenant dans la synthèse de ces polymères (l'acétyl-coenzyme A dans le cas du PHB) se retrouvent également dans le métabolisme des lipides. De plus, la maîtrise des techniques de récolte des oléagineux et d'extraction des lipides faciliterait la création d'une industrie des PHA. Enfin la plante sur laquelle ont été

menée la plupart des recherches est voisine du colza, ce qui permet de transférer aisément les résultats du laboratoire au champ.

La synthèse massive de PHB, par exemple, risque cependant d'entraîner une diminution de la production de lipides du fait de l'immense dépense en acétyl-coenzyme A. Afin de contrôler la production du polymère, Y. Poirier envisage de répandre sur les cultures une substance qui inhiberait l'expression des gènes codant le PHB ; les cultures ainsi traitées seraient destinées à la production d'huile, tandis que celles qui ne recevraient pas de traitement produiraient du PHB.

Catherine BUREAU

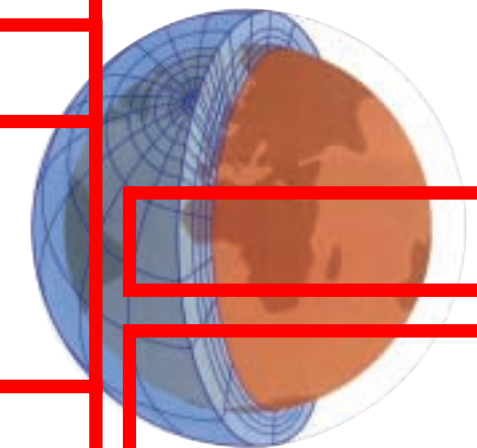
## Un temps plus sûr

**La prise en compte de l'état de l'atmosphère en « temps réel » améliore les prévisions.**

Quel temps fera-t-il demain ? Le même qu'aujourd'hui, répond prudemment le statisticien, qui se trompe ainsi moins d'une fois sur deux. Le temps futur est fonction du temps présent. Les météorologues prévoient le temps en calculant l'évolution de l'atmosphère à partir d'un état initial, connu par des mesures et par des calculs : le Centre national de recherches météorologiques précise et améliore les prévisions par une meilleure définition des conditions initiales.

Un modèle de prévisions météorologiques est un ensemble d'équations qui décrivent la physique de l'atmosphère et ses interactions avec le relief et la surface des océans. Dans le modèle Arpège, l'atmosphère est décrite par les valeurs de paramètres météorologiques (température, pression, vitesse du vent, hygrométrie...) aux intersections d'un maillage tridimensionnel. L'état de l'atmosphère est défini, à chaque instant, par les valeurs d'environ 20 millions de paramètres : c'est 100 à 200 fois plus que le nombre de mesures collectées par le réseau météorologique mondial.

On calcule les paramètres manquants par une opération nommée « assimilation » : en utilisant les lois physiques insérées dans le modèle, on recherche l'état de l'atmosphère qui se rapproche le plus des mesures et des résultats de la prévision la plus récente. Depuis mai 1997, la méthode utilisée est « l'assimilation variationnelle en trois dimensions » :



**Pour prévoir le temps on calcule l'évolution de paramètres tels que températures, vitesses du vent ou pressions à partir des valeurs initiales sur un maillage de l'atmosphère.**

l'interpolation n'est que spatiale. On divise la journée en quatre périodes de six heures centrées sur 0, 6, 12 et 18 heures, et l'on suppose que l'état de l'atmosphère n'évolue pas pendant ces périodes : on fait comme si toutes les mesures relevées au cours d'un même intervalle de six heures l'avaient été instantanément au milieu de cet intervalle. On calcule alors l'état de l'atmosphère le plus vraisemblable à ce moment.

Une nouvelle méthode, l'assimilation variationnelle en quatre dimensions, prend en compte l'évolution de l'atmosphère en continu, par l'insertion dans le programme des mesures avec leur heure exacte de relevé (arrondie à l'heure près pour tenir compte des incertitudes). On recherche alors la « trajectoire temporelle » de l'état de l'atmosphère qui passe au plus près de toutes les valeurs mesurées dans l'intervalle de temps. La situation initiale ainsi calculée est plus proche de la réalité, et les extrapolations meilleures, particulièrement aux échéances de deux et trois jours.

## Antidépresseur d'un troisième type

*Il empêche une petite molécule, nommée substance P, d'agir.*

Les chefs de file des antidépresseurs les plus couramment prescrits ont près de 50 ans ; depuis leur découverte, seuls des composés d'action un peu plus ciblée ou ayant moins d'effets secondaires ont été synthétisés. Or, certaines personnes sont insensibles à ces substances ou ne les supportent pas. Aussi les pharmacologues cherchent-ils de nouvelles classes de molécules : ils ont découvert une substance qui n'agit pas comme les antidépresseurs classiques, mais qui en a les effets bénéfiques.

Chez les personnes déprimées, le stress et l'angoisse épuisent la production des systèmes de la sérotonine et de la noradrénaline : ces neuromédiateurs, des molécules qui transforment un signal électrique en un signal chimique, assurant la transmission de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre, sont en concentration insuffisante. Les antidépresseurs classiques augmentent la concentration en sérotonine et en noradrénaline dans le cerveau en bloquant leur recapture par les neurones ou en inhibant leur dégradation enzymatique.

Les peptides, de petits fragments de protéines, constituent une autre classe de neuromédiateurs. Parmi eux, la substance P qui véhicule les sensations douloureuses de la périphérie, la peau notamment, vers la moelle épinière.

Cette substance P a été découverte en 1981 ; en 1975, les biologistes ont mis en évidence son rôle de neuromédiateur et, dès sa présence dans le cerveau, puis en 1982, montré qu'elle agit sur plusieurs types de récepteurs. Le récepteur NK1, pour lequel la substance P a la plus d'affinité, a été cloné en 1989 et, en 1991, on a synthétisé le premier antagoniste de ce récepteur (l'antagoniste de la substance P empêche ce neuromédiateur d'agir, car il prend sa place, sur le récepteur NK1, par exemple).

Plusieurs laboratoires pharmaceutiques ont synthétisé de tels antagonistes, dont certains atteignent le cerveau, même quand ils sont administrés par voie orale (on pouvait craindre qu'ils ne franchissent pas la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau). Comme la substance P agit sur des récepteurs dans tout l'organisme, on a espéré que les antagonistes des récepteurs NK1 lutteraient contre la douleur, l'inflammation, l'asthme ou encore la migraine mais, jusqu'à présent, aucune de ces substances n'avait révélé de vertus pharmacologiques.

La production de substance P est activée en réaction à des stimulations désagréables, à des stress. Chez le cobaye, l'administration de substance P dans le système nerveux central déclenche un stress, caractérisé par des mouvements désordonnés et par des vocalises. Ces vocalises sont également émises par les jeunes cobayes séparés de leur mère. Les substances antidépresseuses déjà connues suppriment ces vocalises déclenchées par la substance P. L'antagoniste de la substance P agit aussi.

L'antagoniste de la substance P synthétisé par les Laboratoires Merck a été testé chez 200 personnes atteintes de dépressions plus ou moins graves : il a des effets comparables à un antidépresseur classique d'efficacité moyenne, sans en avoir les effets secondaires (troubles de l'activité sexuelle et nausées). L'antagoniste n'agit pas sur la concentration en sérotonine ou en noradrénaline (ce qui expliquerait qu'elle n'a pas les effets secondaires des antidépresseurs classiques), mais bloquerait certains circuits du système de la dopamine. Ça agit précisément l'antagoniste de la substance P ? Les noyaux amygdaliens, des aires cérébrales qui participent au contrôle des émotions, sont particulièrement riches en substance P, et seraient parmi les sites potentiel d'action de l'antagoniste.

## Les diamants du manteau

*Tous les diamants sont formés à partir du carbone du manteau terrestre.*

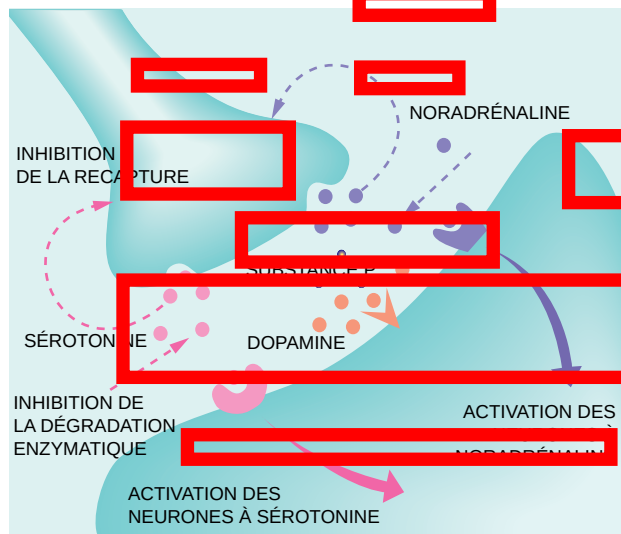
Les diamants sont éternels : leur résistance et leur inaltérabilité sont précieuses aux géologues. Les diamants, peu transformés entre leur formation en profondeur et leur découverte à la surface du Globe, préservent des informations précieuses sur les phénomènes qui se déroulent dans les profondeurs du manteau terrestre. Des doutes subsistaient toutefois sur l'origine du carbone contenu dans les diamants : nous venons de montrer qu'il provient, dans tous les cas, du manteau terrestre.

Les diamants, cristaux de carbone, proviennent d'une plus grande profondeur que tous les autres minéraux de la surface de la Terre : certains diamants proviennent du manteau inférieur, à plus de 700 kilomètres sous nos pieds. En comparaison, les fragments de roches des magmas mantéliques, parviennent rarement à plus de 200 kilomètres, et le forage artificiel le plus profond n'atteint que 15 kilomètres.

On distingue deux sortes de diamants, selon les inclusions qu'ils contiennent : les diamants péridotiques (une péridote est une roche à grains verts noirâtres) et les diamants éclogitiques (une éclogite est une roche massive et dure, à cristaux rouge orangé et verts). Les diamants péridotiques sont, sans ambiguïté, formés à partir du carbone contenu dans les roches du manteau : leurs rapports d'abondance des isotopes stables carbone 13 et carbone 12 (les noyaux des isotopes d'un élément chimique contiennent des nombres différents de neutrons) varient dans le même intervalle que pour ces roches.

En revanche, les diamants éclogitiques sont généralement plus pauvres en carbone 13. D'où vient le carbone qui les compose ? Les géochimistes ont proposé que les sédiments marins, enrichis en carbone 12 par l'activité biologique, participent en partie ou en totalité à leur formation. De tels sédiments sont, en effet, injectés dans le manteau dans les zones de subduction, où une plaque tectonique océanique passe, avec les sédiments qui s'y sont déposés, sous une autre plaque tectonique.

Comment vérifier la valeur de cette hypothèse ? Parmi les impuretés conte-



Les antidépresseurs classiques augmentent la concentration en sérotonine et en noradrénaline dans le cerveau, en bloquant leur recapture par les neurones ou en inhibant leur dégradation. L'antagoniste de la substance P agirait directement sur le système de la dopamine.

### Les doigts de Saint-Antoine

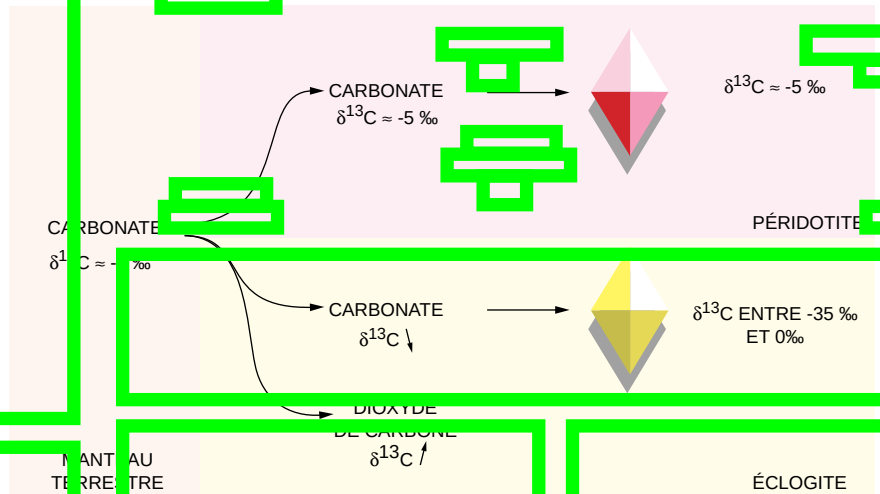
Le chef-d'œuvre de Matthias Grünewald est le Retable d'Issenheim, achevé vers 1515. Selon Marcel-Francis Kahn, de l'Hôpital Eschat, Matthias Grünewald y a peint la première représentation d'une maladie vasculaire des extrémités : les doigts de Saint-Antoine y sont bleutés et atrophiés, signe d'une maladie liée à l'ergotisme (l'ergotisme est dû à la consommation d'un champignon parasite du seigle, qui est un puissant vasoconstricteur). Les doigts des personnages de la toile ont des doigts amputés). L'artiste aurait peint ces détails par reconnaissance envers la confrérie des Antonins qui l'a hébergé quelque temps et qui avait le privilège de traiter les personnes atteintes du « feu de Saint-Antoine », ultérieurement nommé ergotisme.

### Lave et dune

La sonde Mars Global Surveyor a révélé de nouvelles structures géologiques à la surface de Mars : des plaques de laves solidifiées et des dunes. Les dunes martiennes étaient connues depuis la mission Mariner 9, en 1972, mais le mouvement du sable qui constitue les dunes a été révélé par des images du pôle Nord de Mars. Les dunes sont couvertes de glace. Des zones de sable noir apparaissent par endroits : la glace qui les recouvrait a disparu, sublimé, ou érodée par le vent. Le vent a alors déplacé une partie de ce sable sur les dunes blanches, où les astronomes ont observé de fins filaments noirs.

### Art préhistorique

La grotte Chauvet, découverte il y a quatre ans à Vallon-Pont-d'Arc, en Ardèche, commence à livrer ses secrets aux préhistoriens. Ces derniers ont découvert que des ponctuations rouges de plusieurs centimètres de diamètre ont été réalisées par l'application sur la roche de la paume. Deux panneaux ont été décorés chacun par un individu différent : l'un plutôt fluët, et l'autre assez grand, probablement un homme d'environ 1,80 mètre. Par ailleurs, le comptage des animaux représentés confirme aussi la première estimation : les animaux « formidables », rhinocéros, mammoths et félins, sont largement majoritaires.



On distingue deux types de diamants naturels selon l'environnement rocheux où ils se forment à partir de carbonate. Dans les péridotites (en haut), le carbonate est stable et la proportion de carbone 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) dans le diamant est la même que dans les roches du manteau terrestre. Dans l'éclogite (en bas), une partie du carbonate se transforme en dioxyde de carbone. Lors de la séparation des deux phases, le carbonate s'appauvrit en carbone 13 et aussi le diamant.

nues dans le diamant, l'azote est la plus abondante : 70 pour cent des diamants en contiennent, et sa concentration moyenne dans le diamant est de 300 atomes pour un million. Et l'azote possède deux isotopes stables, l'azote 14 et l'azote 15, dont le rapport d'abondance est nettement différent dans le manteau et dans les sédiments océaniques. Nous avons mesuré ce rapport pour des diamants éclogitiques extraits de la mine de Jwaneng, au Botswana : il varie dans le même intervalle que pour les roches du manteau et est insens-

patible avec une origine sédimentaire. La vie sur Terre n'est donc pas responsable de l'origine compositionnelle topique en carbone 13 des diamants éclogitiques. Cette dernière résulterait de leur mécanisme de formation : en présence d'éclogites, le carbone contenu dans les roches sous forme de carbonate peut se transformer en dioxyde de carbone, ce qui modifie les rapports isotopiques dans le carbonate et, finalement, dans les diamants.

Pierre CARTIGNY et Marc JAVOY, Institut de physique du Globe, Paris

## Leptine multifonction ?

**Le rôle de l'hormone anti-graisse dans l'immunité et le système vasculaire.**

La leptine est une hormone connue depuis 1995 pour son action sur l'obésité grâce aux travaux de Jeffrey Friedman et de ses collègues de l'Université Rockefeller. Ils ont montré que des injections de leptine provoquaient l'amaigrissement des souris rendues obèses par suppression du gène codant la synthèse de cette hormone. Les biologistes pensent que la leptine informe le cerveau de la quantité de graisse présente dans le corps et indique si l'organisme doit continuer de se nourrir ou non. Son action se limite-t-elle à la régulation du poids ?

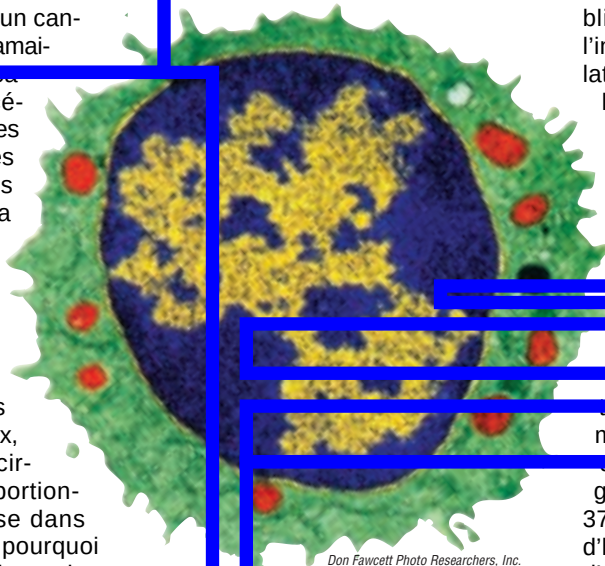
Récemment, des chercheurs ont identifié des récepteurs spécifiques

de la leptine sur la paroi des capillaires en développement et sur les lymphocytes T, une catégorie de globules blancs du sang. Ces résultats indiquent que la leptine pourrait intervenir dans des cas de cancer ou d'immunodépression.

En septembre 1998, Rocio Sierra-Honigsmann et ses collègues de l'Université Yale ont découvert ces récepteurs sur des cellules endothéliales qui tapissent les vaisseaux sanguins humains. Afin d'étudier la fonction de la leptine dans le système vasculaire, les chercheurs ont injecté des vaisseaux contenant l'hormone dans les cornées (le blanc de l'œil) de rats où la croissance de vaisseaux sanguins est facilement observable. Ils ont constaté la prolifération de nouveaux vaisseaux sanguins, alors que les cornées de rats témoins qui avaient reçu des injections de solution saline sont restées intactes.

Les personnes souffrant d'un cancer sont souvent victimes d'un amaigrissement grave, nommé cachexie. Or les cellules cancéreuses sécrètent des substances qui favorisent la croissance des vaisseaux sanguins. Des études sont en cours pour identifier la leptine parmi ces substances. Si tel est le cas, l'amaigrissement serait un effet secondaire du cancer.

Par ailleurs, l'équipe de Graham Lord, de Londres, a rapporté d'autres découvertes concernant la leptine. Selon eux, la concentration en leptine circulant dans le sang est proportionnelle à la quantité de graisse dans les cellules. En recherchant pourquoi les personnes maigres et mal nourries sont plus vulnérables aux maladies infectieuses, les biologistes ont découvert des récepteurs de la leptine dans les membranes de certains globules blancs, les lymphocytes T. Dans ces cellules, l'hormone activerait la sécrétion de cytokines, des molécules qui favorisent la réaction immunitaire en stimulant la sécrétion d'anticorps par d'autres lymphocytes et en accélérant la spécialisation de certaines cellules



Un lymphocyte T sur lequel on a découvert

en cellules tueuses d'agents infectieux (par exemple, des bactéries).

La réaction immunitaire d'un obésitaire qui endure pendant 48 heures à l'injection d'une substance irritante est trois fois moins importante que celle d'une souris bien nourrie. Cependant, l'injection de leptine compense cet affai-

blissement. Ces résultats expliquent l'inefficacité des vaccins sur des populations victimes de famine : leurs cellules contenant peu de graisses sécrètent peu de leptine, et le système immunitaire est moins activé et donc moins efficace.

Parallèlement à ces nouveaux résultats, l'étude des effets de la leptine sur le poids est toujours en cours. En juin, la Société Américaine, en Californie, a rapporté les résultats de tests cliniques sur l'utilisation de la leptine dans le traitement de l'obésité : huit obèses modérés qui ont absorbé une forte dose de leptine ont perdu plus de sept kilogrammes en six mois. En revanche, 37 autres qui ont absorbé des doses d'hormone inférieures, ont perdu moins d'un kilogramme, alors qu'ils suivaient un régime hypocalorique.

La leptine est sans doute une hormone à fonctions multiples, son rôle dans la régulation pondérale n'étant vraisemblablement que la «partie émergée de l'iceberg». La réaction initiale étant une grande consommatrice d'énergie, son affaiblissement réduit les dépenses caloriques, mais cette réaction adaptative semble plutôt avoir des conséquences néfastes.

## Des moteurs protéiques

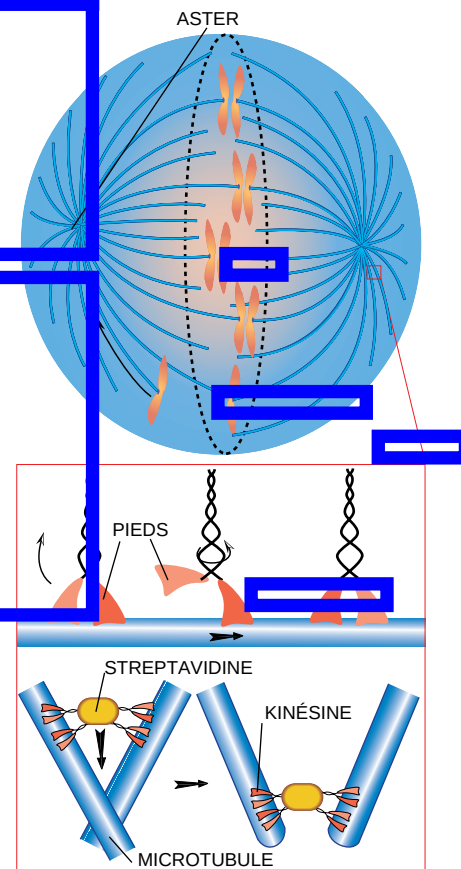
### Trois protéines pour étudier le squelette des cellules.

Pour qu'une cellule réussisse sa division, elle doit dupliquer l'ensemble de ses chromosomes, puis le diviser en deux lots similaires. Lorsque cette opération réussit, chacune des cellules filles hérite d'un lot identique à celui de la cellule mère, et le cycle peut continuer. Cette «chorégraphie» de la reproduction est la même pour toutes les cellules. Tout d'abord les chromosomes, accolés en paires, se rassemblent dans le plan équatorial de la cellule (voir la figure) pendant qu'aux extrémités de la cellule apparaissent deux structures en forme d'étoile, les asters. Ces derniers sont composés de microtubules (les microtubules) dont une extrémité est fixée à un centrosome. Les microtubules, en retrecissant, entraînent les chromosomes qui se répartissent équitablement dans la cellule avant qu'elle ne se scinde en deux par le milieu. Qui est responsable de la bonne organisation des microtubules? Comment se forment les asters?

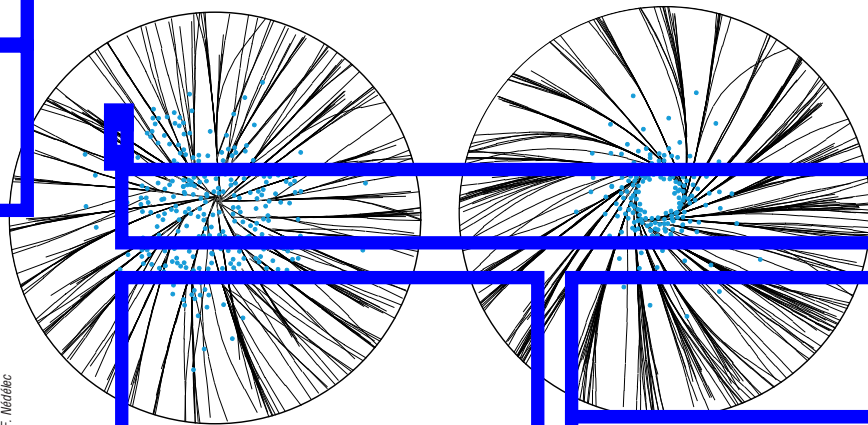
Dans les cellules animales, des petits éléments nommés centrosomes engendrent des asters. Cependant, certaines cellules, notamment les cellules végétales, sont dépourvues de centrosome. Dans ces cellules, la formation des asters semble être la conséquence d'un phénomène d'auto-organisation.

En 1997, à l'Ecole supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris, François Nedelec a étudié un mécanisme de formation d'aster. Il a construit un modèle expérimental de la cellule, où trois protéines seulement sont mélangées : la tubuline qui, en se polymérisant, forme les microtubules, la kinésine et la streptavidine.

Dans une cellule qui se divise (ci-contre, en haut), les chromosomes se rassemblent dans le plan équatorial (cercle en pointillés) pendant que des asters de microtubules se forment aux extrémités de la cellule. Ces microtubules, formés de tubuline, entraînent les chromosomes vers les pôles de la cellule. Les microtubules se déplacent les uns par rapport aux autres grâce à des complexes moteurs constitués de streptavidine et de kinésine (ci-contre, au milieu). Les deux «pieds» de la kinésine se meuvent le long du microtubule par une succession de petits pas (ci-contre, en bas).



F. Nédélec



**Simulation informatique de la formation d'un aster (à gauche). Les microtubules sont représentées par les traits noirs et les complexes moteurs par les points bleus. À droite, les microtubules longs constituent un vortex, les moteurs sont regroupés au centre.**

La kinésine est un moteur protéique bien connu. Il a deux «pieds» qui se fixent simultanément sur un microtubule. L'un de ces pieds reste fixe pendant que l'autre pivote de 80 degrés et vient se placer de l'autre côté. À son tour, ce pied reste immobile tandis que l'autre se déplace. Ainsi, «pas à pas», la kinésine se déplace le long d'un microtubule.

La streptavidine lie quatre kinésines et forme ainsi des complexes de moteurs, qui en associant deux microtubules, forment un lien mécanique. Les kinésines appartenant au complexe se meuvent le long des deux microtubules qui sont écartés l'un de l'autre.

Le rapport à autre jusqu'à ce que leurs extrémités se rejoignent. Ainsi, toutes les extrémités des microtubules initialement éparpillées se rassemblent et forment un aster.

Les expériences ont été effectuées dans un espace restreint de la taille d'une cellule et ont confirmé cette mécanique de formation des asters. Quand les microtubules deviennent plus longs que le rayon de la boîte, ils ne peuvent plus se maintenir en aster, et s'arrangent en une nouvelle structure nommée vortex, où les filaments sont disposés en spirale.

F. Nédélec a ensuite modélisé le système. La simulation informatique a repro-

duit les structures obtenues dans les expériences et a confirmé les hypothèses retenues. Une telle simulation aide le biochimiste à choisir des conditions expérimentales optimales (par exemple, concentration en kinésine ou en moteurs), mais aussi à explorer l'action de paramètres inaccessibles dans la pratique (vitesse de déplacement des moteurs par exemple). Bien que la simulation prenne en compte des concentrations en microtubules et en moteurs inférieures à celles des expériences, les résultats obtenus sont identiques : les microtubules s'allongent ; des asters, puis des vortex apparaissent.

Les expériences de F. Nédélec sont des versions simplifiées de ce que l'on trouve dans une cellule vivante : la majorité des protéines du squelette des cellules y sont absentes. Cependant, les résultats ont, d'une part, prouvé que des complexes de moteurs qui existent dans toutes les cellules suffisent à expliquer l'apparition d'asters et, d'autre part, explicité comment ces structures se forment. Les complexes de moteurs existent dans toutes les cellules ; ils expliquent à eux seuls la formation de asters, et dans les cellules animales, complètent l'action des centrosomes dans le bon déroulement d'une division cellulaire.

## Drôles de mouvements

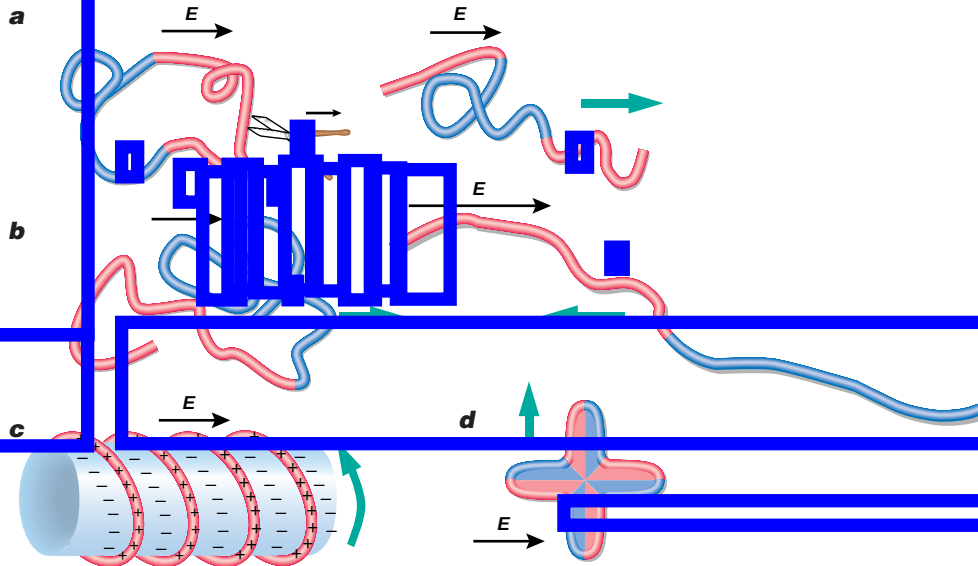
**En électrophorèse, la force électrique ne domine pas toujours.**

**E**n biologie, l'électrophorèse est une méthode de séparation des protéines, des molécules d'ADN ou des cellules. Elle consiste à mettre en mouvement ces objets électriquement chargés en appliquant un champ électrique.

On admettait que le champ électrique engendrait sur l'objet une force à laquelle s'oppose une force de friction visqueuse, proportionnelle à sa vitesse. L'objet acquiert ainsi une vitesse qui dépend du champ électrique appliqué. Le coefficient de friction varie avec la taille de la particule, de sorte qu'après un temps donné, les molécules (pour une charge identique) ont été séparées selon leur taille : les plus petites, pour lesquelles les forces de frottement sont les plus faibles, migrent le plus loin.

Nous montrons que cette description classique n'explique pas toujours l'électrophorèse. Pour rendre compte du mouvement des particules, on doit prendre

en compte des effets plus fins, tels la répartition géométrique des charges électriques. En particulier l'absence de déplacement d'une particule ne signifie pas que celle-ci est neutre.



**Des polymères chargés sont plongés dans une solution saline. Les parties rouges sont chargées positivement en surface, les parties bleues, négativement. Soumis à un champ électrique, ces brins de polymères ont un déplacement (flèches vertes) qui dépend de la répartition des charges électriques, car les polymères positivement chargés sont entourés par un excès d'ions négatifs présents dans la solution.**

Le phénomène résulte de l'écrantage électrostatique : une surface chargée plongée dans une solution saline provoque l'apparition dans la solution, au voisinage de la surface, d'un excès

d'ions de charge opposée à celle de la surface. Une particule positivement chargée plongée dans une telle solution est entourée d'une zone chargée négativement, mais «vu de loin», l'ensemble apparaît neutre. Ainsi, en raison de l'écrantage, la force électrique totale qui s'exerce sur ces objets est nulle : le mouvement résulte des mouvements relatifs du fluide et de la particule, car le champ électrique tire le fluide dans un sens opposé à celui de la particule.

Si cette double action du champ électrique est facilement analysable pour des objets chargés uniformément en surface, elle conduit à un mouvement d'ensemble surprenant pour des objets hétérogènes. Dans le cas de la migration des particules de polymère (molécules linéaires), nous avons analysé quelques situations extrêmes, où la vision classique ne s'applique plus.

Imaginons d'abord un polymère refermé sur lui-même, dont les deux moi-

tiés ont des charges identiques, mais de signe opposé (voir la figure a). Pour des raisons de symétrie, placé dans un champ électrique, le polymère globalement neutre ne bouge pas. Lorsque l'on coupe le polymère au centre de sa partie chargée positivement, il dérive comme un objet chargé positivement. Pourquoi? Parce que les parties chargées positivement sont moins enfouies que les parties chargées négativement. Ces parties positivement chargées sont donc en meilleur contact hydrodynamique avec le fluide environnant et prédominent pour la détermination du sens du mouvement. Cet exemple illustre de manière frappante que le mouvement ne dépend pas de la charge totale du polymère, mais bien de la répartition des charges le long de la chaîne.

Au second exemple, un polymère formé d'un bloc positif attaché à un bloc négatif (b) peut dériver dans le sens du champ appliqué pour de faibles intensités de ce champ, et dans le sens opposé pour des

intensités plus grandes : lorsque l'intensité du champ augmente, la déformation du polymère modifie la répartition géométrique des charges.

Fin le vent, un objet ne dérive pas nécessairement dans le sens du champ ou dans le sens opposé : nous avons imaginé un objet qui tourne sur lui-même sans dériver (c) et un objet qui dérive perpendiculairement au champ appliqué, quelle que soit la direction de ce dernier (d).

Pour l'électrophorèse sur gel, la structure réticulée du gel gomme la plupart des effets hydrodynamiques et ces exemples

ne s'appliquent pas. En revanche, en électrophorèse sur capillaires, les effets hydrodynamiques peuvent être importants. En outre, l'analyse de ces effets constitue un

premier pas vers la conception de petites pompes, analogues artificielles d'entités biologiques, telles certaines pompes cellulaires ou certains nanorotors.

Dan LÖNGBERG et Armand AJDARI, Physico-chimie théorique, ESPCI, Paris.

## Le réveil des dunes

**On déboise aujourd'hui les dunes fixées au siècle dernier par des forêts.**

Les dunes mobiles ont longtemps été synonymes de menace, de désertification et de misère pour les populations du littoral. Tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle, les géodanaises du littoral européen les ont plantées d'arbres afin de les fixer. Aujourd'hui, au contraire, on protège les dunes encore non boisées et, dans certaines régions, on les déboise.

Le déplacement des dunes menace d'ensablement les maisons, les routes et les champs cultivés près des littoraux. Ainsi, sur la côte d'Aquitaine, pendant

des siècles, les dunes se déplaçaient sous l'action du vent et ensevelissaient les bâtiments.

Grâce à son *Mémoire sur les dunes*, paru en 1797, Nicolas Brémontier, ingénieur des Ponts et Chaussées à Bordeaux, obtint en 1801 la publication d'un décret prescrivant de «prendre des mesures pour continuer de fixer et de planter en bois les dunes des côtes de Gascogne». À la fin du Second Empire, une forêt homogène de pins maritimes s'étend sur 60 000 hectares. Elle stabilise la topographie et, par ses ressources en bois et en résine, contribue au développement socio-économique d'une région jusque là pauvre et attardée.

Cet exemple fait école. Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, les espaces dunaires de nombreuses côtes d'Europe atlantique sont boisés de la même façon.

Changement de tendance : en cette fin du XX<sup>e</sup> siècle, la vacuité et la valeur paysagère des espaces dunaires naturels sont appréciées. Ceux qui ont échappé au boisement sont désormais l'objet de mesures de conservation. Ainsi, les grands champs de dunes sables du Coto de Doñana, en Espagne, et de Leba, en Pologne, sont aujourd'hui inclus dans des parcs nationaux. Au Danemark, près de Skagen, des terres agricoles ont été achetées par l'État pour permettre aux dunes mobiles de Råbjerg Mølle de les envahir librement.

En outre, au Danemark et en Angleterre, des boisements artificiels sont éliminés des dunes où ils avaient été implantés. Le but est de redonner vie aux dunes, en s'assurant évidemment que leur mouvement ne présentera pas un risque pour des établissements humains, et de permettre ainsi à la végétation native spécifique du sable de s'y réimplanter spontanément.

Cette évolution de l'aménagement du territoire où des environnements autrefois sans attrait sont aujourd'hui appréciés pour leur valeur écologique et esthétique, dépasse le cadre des espaces dunaires. La conquête de nouvelles terres agricoles aux dépens des marais maritimes est arrêtée et, en Allemagne et aux Pays-Bas, des polders sont remis en eau. Les riverains, dont la mémoire collective reste marquée par des siècles de lutte contre les sables ou contre la mer, accepteront-ils ce retour à une nature romantique et sauvage?

Roland PASKOFF, Université Lumière, Lyon



La forêt de pins noirs plantée au début de ce siècle dans la réserve naturelle des dunes d'Ainsdale, près de Southport, en Angleterre, sur la côte de la mer d'Irlande, a été abattue sur une quinzaine d'hectares pour redonner de la mobilité aux dunes.



# Qu'est-ce que l'intelligence?

JEAN-PAUL TASSIN

*L'intelligence, modelée par le patrimoine génétique et par l'environnement culturel et affectif, dépendrait d'un équilibre subtil entre un mode de traitement rapide des informations et un mode lent d'analyse de ces données.*

**F**aculté de connaître, de comprendre et de s'adapter, faculté d'abstraction et d'anticipation ou encore intuition, l'intelligence séduit : avec le langage, elle différencie l'homme de l'animal. Pourtant, selon les études de psychologie animale, l'animal sait réaliser des tâches qui nécessitent des facultés quasi identiques à celles qui définissent l'intelligence humaine.

Apprendre à retrouver dans un labyrinthe le chemin qui mène à une récompense ou utiliser un instrument pour attendre un appât sont des capacités qui ne sont pas propres à l'homme. Il ne s'agit pas de nier les différences entre les performances de l'homme et celles de l'animal, mais elles ne correspondent pas à une discontinuité biologique : l'homme ne diffère du chimpanzé que par une infime partie de son génome (moins de deux pour cent). Toutefois, de l'accumulation des conséquences d'une faible différence résulte une apparente discontinuité.

Peut-on tenter de distinguer l'intelligence humaine et l'intelligence animale? Une des composantes de cette différence semble être le mode de traitement et de mémorisation des informations. Pour connaître, pour comprendre et pour s'adapter, en un mot pour faire preuve d'intelligence, il faut que les perceptions et les sensations que reçoit le système nerveux central aient un sens, c'est-à-dire que les différents stimulus sensoriels soient associés, classés par les structures cérébrales nécessaires au traitement de l'information et mémorisés. Les étapes de ce traitement, par exemple la rapidité de perception d'un stimulus, son stockage, son évaluation par rapport aux informations déjà enregistrées, son ana-

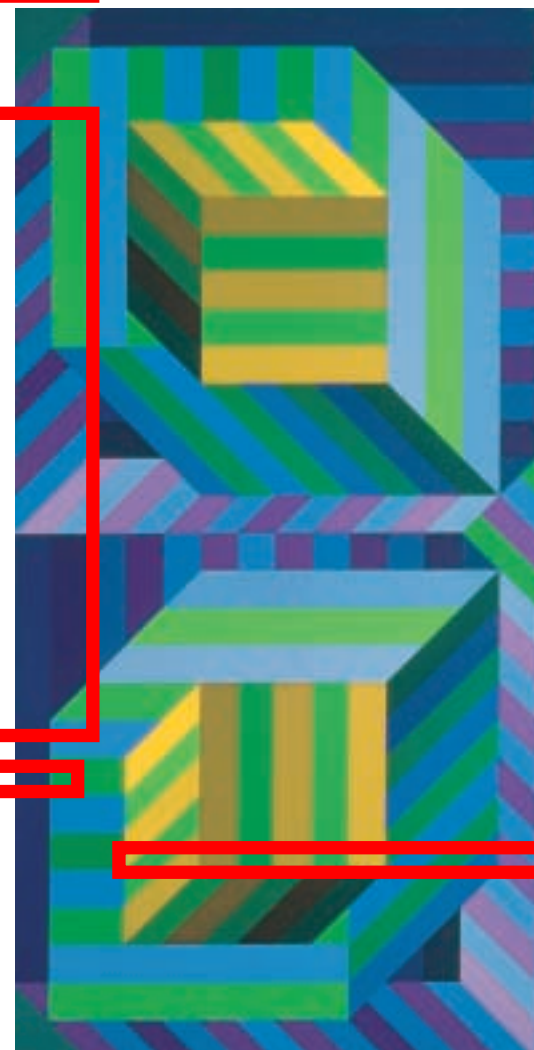
lyse et la réaction qu'il déclenche, sont des facteurs de l'intelligence.

Les anatomistes et les neurophysiologistes ont montré que le traitement de l'information réalisé par un cerveau animal ne diffère pas du traitement effectué par le cerveau d'un très jeune enfant : tant que l'information n'a pas un caractère de nouveauté, le traitement des messages est relativement peu élaboré. Le traitement est rapide, quasi « automatique » : il s'écoule en un temps court – inférieur ou égal à 100 millisecondes – entre la perception d'un stimulus et la réaction qu'il déclenche. Lors de ces traitements rapides, le système nerveux central fonctionne selon un mode analogique qui fait appel aux réseaux de neurones constitués au cours du développement.

## Le traitement analogique rapide

Dans le cerveau, il existerait deux modes de stockage des informations : un mode rapide, nommé analogique, où l'information est traitée et enregistrée sans que l'on en ait conscience, et un mode lent, dit cognitif, où l'information est analysée consciemment avant d'être stockée. Au cours du développement, quand plusieurs neurones sont activés par un même stimulus, des connexions s'établissent et se renforcent à mesure que l'expérience se reproduit identique à elle-même ; au contraire, quand l'expérience diffère, les connexions sont modifiées. Ce système de mémorisation analogique permet de reconnaître instantanément un stimulus visuel ou auditif, sans qu'il soit nécessaire de l'analyser (on distingue immédiatement le miaulement d'un chat et le grincement d'une porte).

Ce modèle de traitement analogique du cerveau a été élaboré par le mathématicien John Hopfield, qui a eu l'idée d'appliquer les connaissances d'une discipline de la physique des particules, la mécanique statistique, aux réseaux neuronaux. Il a montré que des neurones réunis en réseaux se comportent comme des systèmes de molécules qui interagissent en



1. PEINTURE DE VASARELY évoquant la complexité du traitement cérébral des informations.

modifiant leurs comportements respectifs. Dans ce modèle, les neurones tendent à s'organiser selon un modèle analogue aux structures cristallines.

Les souvenirs sont stockés selon la «règle de Hebb» : quand deux neurones sont activés simultanément lors de l'entrée d'une information, la force de leur liaison, encore nommée «poids synaptique», augmente. Inversement, quand l'activité d'un des deux neurones augmente alors que celle de l'autre diminue, le poids synaptique qui les relie diminue.

C'est l'entrée répétée de la même information qui donne naissance à une mémoire, la quantité d'informations n'étant limitée que par le nombre de neurones du système. Une fois le souvenir enregistré, une partie quelconque du souvenir suffit à faire converger le système vers un état stable : la mémoire est restituée dans sa totalité. Selon J. Hopfield, chaque mémoire corres-

pond à un état d'énergie minimal, état qualifié de bassin attracteur. Ce bassin attire vers une mémoire commune des informations qui ont été acquises en même temps (certaines composantes d'un visage ou des événements simultanés). Ainsi, en me promenant sur l'Acropole, à Athènes, alors qu'il venait de pleuvoir et qu'il y avait un arc-en-ciel, j'ai vu un colley. Dans le même bassin attracteur sont stockés le chien, l'arc-en-ciel et l'Acropole. N'importe lequel de ces éléments activera les autres : la vue d'un arc-en-ciel évoquera l'Acropole et le chien.

Ce modèle a l'intérêt de concilier deux caractéristiques essentielles du système nerveux central : il traite plusieurs informations en parallèle et il sait reconstituer une information complète à partir d'éléments épars. Par exemple, la reconnaissance d'un visage est trop rapide pour résulter d'une recherche séquentielle parmi tous les visages connus, ou d'une analyse exhaustive de tous les composants du visage.

Ces bassins attracteurs ne contiennent pas que des informations objectives comme peuvent l'être une forme, une couleur ou une texture. Ils contiennent aussi des «affects» : en revoyant une personne que nous n'avons pas rencontrée depuis plusieurs années, nous ne savons plus qui elle est, ni à quelle occasion nous l'avons connue, mais nous nous souvenons qu'elle nous est sympathique ou antipathique.

Dès la naissance, et même avant en ce qui concerne l'audition, des mémoires se constituent selon ce principe d'analogie. Toutefois, si le système de traitement analogique est rapide, il n'est pas totalement fiable : quand deux événements différents ont quelques éléments communs, ils peuvent activer le même bassin attracteur, et l'on croit percevoir une porte qui grince au lieu d'un chat qui miaule.

Les perceptions, les sensations, puis, plus tard, les actes moteurs sont associés et classés en catégories qui ne sont pas nécessairement «logiques». Ainsi, il faut du temps à un enfant qui commence à parler pour comprendre que le chat avec lequel il joue ne peut pas dialoguer avec lui. Avant 20 mois environ, les éléments considérés comme caractéristiques du chat sont suffisamment analogues à ceux d'un autre enfant du même âge pour que les deux ensembles convergent vers une même

mémoire. Il faut un autre traitement, plus lent et mettant en jeu plusieurs structures cérébrales, dont le cortex préfrontal, pour que l'enfant sépare en deux catégories le chat-qui-ne-parle-pas et l'enfant-qui-parle-et-comprend.

Cet autre traitement – le traitement cognitif – permet la formation de deux nouveaux bassins attracteurs. L'un qui représente le chat et l'autre le camarade de jeu. Ces deux ensembles participent, par la suite, au traitement analogique rapide. C'est à ce stade du traitement de l'information qu'apparaissent des différences quantifiables entre le cerveau animal et le cerveau humain.

## Le traitement cognitif

L'intervention du cortex préfrontal, une aile cérébrale particulièrement développée chez l'homme, modifie notablement le traitement de l'information. Selon Joaquín Fuster, cette structure intervient dans l'«organisation temporelle du comportement». Le cortex préfrontal est un élément essentiel de la mémoire dite à court terme, le rassemblement des éléments nécessaires à la réalisation d'une tâche et à l'élimination des interférences, internes et externes, susceptibles de rompre les enchaînements comportementaux. En d'autres termes, le cortex préfrontal a la propriété fondamentale (et peut-être unique dans le système nerveux central) de maintenir une information active jusqu'à l'obtention d'une solution considérée comme satisfaisante.

Cette période de persistance de l'information diffère selon les espèces : elle n'excède pas trois secondes chez le rat, mais atteint 20 secondes chez le singe. Elle est supérieure chez l'homme adulte, mais sans doute inexistante chez le nouveau-né ; ainsi, elle apparaît progressivement au cours de la maturation du cortex.

Cette étape essentielle autorise le maintien de l'information, son analyse, d'éventuelles modifications et son classement. Elle facilite des retours vers un stock d'informations déjà mémorisées, permet des comparaisons et des simplifications (seuls les éléments essentiels sont conservés) ; on peut imaginer et prévoir diverses situations. Cette étape est indispensable à la conceptualisation, notamment à l'abstraction, à la symbolisation et à l'anticipation.



AKG Paris

Reprenons l'exemple du bassin attracteur mentionné précédemment : la vue d'un colley réactive le bassin attracteur colley-Acropole-arc-en-ciel. Si, parce qu'il fait presque nuit ou que l'animal est passé très vite, on croit voir, à la place du colley, un chat qui aurait les mêmes couleurs, un autre bassin attracteur s'active : il est, par exemple, constitué par le souvenir d'un ami qui aime le ski de fond et a un petit garçon et un chat. Ce souvenir ne semblant pas correspondre avec la réalité, la vue de l'animal est maintenue dans le cortex pendant plusieurs secondes. L'information est analysée et un élément décisif, par exemple la taille de l'animal, permet de traiter l'information de façon cognitive et de réaliser l'erreur faite au cours du traitement analogique. Le bassin attracteur correspondant au

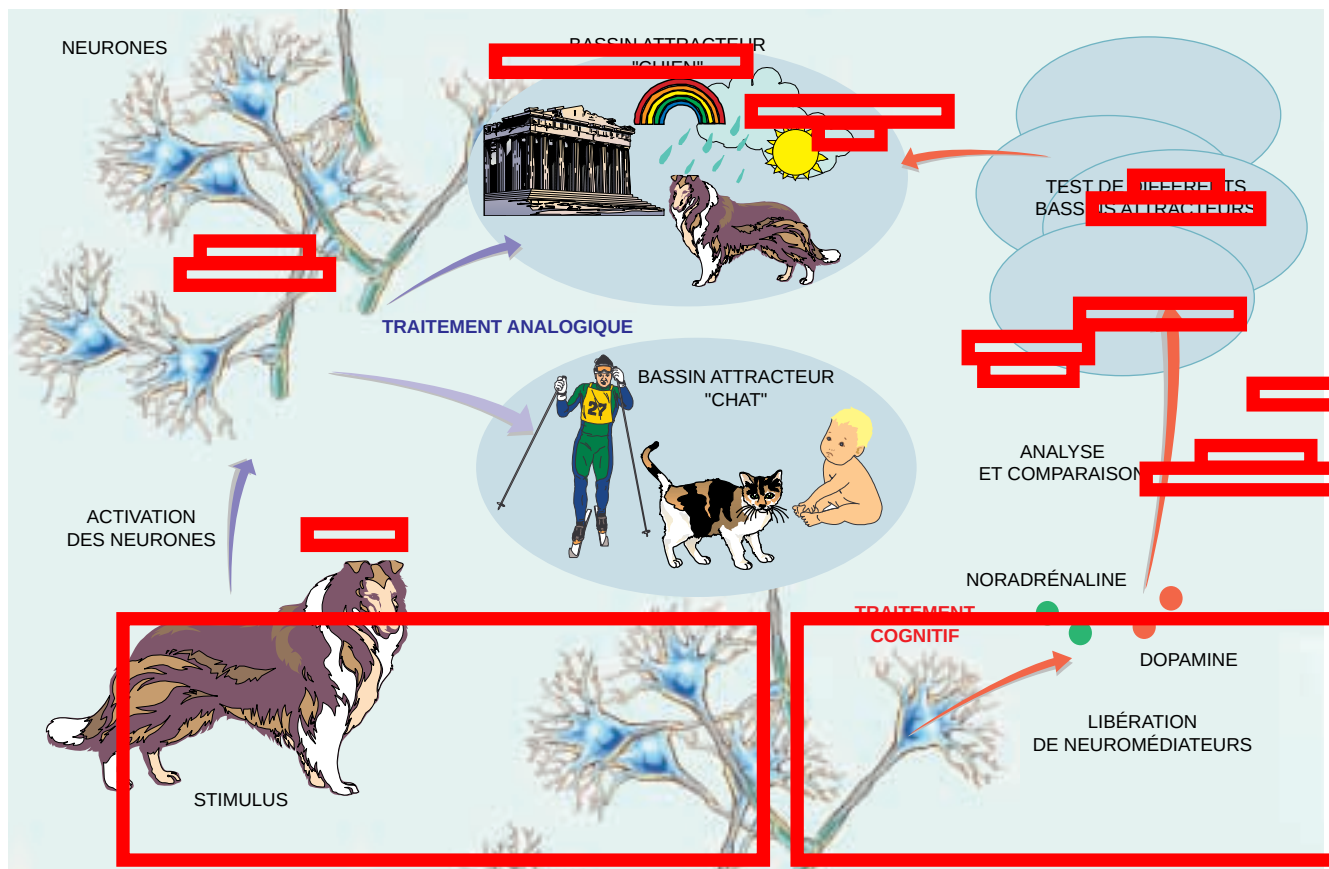
colley est réactivé. Il peut être complété avec des informations liées à la nouvelle réactivation de ce bassin, par exemple le crépuscule. Sinon, un nouveau bassin peut être créé. L'information reste active dans le cortex préfrontal tant qu'une solution jugée satisfaisante n'est pas trouvée.

### Bassin attracteur erroné

Toutefois, même si le traitement cognitif enrichit le traitement de l'information, notamment en tenant compte du contexte, le résultat obtenu est mémorisé en mode analogique et perd ainsi une partie de sa précision. Ainsi, on décrit aisément les détails de la pièce où l'on se trouve (sur le mode cognitif), mais la description de cette même pièce, lorsqu'on l'a quittée, ne peut être qu'une reconstruction en mode cognitif de ce

qui a été stocké sous forme analogique. En résumé, le traitement des informations dans le système nerveux central se fait selon deux modes qui se différencient, notamment, par leur vitesse : un traitement rapide, analogique, auquel nous n'avons pas accès, et un traitement plus lent, cognitif, qui, parce que nous avons conscience des informations qu'il traite, semble être caractéristique du fonctionnement du cerveau humain.

Chez l'adulte, au cours de la veille, les deux modes, analogique et cognitif, sont en oscillation permanente. C'est par ces deux modes que le système nerveux central perçoit les informations, leur donne un sens et les mémorise. Selon cette hypothèse, l'intelligence serait l'aptitude d'un animal ou d'une personne à utiliser les capacités de ces deux modes de traitement. Elle dépendrait de trois



**2. LORS DE LA RÉCEPTION D'UN STIMULUS**, ici la vue d'un chien, un groupe de neurones est activé. L'information est traitée sur un mode analogique rapide (flèche violette, en haut) : le bassin attracteur qui regroupe des informations enregistrées simultanément (sur l'Acropole, après une averse, alors qu'il y avait un arc-en-ciel, j'ai vu un colley) est activé. Ainsi la vue d'un colley évoque l'Acropole ou un arc-en-ciel. Ce traitement requiert, au maximum, 300 millisecondes. Le stimulus active parfois un bassin attracteur erroné (flèche mauve) : par exemple, un ami qui aime le ski de fond a un enfant et un chat. Ce bassin peut être activé par erreur, parce

qu'il fait sombre et que le colley est confondu avec un chat. Parce qu'il y a un conflit entre le stimulus perçu et le bassin attracteur actif, le traitement de l'information est plus long : le traitement cognitif intervient (flèches rouges). Les neurones libèrent des neuromodulateurs (noradrénaline et dopamine). La dopamine maintient le stimulus actif dans le cortex préfrontal : différents bassins attracteurs sont testés jusqu'à ce que le stimulus soit classé dans celui qui semble le plus cohérent, ici le bassin colley-Acropole-arc-en-ciel, ou qu'un nouveau bassin attracteur soit créé, par exemple colley-crêpuscule-vitesse.

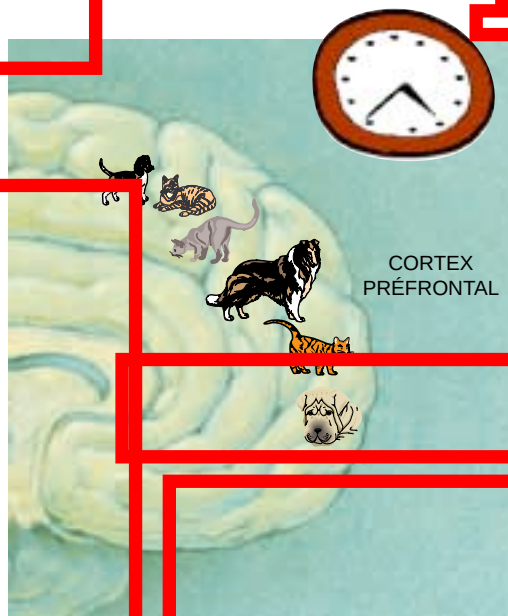
critères : la vitesse et la quantité d'informations qui peuvent être traitées en mode analogique, le temps pendant lequel le mode cognitif peut se maintenir, et les conditions qui contrôlent les oscillations entre le mode analogique et le mode cognitif. Parmi les trois critères, les deux premiers sont, selon toute vraisemblance, déterminés génétiquement.

## Deux critères d'intelligence ?

Même si cette notion peut heurter, l'intelligence a un caractère génétique. Ne pas le reconnaître reviendrait à admettre que les différences entre les attitudes du singe et celles de l'homme sont d'origine culturelle. Si des différences génétiques existent entre espèces, elles se manifestent aussi au sein d'une même espèce : on sait que certains enfants ont des performances intellectuelles nettement supérieures à la moyenne des enfants du même âge. Le rôle de la génétique dans l'expression de ces performances semble si bien établi qu'une association spécialisée dans la détection de ces « surdoués » assure que la présence d'un de ces enfants dans une famille indique qu'un ou plusieurs des ascendants ont aussi cette caractéristique. Où se situent les différences génétiques de ces enfants surdoués ?

Bien que la quantité d'informations que peut stocker le mode analogique dépende du nombre de neurones, il est peu probable que cela suffise à expliquer la différence des performances. D'ailleurs, le cerveau d'Einstein ne contenait pas plus de neurones que la moyenne. Le nombre de connexions, qui est évidemment en relation directe avec le nombre de neurones, ne semble pas être non plus une piste intéressante.

En revanche, le temps durant lequel une information reste active (et qu'elle est donc traitée en mode cognitif) et la quantité d'informations que peut traiter le système en mode analogique pendant ce temps semblent déterminants. Ces variables dépendraient notamment des caractéristiques électriques des neurones, c'est-à-dire des propriétés de leurs canaux ioniques, des structures qui commandent le passage des ions d'un côté de la membrane neuronale à l'autre. Les durées d'ou-



**3. LA QUANTITÉ D'INFORMATIONS qui peuvent être simultanément activées dans le cortex préfrontal et le temps qui peut durer cette activation seraient deux «facteurs d'intelligence».**

verture de ces canaux, qui se mesurent en fractions de milliseconde, déterminent la fonctionnalité de l'ensemble. La structure des protéines qui constituent ces canaux ou la membrane qui les entoure déterminerait la quantité de leur traitement. Or, la constitution de ces protéines peut varier légèrement d'une personne à l'autre : les protéines ne perdent pas leur fonction, mais d'infimes différences dans leur structure tridimensionnelle peuvent avoir des conséquences quantifiables sur le fonctionnement de ces canaux ioniques.

Selon cette hypothèse, le troisième «facteur d'intelligence» repose sur le rythme des oscillations entre le mode analogique et le mode cognitif. Soit un groupe de neurones associé à un bassin attracteur ; quand un stimulus active cet «essaim» de neurones, il déclenche un traitement analogique (rapide). Les neurones qui interviennent sont ceux qui libèrent des neuromédiateurs, notamment le GABA ou le glutamate, lesquels assurent la transformation d'un signal chimique en un signal électrique.

Au contraire, quand le groupe de neurones n'est pas associé à un bassin attracteur ou qu'il active un bassin erroné, un traitement cognitif de l'information se déclenche dans le cortex préfrontal ; les neurones qui réagissent aux stimuli (et à leur contenu affectif) y libèrent des neuromodulateurs. Contrairement aux neuromé-

diateurs, les neuromodulateurs, telles que la noradrénaline et la dopamine, «modulent» les signaux électriques. La dopamine assure le maintien du stimulus actif dans le cortex préfrontal, le temps que l'information soit traitée et qu'un bassin attracteur cohérent avec les diverses informations reçues ou déjà mémorisées soit trouvé ou créé : la noradrénaline fait cesser ce traitement. Quand le maintien de l'information dans le cortex préfrontal a été suffisamment long pour qu'un bassin ait été créé, le stimulus déclenchant est traité sur le mode analogique. Le traitement cognitif a donné lieu à une modification du stock analogique.

Le cortex préfrontal fonctionne «normalement» pour des quantités bien définies de neuromodulateurs ; quand ces quantités sont modifiées, en particulier par l'émotion, le fonctionnement est perturbé. C'est sans doute pour cette raison qu'un peu d'anxiété augmente parfois les facultés cognitives, mais qu'un stress trop fort interdit toute possibilité de concentration.

Si la nature des informations stockées dépend de l'environnement culturel, le traitement cognitif – et, par conséquent, les modifications du stock analogique – dépend beaucoup des conditions affectives et des motivations. Selon ce modèle, on comprend pourquoi des enfants objectivement surdoués sont parfois écartés d'un enseignement inadapté, parce que trop facile, élimine toute motivation.

Entre l'inné et l'acquis, l'intelligence rassemble les extrêmes : bien qu'elle soit déterminée génétiquement, son expression dépend de l'environnement culturel et de la situation affective.

Jean-Pol TASSIN, neurobiologiste au Collège de France, est directeur de recherches à l'INSERM.

J.J. HOPFIELD, *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 79, pp. 2554-2558, 1982.

J.-P. TASSIN, *Ontogenèse du fonctionnement psychique : de l'analogique au cognitif*, in *Le bébé dans tous ses états*, sous la direction de R. Frydman et M. Szegez, Odile Jacob, 1997.



# Instinct et intelligence

ALAIN PROCHANTZ

*«Il y a des choses que l'intelligence seule est capable de chercher, mais que, par elle-même, elle ne trouvera jamais. Ces choses, l'instinct seul les trouverait ; mais il ne les cherchera jamais» écrivait Henri Bergson.*

**P**ersonne ne peut sérieusement prétendre donner de l'intelligence une définition embrassant toute la polysémie, rationnelle et irrationnelle, du terme. C'est pourquoi nous repartirons utilement du terme, plus général, de pensée pour le définir biologiquement comme le rapport adaptatif qui lie l'individu à son milieu. Nous reviendrons, au cours de cette introduction à ce numéro spécial consacré à l'intelligence, sur une définition dont on peut cependant tirer les conséquences immédiates suivantes.

La première est qu'elle borne les éventuelles prétentions hégémoniques des sciences biologiques. On a, c'est l'évidence<sup>1</sup>, pensé les catégories de la pensée avant d'avoir une idée biologique juste<sup>2</sup>, même approximativement telle, des processus biologiques impliqués dans le fait de penser, avant – par exemple – la théorie de l'évolution ou celle des localisations cérébrales. Cette définition strictement biologique n'en exclut donc pas d'autres qui pourraient être apportées par des champs de savoir différents, comme, entre autres, l'anthropologie, la philosophie, la psychanalyse... À vrai dire, la définition que nous donnons impose de faire une place aux autres disciplines, le milieu de *Homo sapiens* étant aussi et même surtout un milieu culturel, symbolique, etc.

Deuxièmement, définir la pensée comme un rapport adaptatif entre l'individu et son milieu évite, ou plutôt déplace, la question de sa localisation. Un rapport n'est pas une substance, encore moins une sécrétion<sup>3</sup>, et la pensée dans cette définition n'a donc pas de place, pas d'organe privilégié, le cœur ou le cerveau, même si la structure de ces organes et, en particulier, celle du cerveau participe de

façon importante au rapport entre l'individu et son milieu, tout du moins chez les animaux.

Une autre conséquence de la définition que je propose ici est que la pensée ne saurait être arbitrairement limitée à la seule manipulation de concepts abstraits selon les règles de la logique mathématique. Incorporant tous les aspects des interactions entre le vivant et son milieu, elle ne s'établit donc pas dans la pureté positive. À ce titre on doit dire que tout être vivant pense, je dis bien «tout être vivant», n'excluant par là ni les bactéries ni les plantes : s'il n'y a pas de pensée sans corps vivant, il n'y pas non plus de corps vivant sans pensée.

Enfin, replacer cette notion de pensée dans un contexte évolutif permet de réintroduire les notions d'instinct et d'intelligence pour y superposer les deux grands mécanismes d'adaptation biologique, ceux fondés sur des comportements dans lesquels la part génétique est dominante et ceux donnant – dans un cadre incorporant une composante génétique – une part importante aux modifications de l'individu ou, si l'on préfère, à l'individuation.

## Quelques données de génétique du développement

Dans les années 1970<sup>4</sup>, les biologistes découvrirent chez une mouche, la *Drosophile*, des gènes dont les mutations conduisent à des modifications morphologiques très importantes, en fait au remplacement de tout ou partie d'un organe par un autre organe, mais pas par n'importe quel autre. Par exemple, on observe des transformations de type antenne-patte, aile-balancier ou aile-œil, mais jamais de transformations de

type patte-aile ou antenne-œil. Ces contraintes ont fait dire que l'œil, le balancier et l'aile sont des organes homologues, comme sont homologues la patte et l'antenne. Ces mutations, et les gènes mutés, ont été dénommés homéotiques, l'organe d'un segment étant remplacé par l'organe homologue d'un autre segment. Les gènes homéotiques sont des facteurs de transcription des homéoprotéines qui, en se fixant sur des séquences promotrices, régulent l'expression d'autres gènes.

Ces observations ont conduit à rechercher la présence de séquences similaires dans d'autres embranchements et à découvrir que des gènes présentant de fortes homologies de structure avec les gènes homéotiques de la *Drosophile* étaient présents dans tous les embranchements des règnes végétal et animal. Des expériences, datant des dix dernières années, ont permis de conclure que ces gènes régulent également le développement morphologique des vertébrés. Par ailleurs, les homologies de séquence entre les gènes de vertébrés et d'invertébrés, doubles de similitudes – à travers divers embranchements – dans l'organisation chromosomique de ces

(1) Ou alors, faut-il mettre à l'opacité toutes les formes de culture qui ont précédé la connaissance positive.

(2) C'est-à-dire moderne, avec tout ce que cela suppose d'histoire de la pensée critique.

(3) Tant pour Cabanis et ses émules qui pensent que le cerveau sécrète la pensée comme le foie, la bile.

(4) Cette histoire a commencé bien avant, en particulier au début du siècle, à l'Université Columbia, dans le laboratoire de Morgan.

gènes, suggèrent fortement l'existence d'un ancêtre commun aux vertébrés et aux arthropodes, qui aurait vécu il y a environ 600 millions d'années. Ainsi se trouvent renforcées, sinon démontrées, les thèses soutenues par Étienne Geoffroy Saint-Hilaire au cours d'un débat resté fameux où il avait défendu,

contre Cuvier, l'existence d'une origine commune aux vertébrés et aux arthropodes, voyant dans les segments de ces derniers les analogues morphologiques des vertèbres.

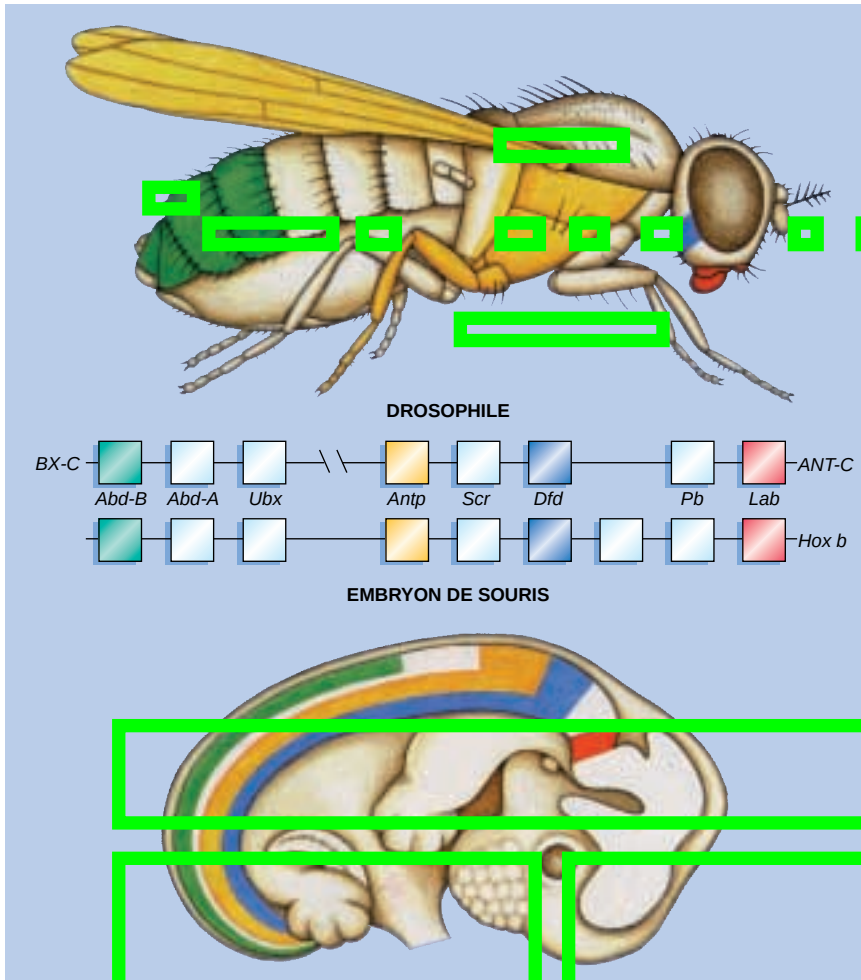
Les gènes homéotiques dont il vient d'être question ne sont exprimés, pour ce qui est du système nerveux, que dans

la moelle épinière, depuis sa partie la plus caudale jusqu'à un niveau antérieur correspondant à la frontière rhombencéphale-métencéphale, c'est-à-dire qu'ils sont exclus de ce que nous appelons communément cerveau. D'autres gènes, de la même famille, sont cependant présents à la fois dans les gan-



1. LUIGI GALVANI étudia, vers 1860, le comportement électrique des tissus animaux. Il proposa que le cerveau soit un générateur d'électricité animale. On se rapprochait ainsi d'une idée mécaniste

et simplificatrice de l'intelligence. Sur ce tableau d'Antonio Muzzi (1862), Galvani se livre à des expériences avec la machine de Ramsden en compagnie de familiers.



**2. DES GÈNES HOMÉOTIQUES** guident le développement embryonnaire des mouches (sur cette figure, les gènes sont de la même couleur que les zones dont ils guident le développement). Des gènes apparentés sont également responsables du développement des autres animaux et des êtres humains.

glions céphaliques de la Drosophile et dans le cerveau des vertébrés. Cette découverte et les expériences qui ont suivi, et qui démontrent que certains de ces gènes une fois délétés chez la Drosophile, peuvent être remplacés par les gènes orthologues (homologues à travers l'évolution) de vertébrés, d'une part confirment le lien de parenté entre vertébrés et invertébrés, et de l'autre suggèrent que les protéines à homeo-domaine, comme d'autres facteurs de transcription, produits d'autres familles de gènes de développement, jouent un rôle morphogénétique fondamental dans la construction du cerveau.

## Instinct et intelligence

Pour autant, tout en traçant ce lien de parenté avec les arthropodes, y compris pour ce qui est de l'organisation génétique des régions les plus anté-

rieures de notre système nerveux, ces découvertes illustrent aussi à quel point nous sommes différents de nos lointains cousins, dont nous avons commencé de nous séparer il y a donc 600 millions d'années. Cette séparation pourrait, en effet, être interprétée comme le développement d'un cerveau, celui des chordés, puis des vertébrés, dont la logique évolutive serait ce donner une part de plus en plus importante aux modifications individuelles dans le processus adaptatif. Entendons-nous bien, même si – comme nous le verrons –, poussée au plus haut point, cette logique est une logique d'échappement à un pur déterminisme génétique, le développement de cette logique est lui-même le résultat de la sélection naturelle, donc celui de la sélection d'ensembles de gènes qui définissent des stratégies de développement. Nous n'entrerons pas ici

dans les détails, mais la découverte des gènes de développement a permis de confirmer le lien entre développement et évolution et, en particulier, de proposer que ce sont des modifications du nombre et de la structure de ces gènes, et non pas que du lieu, du niveau et de la durée de leur expression, qui sont à l'origine des changements morphologiques marquant les grands moments de l'évolution des espèces.

On voit donc apparaître ici deux stratégies d'adaptation totalement différentes. D'un côté, la forme adulte de l'organisme vivant et ses comportements sont, pour ainsi dire, presque<sup>5</sup> présents dans sa structure génétique, le développement n'ayant pour fonction que d'exécuter les informations contenues dans cette structure. Très peu de place est ainsi laissée aux improvisations, et les modifications résultent, pour l'essentiel, de mutations du génome et de la sélection de clones mieux adaptés à leur milieu et à ses variations. La pensée est, alors, nous dirions, toute instinctive, c'est celle du calamar jetant son encre sur un prédateur, celle d'une abeille construisant les rayons de la ruche ou, encore, celle du tournesol suivant les rayons du soleil. Rappelons ici que Bergson, dans *L'évolution créatrice*, propose de considérer la chlorophylle comme le système nerveux des plantes.

De l'autre côté, le nôtre, les stratégies de développement, tout en définissant un plan contraignant (une sorte de cahier des charges), laissent une grande liberté aux détails de la construction, et, en particulier au niveau du cerveau dont les aspects importants de la structure fine se modifient tout au long de l'existence. De ce fait, c'est l'histoire même des individus qui s'inscrit dans leur structure physique, celle-ci évoluant avec celle-là<sup>6</sup> dans un

(5) Le message est important car il n'existe pas d'organisme qui soit totalement codé, qui soit donc une machine : dans tout être vivant, une place, même petite, est toujours réservée à l'imprévisible.

(6) Une personne ramenée 20 ans en arrière serait 20 ans plus tard différente de celle que nous connaissons, car elle aurait vécu une histoire différente. De même, si nous revenions 600 millions d'années en arrière, 600 millions d'années plus tard la flore et la faune seraient autres que celles que nous connaissons aujourd'hui. L'histoire ne se clone pas.

processus ininterrompu d'individuation. Il en est donc de l'histoire des individus comme de celle des espèces : si le passé pèse de tout son poids sur le futur, celui-ci est riche d'un nombre infini de possibilités et reste, pour l'essentiel, imprévisible. Cette adaptation par individuation, nous l'appellerons intelligence par opposition à l'instinct.

## Le cerveau néoténique comme organe de l'individuation

Restons un moment avec les vertébrés, pour nous interroger sur l'importance de la contrainte génétique, celle liée à l'existence du patron génétique dans la formation du cerveau<sup>7</sup>, avec ses multiples régions et ses très nombreuses connexions. Il faut ici considérer deux périodes dans le développement. La première correspond à la mise en place de la structure cérébrale, alors que se décident forme et fonction des ensemble neuronaux, par exemple ici le cortex visuel et là le cortex moteur. Différentes expériences suggèrent que ces ensembles sont génétiquement déterminés, même si certains avancent que, pendant une courte période, cette détermination peut être modifiée. On acceptera donc l'idée que les gènes de développement, dont, mais pas seulement, les homéogènes, définissent la morphologie cérébrale générale, celle qui – par exemple – définit le cerveau d'un singe en tant qu'il diffère de celui d'un homme ou de celui d'un lapin.

Considérons maintenant la période du développement qui débute après la mise en place des grandes structures et des voies principales reliant ces structures. Il est erroné de penser que tout est joué à ce stade. Chez le jeune et chez l'adulte, en effet, le réseau des connexions se modifie dans sa forme. Ces modifications sont possibles parce que, par bien des aspects, le système nerveux reste embryonnaire chez l'adulte, ce qui le définit comme un organe néoténique (un trait néoténique est défini ici comme un trait embryonnaire maintenu dans un organisme adulte). Dans au moins deux régions du cerveau, des cellules souches existent qui continuent de produire de nouveaux neurones<sup>8</sup>. Les connexions se font et se défont, les prolongements neuronaux se modifient dans la longueur et la forme de leurs ramifications qui

constituent la base matérielle de ces fameux réseaux de neurones. Pas plus qu'elle n'est une sécrétion ou une substance, la pensée des vertébrés n'est déposée dans l'encéphale sous la forme de circuits rigides ou génétiquement déterminés<sup>9</sup>. Être matérialiste, c'est admettre que la construction cérébrale est capable d'enregistrer l'histoire individuelle. Cet apprentissage épigénétique est fondé pour une part sur des modifications de l'efficacité synaptique – c'est en tout cas une idée assez communément acceptée –, mais pour une autre part sur des modifications morphologiques et l'expression continue de gènes de développement.

## L'universel et le singulier

Pour revenir sur la distinction faite entre instinct et intelligence, nous entrevoyons bien que ces deux formes de pensée correspondent à deux stratégies adaptatives qui coexistent au sein d'une même espèce, mais qui n'ont pas toujours la même importance, le concept d'individu différant selon les espèces. Pour en venir à la nôtre, l'invention du langage, l'augmentation sans précédent de la surface corticale dévolue aux fonctions associatives ou cognitives, le ralentissement du vieillissement cérébral ou, plutôt, le maintien jusqu'à la mort de régions entières dans un état de plasticité morphologique, tout concourt à faire d'*Homo sapiens* une espèce unique, qui, à la suite de quelques mutations aura pour ainsi dire creusé, en matière d'individuation, un écart considérable avec ses cousins les plus proches. Notre culture est là pour en témoigner.

Mais pour conclure, au moins provisoirement, cette question dite de l'intelligence, il faut bien tirer quelques enseignements de notre définition de l'individu. Car enfin, chaque individu est non seulement unique, mais à chaque instant biologiquement différent de ce qu'il fut l'instant précédent et de ce qu'il sera dans l'instant qui suit. Il s'inscrit dans la durée d'une histoire, bref, il n'est jamais parfaitement défini en tant qu'objet biologique permanent. Le sentiment de permanence, la conscience d'être qui s'associe à la possibilité de pouvoir se nommer et à celle d'être nommé ne correspond donc nullement à la seule réalité de l'objet biologique.

Une science, par définition, occupe le terrain de l'universel ; aussi la biologie travaille-t-elle sur les conditions universelles de la construction des singularités, que celles-ci soient des espèces ou des individus. Elle doit, et c'est déjà là une tâche immense, s'efforcer de décrypter les mécanismes qui rendent compte des évolutions, celle des espèces et celle des individus. C'est à ce titre que nous dirons que la conscience n'est pas un objet de la biologie. Elle ne le serait qu'à une seule condition inacceptable pour un esprit matérialiste : postuler que le mécanisme étant donné, la fin l'est aussi. C'est pourtant à généraliser et populariser cette idée d'un destin tout tracé et ancré dans la structure que pousse un génétisme absolu associant structure génétique et machine neuronale. À cette tendance, nous ne pouvons qu'opposer l'idée que l'individuation est un processus sans fin, mais aussi sans fin d'espèce. L'individuation relève de tous les champs de savoir, y compris des disciplines non scientifiques, littéraires par exemple, et demande que le soir fait appel, aussi dans les domaines scientifiques, à l'instinct à l'intelligence et à l'intuition<sup>10</sup> de l'esprit humain.

(7) Nous ne sommes pas biologistes et nous ne sommes pas biologistes ; mais il faut reconnaître que le cerveau est inconcevable comme organe isolé : Rien de plus bête qu'un cerveau sans corps.

(8) Cette présence de cellules souches, mise en évidence chez le canari mâle dont les centres du chant régénèrent chaque printemps, a depuis été confirmée chez d'autres espèces.

(9) Dans certaines espèces, le déterminisme génétique des réseaux est dominant : l'exemple des invertébrés très simples, où le développement individuel n'amène jamais à la moindre nouveauté. C'est aussi, rappelons-le, une forme d'adaptation, une forme d'adaptation à la pensée essentiellement génétique.

(10) Ce terme entre ici en fin de course et en contrebande ; le justifier serait trop long, indiquons simplement qu'il n'y a là nul hasard et qu'il n'est pas neutre de revendiquer la part de l'intuition dans la démarche scientifique.

Alain PROCHIANZ est directeur de recherche CNRS à l'École normale supérieure de Paris.

L'INTELLIGENCE



L'émergence de l'intelligence



# Débat : La conscience animale

**L**a conscience de soi, l'un des fondements de l'intelligence humaine, est-elle l'apanage de notre espèce? D'autres hominoïdes, tels les chimpanzés, les orangs-outans et, peut-être, les gorilles, se reconnaissent dans un miroir. Peut-on en déduire pour autant qu'ils ont conscience de leur propre existence? Daniel Povinelli pense que non : comme les très jeunes enfants, les singes reconnaîtraient une similitude entre leur comportement et celui de leur image dans un miroir, mais n'en déduiraient pas que l'image qu'ils voient est celle d'eux-mêmes. Gordon Gallup, lui, soutient au contraire que cette conscience de soi est le support de la compréhension et de la prise en compte des pensées, des connaissances et des intentions des autres.

## La conscience est le propre de l'homme

DANIEL POVINELLI

*Bien que les chimpanzés se reconnaissent dans un miroir, ils n'ont pas conscience des états mentaux des autres, ni peut-être des leurs.*

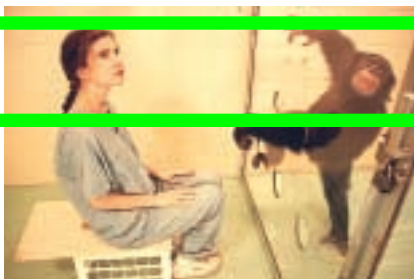
**L**es chimpanzés qui se voient dans un miroir ont des comportements qui révèlent que ces animaux ont conscience de leur propre existence. Cette capacité n'est partagée que par l'espèce humaine et par quelques espèces de grands singes. Toutefois, les chimpanzés ne sont pas nécessairement conscients de leurs propres états psychologiques, et il n'est pas établi qu'ils comprennent que d'autres individus possèdent aussi de tels états mentaux.

Considérons le simple acte de voir. Lorsque nous voyons quelqu'un regarder un objet, nous nous demandons automatiquement ce qu'il pense et nous nous représentons ce qu'il observe, ce à quoi il pense, ce qu'il sait ou ce qu'il a l'intention de faire ensuite. Nous fondons de telles déductions sur de simples mouvements des yeux ou de la tête.

Les chimpanzés ont-ils le même comportement? Il semble que oui : les chimpanzés manifestent un grand intérêt pour les yeux de leurs congé-

neres. Frans de Waal, de l'Université Emory, a montré que les chimpanzés ne se réconcilient véritablement avec leurs adversaires que s'ils les regardent droit dans les yeux. À l'Université de l'Ohio, nous avons aussi montré que les chimpanzés cherchent le regard des autres singes comme celui des êtres humains. Si vous vous placez en face d'un chimpanzé, que vous le regardez dans les yeux, puis que vous portez soudain votre regard au-dessus de son épaule, il se retourne comme pour savoir ce que vous regardez (voir la figure 1). On ne peut toutefois exclure que l'évolution a simplement produit un mécanisme automatique qui conduit les primates à regarder dans la même direction qu'un autre, sans se préoccuper de ses intentions.

Les chimpanzés ont-ils conscience que d'autres qu'eux peuvent voir? Nos chimpanzés jouaient souvent à se déplacer après s'être couvert la tête avec une couverture, un seau ou les paumes de leurs mains, jusqu'à ce qu'ils se cognent dans quelque chose



Donna Bluschke

**1. LES CHIMPANZÉS REGARDENT SOUVENT ce que leurs congénères observent. Lorsqu'une expérimentatrice regarde par-dessus l'épaule d'un chimpanzé (à gauche), ce dernier regarde dans la même direction (à droite), sans forcément pour autant prêter quelque intention que ce soit à son vis-à-vis.**

ou dans quelqu'un. Parfois, ils s'arrêtaient et découvraient leurs yeux, comme pour jeter un coup d'œil, avant de poursuivre leurs errances aveugles. Plus d'une fois, j'ai commis l'erreur d'imiter ces comportements en jouant avec eux : immédiatement ils m'attaquaient (pour jouer). Savaient-ils alors que je ne pouvais pas les voir, ou pensaient-ils que je ne pouvais pas me défendre efficacement ?

Pour le savoir, nous avons étudié l'un des gestes de communication les plus courants de nos chimpanzés : celui de quémander de la nourriture. Nous leur avons tout d'abord permis de quémander après d'un expérimentateur assis hors de leur portée : ce dernier leur donnait une pomme ou une banane. Puis nous les avons mis en présence de deux expérimentateurs familiers, dont l'un donnait de la nourriture, et l'autre un morceau de bois sans intérêt. Comme prévu, les chimpanzés n'avaient aucun mal à choisir : après avoir observé les deux expérimentateurs, ils s'adressaient directement à celui qui offrait de la nourriture.

Ces deux premiers tests préparaient les chimpanzés à un troisième, où deux

expérimentateurs pouvaient donner de la nourriture. L'un d'eux ne voyait pas les chimpanzés : soit il avait un bandeau sur les yeux (tandis que l'autre en avait un sur la bouche), soit il avait un seau sur la tête, soit il se masquait les yeux avec les mains, soit, enfin, il tournait le dos (voir la figure 2). Les chimpanzés avaient eux-mêmes expérimenté toutes ces postures au cours de leurs jeux spontanés. S'ils avaient compris ce que « voir » signifie pour un expérimentateur, alors ils auraient dû s'adresser uniquement à celui qu'ils voyait.

### Un choix à l'aveugle

Lorsqu'un expérimentateur avait un bandeau sur les yeux, un seau sur la tête ou les mains sur les yeux, les singes entraient dans le laboratoire, marquaient un temps d'arrêt, mais s'adressaient ensuite, au hasard, à n'importe quel expérimentateur. Quand ils s'adressaient à la personne qui ne les voyait pas, ils réitéraient leur demande, comme étonnés de ne pas obtenir de réponse.

En revanche, lorsque l'un des expérimentateurs tournait le dos, les chimpanzés s'adressaient systématiquement

à l'autre : ils comprenaient qu'un seul des expérimentateurs pouvait les voir. Pourquoi seulement dans ce cas ? Peut-être l'opposition entre les positions de dos et de face, plus « naturelle », indiquait-elle seulement plus clairement la différence entre « voir » et « ne pas voir ». La compréhension que les singes exprimaient là aurait été seulement masquée dans les autres cas, à cause de la difficulté à comprendre les postures et les mêmes.

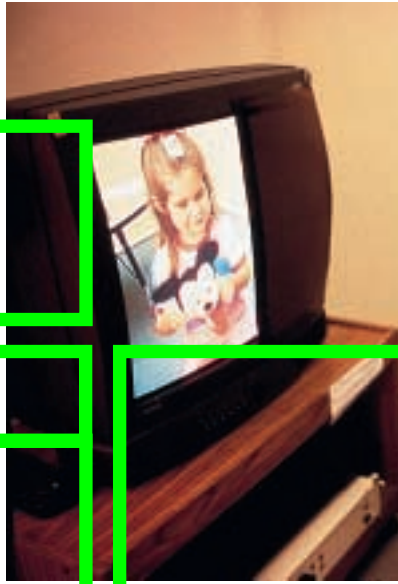
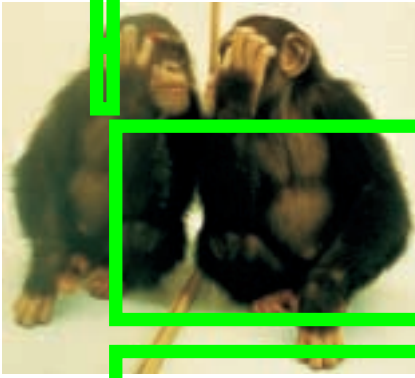
Toutefois, la compréhension apparente dans le cas des expérimentateurs de face ou de dos était-elle une véritable compréhension de la notion de voir ? Les chimpanzés ne s'adressaient-ils à l'expérimentateur qui leur faisait face que parce que c'était ce qu'ils avaient appris dans les autres expériences ou parce que c'est un comportement social des chimpanzés ?

Nous avons alors fait un nouveau test, où nous placions les deux expérimentateurs de dos ; l'un d'eux regardait par-dessus son épaule, comme le font souvent les chimpanzés. Dans cette situation, les animaux sollicitèrent indifféremment l'un ou l'autre expérimentateur, montrant ainsi qu'ils ne



**2. EN PRÉSENCE DE DEUX EXPÉRIMENTATRICES**, dont l'une les voit et l'autre pas (en haut), des chimpanzés s'adressent indifféremment à l'une ou à l'autre pour demander de la nourriture, sauf si une seule leur fait face. En revanche, ils choisissent aussi au hasard lorsque les deux expérimentatrices sont de dos et que l'une regarde par-dessus son épaule (en bas à droite). Ces expériences semblent démontrer que les chimpanzés n'ont pas conscience de ce que la vision permet à un autre qu'eux de savoir.

Photographies de Donna Berschwald



**3. LE TEST DE RECONNAISSANCE DE SOI** utilisé pour l'étude des chimpanzés (*ci-dessus*) a été adapté à l'étude des enfants à l'aide d'images vidéo (*ci-contre*). L'expérimentateur a placé à son insu un autocollant sur la tête de l'enfant. Les jeunes enfants n'enlevaient l'autocollant (*à droite*) que lorsqu'ils se voyaient sur des images en direct.

compre- nent pas la différence entre celui qui les voyait et celui qui ne les voyait pas.

Bien entendu, après quelques essais, les chimpanzés ont vite appris à s'adresser à l'expérimentateur qui les regardait par-dessus son épaule. Avaient-ils appris que le paramètre important était la faculté de l'expérimentateur de les voir, ou simplement qu'il fallait demander à la personne dont ils voyaient le visage?

Les résultats d'une autre série d'expériences soutiennent cette dernière hypothèse : après avoir appris aux chimpanzés à ne pas s'adresser à un expérimentateur dissimulant sa tête derrière un disque de carton, nous avons répété les tests (avec le seau, le bandeau ou les mains sur les yeux, et l'expérimentateur de dos regardant par-dessus son épaule) : si les singes avaient réellement compris la relation entre la perception visuelle et les connaissances, chez les autres, ils auraient dû s'adresser exclusivement à l'expérimentateur qui les voyait ; au contraire, s'ils avaient simplement appris à s'adresser à une personne dont ils voyaient le visage, ils auraient dû choisir correctement dans tous les tests, sauf dans celui du bandeau, car les visages des expérimentateurs sont aussi visible quand le bandeau est sur les yeux ou sur la bouche. C'est ce dernier résultat que nous avons obtenu.

Dans l'espèce humaine, en revanche, les individus comprennent rapidement ce que les autres savent lorsqu'ils voient : John Flavell et ses collègues de l'Uni-

versité Stanford ont montré que des enfants de deux ou trois ans seulement ont déjà cette compréhension. Nous-mêmes, en soumettant de jeunes enfants aux mêmes tests que les chimpanzés, nous avons trouvé qu'ils comprennent, dès deux ans et demi, qu'un seul des deux expérimentateurs les voit et peut répondre à leur demande.

### Le temps ne fait rien à l'affaire

Gordon Gallup prétend que nos chimpanzés étaient trop jeunes pour bien réussir les tests. Toutefois, les premiers tests ont été menés, en 1993 et en 1994, avec des singes âgés de cinq et six ans qui présentaient tous les signes classiques de la reconnaissance de soi dans un miroir, même si cette capacité était encore en cours de développement chez certains d'entre eux. Des singes plus âgés auraient-ils mieux réussi les tests?

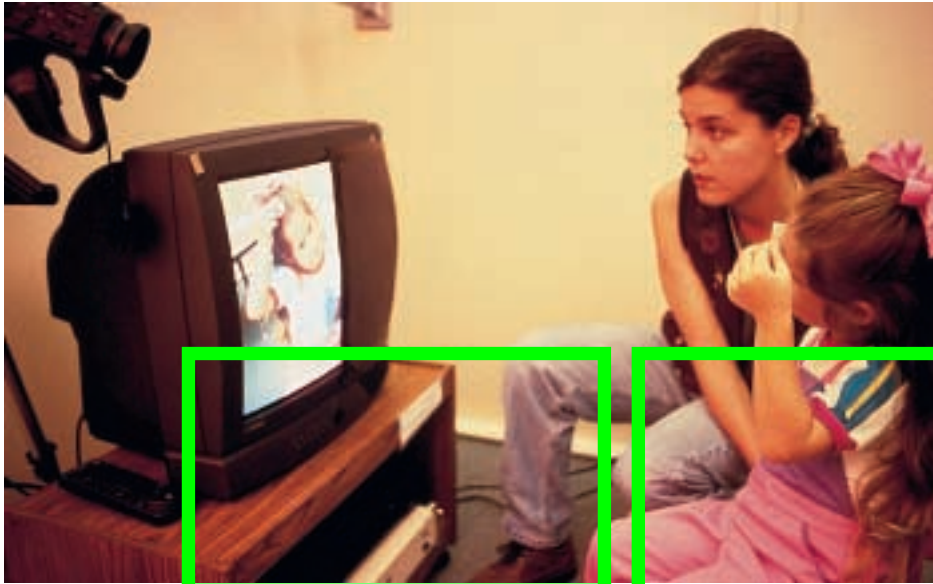
Un an après les premières expériences, nos chimpanzés ayant entre-temps participé à de nombreuses autres études, nous leur avons à nouveau fait passer les tests initiaux : à notre grande surprise, ils commençaient par répondre au hasard, même quand l'un des expérimentateurs dissimulait sa tête derrière un disque de carton. Leurs performances ne se sont améliorées que progressivement, après de nombreux essais et échecs. En outre, après une année supplémentaire, alors qu'ils étaient devenus de jeunes adultes, des tests ont révélé que leur comportement se fondait toujours sur la position des expérimenta-

teurs, sur les mouvements de leur visage et de leurs yeux, et non sur le fait qu'ils les voyaient ou pas. Ainsi, nous n'avons aucune preuve que les chimpanzés comprennent vraiment l'un des aspects les plus élémentaires de l'intelligence humaine, qui consiste à comprendre que les autres sont capables de voir.

D'autres études indiquent que, plus généralement, les chimpanzés ne déduisent jamais les pensées ou les intentions de ceux dont ils observent le comportement. Ainsi, ils ne comprennent pas le geste de pointage vers un objet comme une action référentielle, ni la différence entre un comportement accidentel et un comportement intentionnel. En outre, des tests récents réalisés avec Daniela O'Neill nous conduisent à réviser les interprétations de nos premières expériences, où un chimpanzé devait coopérer avec un expérimentateur. Bien que les chimpanzés apprennent facilement à coopérer entre eux, leur conscience des états mentaux de leurs partenaires n'est pas avérée.

Les chimpanzés ne semblent pas avoir conscience des états mentaux des autres. Ont-ils conscience de leurs propres états mentaux? Que révèle leur comportement devant un miroir? Le fait de toucher sur son visage des taches colorées que l'on ne voit que dans le miroir indique-t-il qu'ils se représentent avec un passé et un futur? Que l'on a une «mémoire autobiographique»?

Pour répondre à ces questions, nous avons filmé de jeunes enfants qui jouaient individuellement, avec un expérimentateur, à un jeu nouveau pour



eux. Au cours du jeu, l'expérimentateur félicitait l'enfant et en profitait pour lui placer subrepticement sur la tête un grand autocollant de couleur vive. Trois minutes plus tard, on montrait aux enfants soit leur propre image vidéo en direct, soit l'enregistrement où l'expérimentateur plaçait l'autocollant.

Les enfants de deux et trois ans réagissaient différemment selon qu'ils regardaient leur image en direct ou l'enregistrement. Face à leur image en direct, la plupart saisissaient l'autocollant pour l'enlever, tandis qu'en regardant les images différées de trois minutes seuls un tiers d'entre eux touchaient l'autocollant. Les autres l'avaient pourtant remarqué sur les images : lorsque l'expérimentateur leur montrait en demandant ce que c'était, la majorité répondait : «C'est un autocollant!», mais sans pour autant l'enlever de leur tête.

Ces enfants se reconnaissaient pourtant sur les images enregistrées. Lorsqu'on leur demandait : «Qui est-ce?», même les plus jeunes répondaient sans hésiter : «C'est moi!» ou s'identifiaient par leur prénom. Cette reconnaissance ne semblait toutefois pas aller au-delà de leurs caractéristiques faciales ou corporelles. Si on leur demandait : «Où se trouve cet autocollant?», ils faisaient plutôt référence à l'autre enfant : «Il est sur sa tête.» Comme si le décalage entre leurs actions et celles qu'ils observaient sur l'enregistrement les empêchait de se reconnaître totalement. Une fillette de trois ans, prénommée Jennifer, résuma bien cette situation en disant : «C'est Jen-

nifer», et en se hâtant d'ajouter : «Mais pourquoi porte-t-elle mon chemisier?»

Nous avons répété la même expérience avec des enfants de quatre et cinq ans. Une grande majorité se reconnaissait sur les images différées : la plupart enlevaient sans hésitation l'autocollant après s'être vus. Ils ne se désignaient plus par «il» ou «elle», ni par leur prénom en parlant des images. Ces observations corroborent des études antérieures qui montraient que la vraie mémoire autobiographique apparaît entre trois ans et demi et quatre ans et demi, et non pas à deux ans comme le suppose G. Garab. Les enfants de deux ans se souviennent d'événements passés, mais ils ne comprennent apparemment pas que ces souvenirs constituent une histoire de soi qui conduit au présent.

### Similitude n'est pas identité

La reconnaissance de soi, chez les chimpanzés et chez le jeune enfant, semble donc fondée sur la reconnaissance de son propre comportement et non sur la reconnaissance de ses propres états psychologiques. Lorsque les chimpanzés et les orangs-outans se voient dans un miroir, ils établissent une correspondance entre les actions qu'ils voient dans le miroir et leur propre comportement. Chaque fois qu'ils bougent, leur image bouge avec eux. Ils en concluent que tout ce qui est vrai pour leur propre corps l'est pour l'image du miroir, et *vice versa*. Ils ne

pensent pas : «C'est moi», mais plutôt : «C'est comme moi.» S'ils touchent sur eux-mêmes des taches colorées qu'on a placées à leur insu sur des parties de leur corps visibles seulement dans le miroir, c'est peut-être simplement parce qu'ils explorent la similitude. La conscience que les chimpanzés ont d'eux-mêmes correspond donc à une représentation mentale explicite de leur position et des mouvements de leur corps que l'on pourrait appeler une conscience kinesthésique de soi.

Pourquoi, seuls parmi les primates, les humains, les chimpanzés et les orangs-outans ont-ils cette conscience kinesthésique d'eux-mêmes? Peut-être parce qu'ils sont plus grands. Il y a plusieurs années, avec John Cant, de l'Université de Porto Rico, nous avons observé pendant plusieurs mois des orangs-outans dans la forêt tropicale humide de Sumatra : leurs mouvements lents et orgueilleusement préparés sont subitement recoupés d'acrobaties à couper le souffle. Les problèmes que rencontrent ces animaux de 40 à 80 kilogrammes pour passer d'arbre en arbre sont qualitativement différents de ceux auxquels sont confrontés les singes plus petits. Alors que les ancêtres des grands singes ont évolué, leur taille a quadruplé en 10 à 20 millions d'années ; ils ont simultanément acquis un système d'autoreprésentation qui leur permettait de programmer leurs mouvements dans un environnement arboricole, et qui se traduit par une conception kinesthésique explicite de soi.

Pourquoi alors le gorille ne se reconnaît-il pas dans un miroir? Les gorilles passent la majeure partie de leur vie au sol, et leur croissance est plus rapide que celle des chimpanzés et des orangs-outans. Ces adaptations sont peut-être apparues au prix d'une disparition de la conception kinesthésique de soi, devenue moins utile. Chez l'homme, au contraire, la vitesse de croissance s'est ralentie, allongeant le développement cognitif.

L'hypothèse d'une conscience de soi kinesthésique expliquerait plusieurs comportements des jeunes enfants et des chimpanzés. Ainsi, plusieurs études n'ont trouvé aucune corrélation entre la réussite au test du miroir d'un enfant de 18 à 24 mois et sa compréhension que le miroir réfléchit tout objet que l'on place devant lui. L'enfant ne comprend donc pas son image comme une représenta-

## Il n'y a pas d'expériences concluantes

**G**ordon Gallup, dans le second article de ce débat, écrit, en se fondant sur les résultats du test de la tache colorée, que les chimpanzés «sont conscients de leur propre existence». Cette interprétation est très (trop?) généreuse : aucune démonstration n'a prouvé que la reconnaissance de son image dans un miroir implique forcément la conscience de soi.

Ainsi le chimpanzé peut-il reconnaître sa propre image dans un miroir, au point d'y repérer une tache de couleur posée à son insu sur sa face, et de la gratter. Pour autant, il ne semble pas intégrer cette compétence dans ses relations avec ses congénères, en prêtant attention à son apparence et au regard que les autres portent sur lui-même, comme le font les humains. Aucun ethologue n'a jamais pensé rendre compte de cette autoperception animale en termes de narcissisme ni de pudeur : le regard de soi dans le miroir et, éventuellement, le regard de l'autre ne renvoient pas à des conventions socialement définies chez les animaux.

En outre, le fait que deux espèces seulement d'anthropoïdes réussissent le test de la tache colorée peut être remis en question sur la base de facteurs de motivation : les singes non anthropoïdes évitent de regarder en face un congénère, sinon pour le menacer. Cette charge émotionnelle associée au regard pourrait fort bien empêcher ces espèces d'apprendre les contingences liées à l'image réfléchie par le miroir et les liens entre la vision (en l'occurrence de son corps réfléchi par le miroir) et la sensation kinesthésique (le mouvement du corps, les expressions devant le miroir), nécessaires à l'élaboration d'une image du corps.

Pour terminer à propos de ce test, notons que G. Gallup comme Daniel Povinelli omettent les travaux de Francine Patterson et Ronald Cohn, de la *Gorilla Foundation*, qui ont montré que les gorilles, comme les autres anthropoïdes, reconnaissent leur image dans un miroir. Ainsi, Koko, un gorille qui a appris à communi-

quer avec le langage des signes, se sert fréquemment du miroir pour examiner des parties de son corps, comme l'intérieur de la bouche, qu'il ne pourrait pas voir autrement.

**L**es tests mis au point par D. Povinelli pour l'étude des états mentaux chez les primates non humains sont très ingénieux. Néanmoins, leur interprétation n'est jamais univoque. Même en cas de réussite des animaux à ces tests, on ne peut décider si les bonnes réponses reposent sur une attribution d'états mentaux ou, plus simplement, sur la détection de différences dans le comportement des acteurs ou de détails dans la situation expérimentale. Cette seconde explication attribue les succès de l'animal à l'apprentissage d'une simple régularité et à un raisonnement à partir de paramètres observables. Par exemple, dans les expériences qui examinent la capacité des singes à comprendre ce que savent des partenaires, autrement dit à distinguer entre un initié et un parieur, il suffit que les chimpanzés aient détecté une régularité d'un détail dans l'apparence du partenaire ou dans la situation, et qu'ils l'aient associée au fait de recevoir ou non une récompense.

La démonstration que les singes attribuent des représentations à autrui nécessiterait la réfutation, avec des arguments expérimentaux, de l'interprétation en termes de paramètres observables. À ce jour, aucune expérience n'est parvenue à exclure une telle interprétation. Il est donc prudent de conclure, provisoirement, que les primates non humains n'ont pas une théorie de l'esprit impliquant l'attribution d'intentions aux autres. S'ils se représentent bien leurs congénères comme des êtres animés ayant des buts qui sont susceptibles d'être anticipés à partir d'indices contextuels et comportementaux, ils ne les dotent pas d'intentions.

Jacques VAUCLAIR,  
Centre de recherches  
en neurosciences cognitives,  
CNRS, Marseille

donc de lui-même, mais plutôt comme une entité spéciale ayant le même comportement et la même apparence que lui.

Les jeunes enfants échouent souvent au test de reconnaissance d'eux-mêmes quand on modifie, même très peu, l'image qu'on leur donne d'eux-mêmes. Par exemple, quand on leur montre leur image vidéo avec un décalage de deux secondes, ils continuent de reconnaître leurs caractéristiques faciales et corporelles, mais ils ne concluent pas que les images sont équivalentes à eux-mêmes. Enfin, les jeunes enfants et les chimpanzés, après s'être reconnus dans le miroir, persistent néanmoins à regarder derrière, comme pour chercher celui qu'ils voient.

Comment l'homme et le chimpanzé ont-ils en commun des comportements sociaux aussi perfectionnés tout en les comprenant de manière aussi différente? Pourquoi les êtres humains interprètent-ils ces comportements en termes d'états psychologiques, alors que les singes ne pensent apparemment qu'en termes kinesthésiques?

Imaginons notre planète il y a 60 millions d'années, bien avant l'apparition des primates modernes. Selon Alison Jolly, de l'Université de Princeton, les interactions sociales se sont complexifiées lorsque les premiers petits primates sont passés d'une mode de vie solitaire à une vie en grands groupes. Les primates auraient alors progressivement acquis des capacités de raisonnement sur les comportements des autres. Ainsi seraient apparus les divers comportements sociaux que l'on observe chez les primates modernes : le fait de regarder ce qu'un autre observe, la tromperie, l'apaisement...

Aucun de ces comportements n'imposait aux premiers primates de raisonner au sujet des états mentaux des autres. Seule la lignée humaine a lentement acquis la spécialisation cognitive qui nous permet de nous représenter explicitement nos propres états psychologiques et ceux des autres. L'apparition de cette spécialisation ne nous a pas fait perdre le répertoire des comportements de base des primates. Notre nouvelle conscience de la dimension mentale du comportement s'est imprimée dans des circuits neuronaux existants. Aucun autre singe, quoique pensent certains, n'ont jamais acquis ces capacités. ■

# Conscience de soi et conscience des autres

GORDON GALLUP

*Les chimpanzés et les orangs-outans se reconnaissent dans un miroir : ils sont conscients de leur propre existence. Des expériences montrent qu'ils connaissent aussi l'état mental de leurs congénères.*

Comment étudier la conscience ? Personne ne l'a jamais entendue, vue, goûtée ni touchée. Nous ne ressentons pas exactement ce que ressent une autre personne, encore moins ce que ressent un animal, même aussi proche de nous biologiquement qu'un chimpanzé. D'ailleurs, d'autres espèces que la nôtre sont-elles conscientes de leur propre existence ?

Les chimpanzés et les orangs-outans sont conscients de leur propre existence : face à leur image dans un miroir, la plupart des animaux réagissent comme s'ils rencontraient l'un de leurs semblables, mais les chim-

panzés et les orangs-outans, comme, bien sûr, les humains apprennent que le reflet du miroir est une représentation d'eux-mêmes. En outre, les animaux conscients de leur propre existence attribuent des intentions et des émotions à leurs congénères ou à des individus d'autres espèces.

Depuis 1969, j'utilise des miroirs pour étudier la conscience animale. J'ai placé des chimpanzés préadolescents devant un miroir dans lequel ils se voyaient intégralement. D'abord, ils réagissent comme s'ils voyaient d'autres chimpanzés, mais, après quelques jours, ils s'habituent au miroir

et commencent à l'utiliser pour faire des grimaces, examiner l'intérieur de leur bouche, et gratter et inspecter d'autres parties de leur corps qu'ils n'avaient jamais vues auparavant.

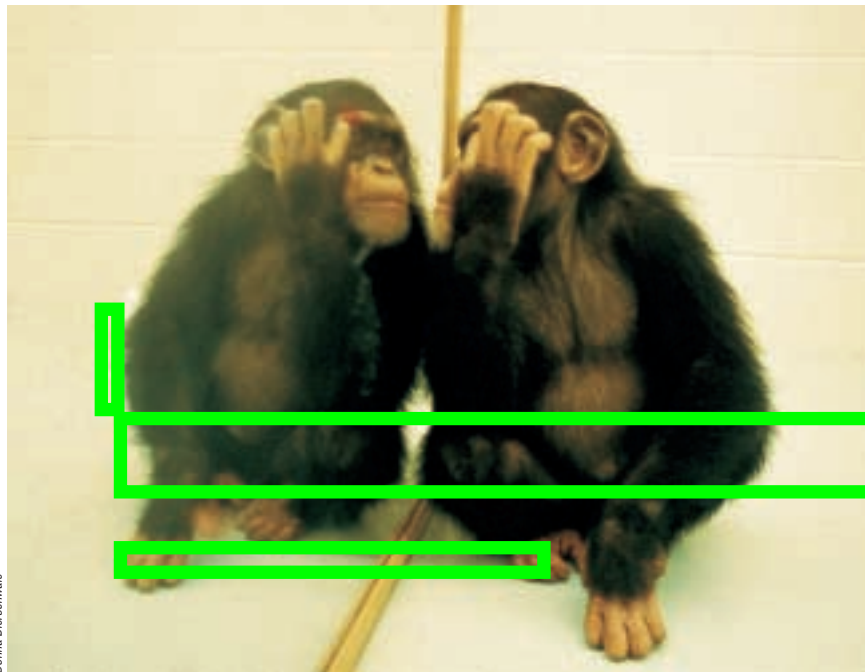
## Le test de la tache colorée

Pour savoir s'ils reconnaissent que ce reflet était une image d'eux-mêmes, j'ai anesthésié des animaux et je leur ai teint en rouge une arcade sourcilière et la moitié supérieure de l'oreille opposée. À leur réveil, lorsque les chimpanzés se regardaient dans le miroir, ils touchaient les marques rouges et, parfois, examinaient et sentaient leurs doigts. Les chimpanzés qui n'avaient pas été préalablement habitués au miroir se comportaient comme s'ils rencontraient un autre chimpanzé et ne se préoccupaient pas des marques rouges.

Nous avons fait subir le même test à de nombreux autres animaux, notamment des primates, des éléphants, des oiseaux et des dauphins. Seuls les chimpanzés, les orangs-outans et les humains recherchent sur eux-mêmes les taches colorées qu'ils voient dans le miroir.

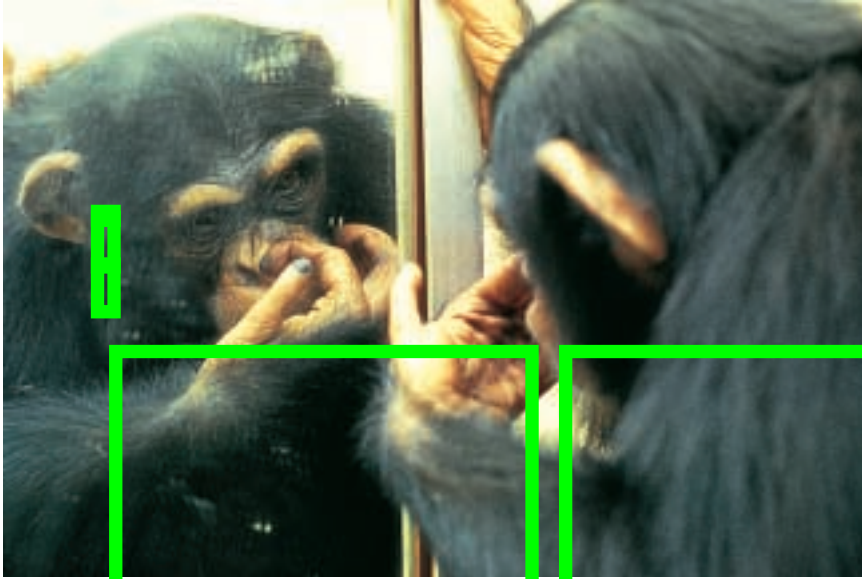
À l'issue d'autres tests de psychologie cognitive, par exemple des tris ou des classements d'objets, les différences de performance entre les espèces sont plus progressives et dépendent de la complexité du test, pas de sa nature. Pourquoi le test du miroir est-il si particulier ?

Nous supposons que la plupart des animaux ne reconnaissent pas l'identité de l'image que leur renvoie le miroir parce qu'ils n'ont pas conscience de



Donna Blenschwale

**LA RECONNAISSANCE DE SOI** chez les chimpanzés est démontrée par le fait qu'ils touchent les marques rouges peintes sur leur visage qu'ils ne voient que dans le miroir. Une fois familiarisés avec le miroir, ils inspectent leur corps et font des grimaces.



Donna Berschviale

leur propre identité. Les enfants humains de moins de 18 mois environ ont ce type de comportement. Ils ne manifestent des signes évidents qu'ils se reconnaissent que lorsqu'ils commencent aussi à présenter d'autres signes de conscience de soi, par exemple quand ils commencent à employer des pronoms personnels ou quand ils sourient après avoir réussi une tâche. C'est vers cet âge qu'apparaît aussi la mémoire consciente des événements passés.

La conscience de soi, la conscience en général et la pensée me semblent être les manifestations d'un même processus sous-jacent : les organismes qui sont conscients de leur propre existence peuvent utiliser leurs sensations pour imaginer celles des autres. Ainsi, lorsque nous voyons une personne dans une situation similaire à l'une de celles que nous avons vécues, nous supposons automatiquement qu'elle ressent ce que nous avons senti. Bien que deux personnes ne vivent jamais un même événement exactement de la même manière, nos systèmes sensoriels et neurologiques sont identiques, de sorte que nos impressions se recouvrent partiellement. De surcroît, comme nous savons comment les événements extérieurs agissent sur nos états mentaux et quels comportements nos états mentaux peuvent entraîner, nous nous représentons les états mentaux des autres.

Imaginons, par exemple, que votre chien revienne un jour avec des épines

de porcépic dans le museau. Pendant que vous extrayez ces épines à la pince à épiler, vous ne ressentez aucune douleur mais, en observant les réactions du chien, vous imaginez ce qu'il ressent. En revanche, un autre chien assistant à l'opération resterait indifférent à la douleur de son congénère ; au mieux, il réagirait peut-être aux jappements de douleur du chien endolori.

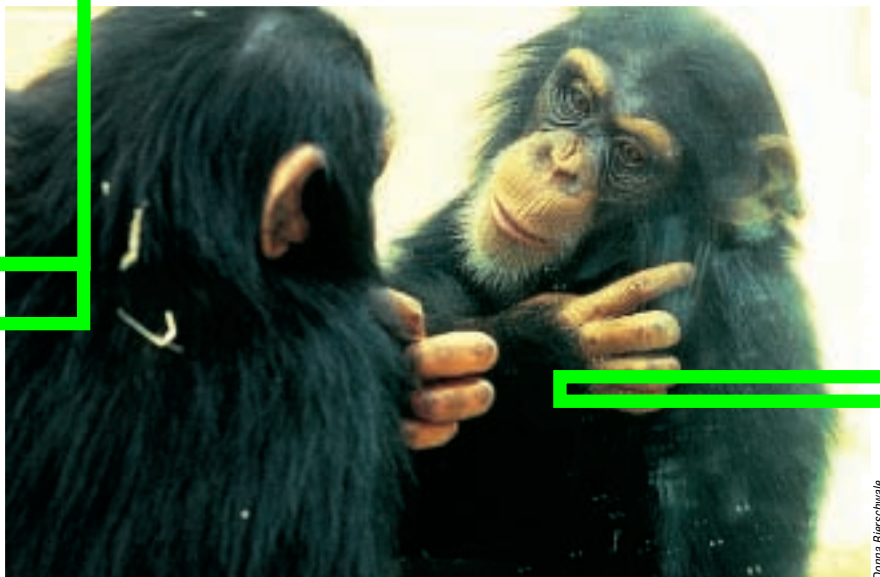
Plus généralement, on ne connaît les états mentaux d'autrui que si l'on connaît ses propres états mentaux. La plupart des êtres humains attribuent touramment à leurs interlocuteurs des connaissances ou des ignorances, des aspirations ou des intentions. Au contraire, les espèces qui ne se reconnaissent pas elles-

mêmes dans un miroir devraient être incapables d'utiliser des stratégies sociales fondées sur l'introspection, telles que la sympathie, la capacité à éprouver les sentiments des autres, l'attribution, la tromperie intentionnelle, la rancune, la gratitude, la prétention, la comédie ou le chagrin.

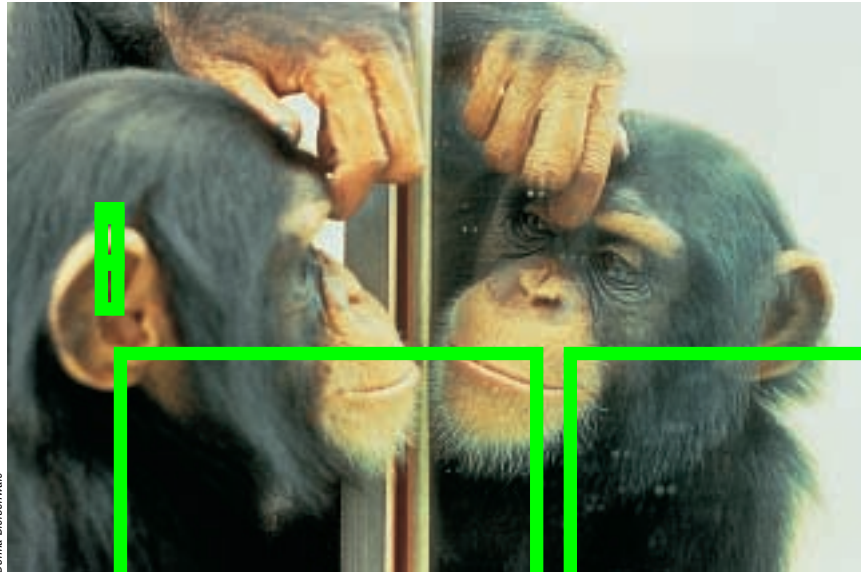
## Transposer ses propres expériences

Comment démontrer ce lien entre la reconnaissance de soi dans le miroir et la conscience des états mentaux d'autrui ? Plusieurs expériences révèlent si un animal utilise ses expériences intérieures pour se représenter ce que ressent un congénère ou un homme. On peut ainsi bander les yeux d'un animal pendant un certain temps, puis, après lui avoir ôté le bandeau, le mettre en présence d'un congénère portant lui-même un bandeau sur les yeux : comprendra-t-il que celui-ci ne voit pas ? On peut aussi apprendre à un animal à appeler pour obtenir une récompense (de la nourriture) chaque fois qu'un expérimentateur entre dans la pièce, puis le priver un certain temps de l'aide d'un casque d'insonorisation : appellera-t-il plus fort en voyant entrer l'expérimentateur coiffé d'un casque identique ?

Dans ce type de tests, les singes qui ne présentent pas de signes de reconnaissance d'eux-mêmes semblent ne pas savoir non plus ce que les autres singes savent ou ne savent pas. Leur comportement est fondé sur des carac-



Donna Berschviale



Donna Bierschviale

conscience, les chimpanzés, déboussés de langage, ne classeraient pas, comme nous, leurs expériences par catégories sensorielles (visuelles, auditives, olfactives...), mais feraient des déductions plus globales.

### L'émotion avant la connaissance

La plupart des expériences de D. Povinelli portent sur la compréhension par les chimpanzés des connaissances qu'un autre peut avoir. Or, les enfants attribuent aux autres des sentiments et des motivations avant qu'ils ne soient capables de leur attribuer des connaissances. Ils commencent à faire des déductions élémentaires sur les états émotionnels des autres à l'âge où ils se reconnaissent dans un miroir (jamais avant). La capacité plus avancée de déduction de ce que savent les autres n'apparaît qu'un ou deux ans plus tard. Les enfants autistes, qui ont des difficultés à prendre en compte ce que savent, ne sentent ou ressentent les autres,

n'accèdent que tardivement à la conscience d'eux-mêmes ; certains n'ont même jamais cette conscience.

D. Povinelli suppose que les chimpanzés et les orangs-outans se reconnaissent dans un miroir parce qu'ils ont une conception motrice, et non psychologique, d'eux-mêmes : ils ne se reconnaîtraient pas vraiment, mais

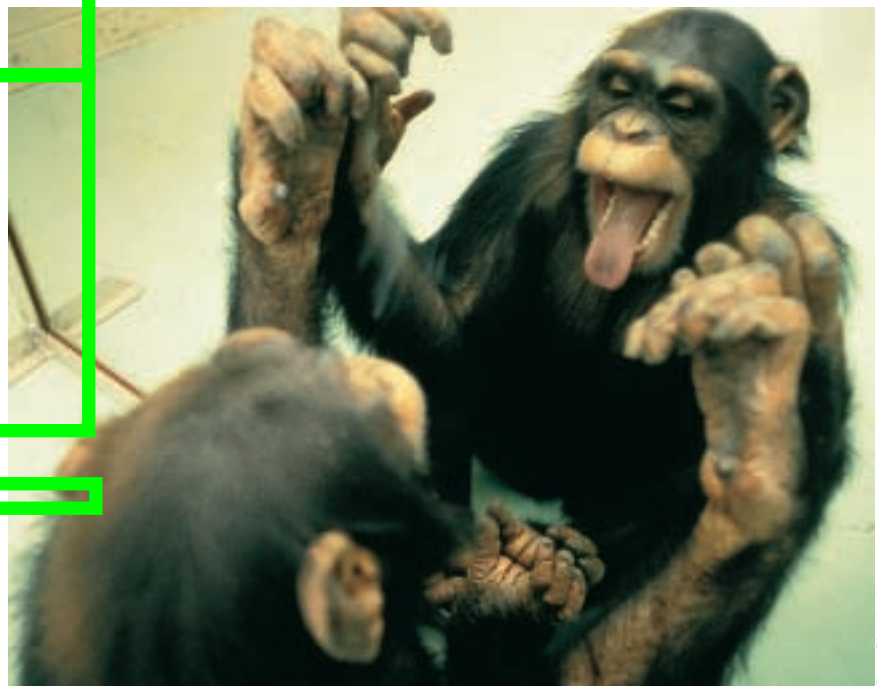
tières extérieures des autres singes, et non sur ce que ces autres singes pourraient penser ou avoir l'intention de faire. Ainsi, des vervets poussent des cris d'alarme lorsqu'ils aperçoivent un prédateur, même si des congénères l'ont déjà vu et signalé. De même, chez les macaques japonais, quelle que soit la capacité d'un jeune à reconnaître la présence de nourriture ou d'un danger, sa mère l'en avertit systématiquement.

En revanche, les chimpanzés tiennent compte de ce que les humains semblent savoir ou ne pas savoir. À l'Université de l'Ohio, Daniel Povinelli et Sally Boysen ont placé des chimpanzés en présence de deux récipients dont un seul contenait de la nourriture ; les singes ne savaient pas lequel, et ils devaient choisir en suivant les indications de deux expérimentateurs dont les singes savaient qu'un seul avait vu le remplissage des récipients. Les chimpanzés ont appris à choisir le récipient désigné par l'individu qui avait vu lequel avait été garni de nourriture. Des macaques rhésus, au contraire, ont persisté à choisir au hasard.

Une autre expérience a prouvé la capacité des chimpanzés à tenir compte de ce que d'autres savent. Un chimpanzé devait tirer un levier pour amener des récipients de nourriture à sa portée, mais il ne savait pas lequel avait été rempli : il devait suivre les indications d'un expérimentateur dont il savait qu'il connaissait le contenu des récipients. Les chimpanzés étaient capables d'échanger leur rôle avec l'expérimentateur sans que les perfor-

mances diminuent. Les macaques, au contraire, en sont montrés incapables.

D. Povinelli, qui pense que ses premières expériences ont été mal interprétées, ne reconnaît pas que les chimpanzés aient conscience de leurs propres états mentaux, et encore moins de ceux des autres. Il a fait plusieurs expériences pour montrer que les chimpanzés n'ont pas de conscience, mais il a alors utilisé des animaux trop jeunes : les chimpanzés ne se reconnaissent qu'à l'adolescence. En outre, ces expériences portaient peut-être sur une notion trop restreinte de la



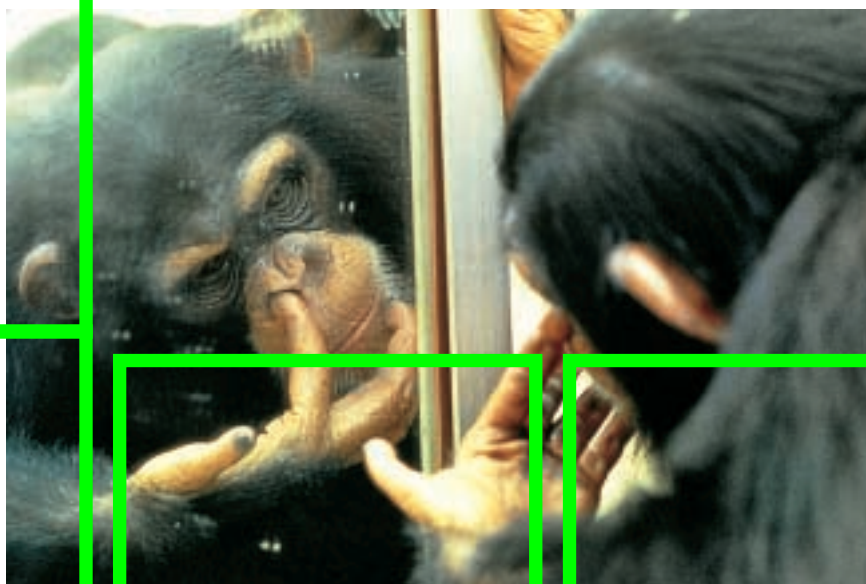
Donna Bierschviale

apprendre à voir qu'il y a une équivalence entre leur comportement et ce qu'ils voient dans le miroir. Pourquoi les chimpanzés et les orangs-outans passeraient-ils alors tant de temps à inspecter ces parties de leur corps qu'ils ne peuvent voir que dans le miroir? Pourquoi se préoccuperaient-ils de marques rouges sur leur visage qui n'ont pas de conséquences sur leur motricité? Au collège Hunter, Suzan Calhoun et Robert Thompson ont décrit le comportement très agité d'une femelle chimpanzé qui, remise en présence d'un miroir un an après avoir appris à se reconnaître, a constaté en ouvrant la bouche qu'elle avait perdu plusieurs dents. Ces réactions liées à l'apparence sont difficilement explicables en termes de motricité.

L'exploration fonctionnelle du cerveau donne des indications sur l'existence de la conscience de soi : elle serait associée au cortex frontal. Ainsi, des études conduites avec Donald Stuss, de l'Institut de recherche Rotman, à Toronto, sur des individus humains présentant des lésions du cortex frontal montrent que ces personnes semblent incapables de se représenter les états mentaux d'autrui.

Plus précisément, la conscience de soi est associée à l'activité du cortex préfrontal droit. Avec mes collègues Brume McCutcheon, Glenn Sanders, Julian Keenan et Alvaro Pascual-Leone, j'ai étudié la rapidité à laquelle les humains reconnaissent des visages. Lorsqu'ils les réagissent de la main gauche (commandée par l'hémisphère droit du cerveau), des personnes normales identifient leur propre visage plus rapidement que celui de leurs amis ou de leurs collègues de travail ; les potentiels électriques se modifient alors dans le cortex préfrontal droit. En outre, quand on modifie l'activité électrique de cette zone cérébrale à l'aide de champs magnétiques, la reconnaissance de son propre visage est ralentie, tandis que la vitesse de reconnaissance d'autrui n'est pas modifiée.

Les gorilles sont les grands singes dont le cerveau est le moins latéralisé. L'absence de spécialisation de l'hémisphère droit expliquerait les mauvais résultats obtenus par ces animaux au test du miroir. D. Povinelli suppose que leur conscience de soi, purement motrice, est une adaptation à la vie arboricole, nécessaire pour la coordi-



Donna Blenschke

nation des déplacements, de branche en branche. Comme les gorilles passent la majeure partie de leur temps au sol, ils auraient perdu cette capacité devenue inutile. Toutefois, les gorilles remontent chaque nuit dormir dans les arbres, et les hommes sont, de loin, les primates les moins arboricoles. Selon l'hypothèse de D. Povinelli, nous ne devrions pas non plus nous reconnaître dans un miroir.

Les grands singes peuvent-ils attribuer des états mentaux aux autres? La plupart des études de cette question corroborent la conclusion de Nicholas Humphrey, de l'Université de Cambridge, selon laquelle de nombreuses espèces ont un cerveau évolué, mais une pensée vide : elles ont des capacités d'apprentissage et de résolution de problèmes, mais elles sont incapables

d'utiliser leurs expériences pour prendre en compte celles des autres. Comme le montre le comportement des souris ambules, la conscience de ce que l'on fait n'est pas nécessaire à la réussite d'une tâche. Seuls les orangs-outans et les chimpanzés semblent avoir accompagné l'homme dans son développement cognitif.

Lorsque j'ai mis au point le premier test de reconnaissance de soi, il y a près de 30 ans, j'ai utilisé ma propre expérience et mon imagination pour prévoir quelle serait la réaction des chimpanzés qui s'observeraient dans un miroir. Ici, comme je le pense, la capacité de se concevoir d'abord soi-même est ce qui rend possible la conscience et la pensée, alors nous devons transformer la célèbre phrase de Descartes en : « Je suis, donc je pense. »

Gordon G. GALLUP est professeur de psychologie à l'Université d'Albany.

Daniel POVINELLI dirige le département de biologie comportementale du Centre de recherches New Iberia de l'Université de Louisiane du Sud-Ouest.

Daniel J. POVINELLI et John G. H. CANT, *Arboreal Clambering and the Evolution of Self-Conception*, in *Quarterly Review of Biology*, vol. 70, n° 4, pp. 393-422, 1995.

J. VAUCLAIR, *L'intelligence de l'animal*, Seuil, 1995.

Karen WRIGHT, *The Tarzan Syndrome*, in *Discover*, vol. 17, n° 11, pp. 88-99, novembre 1996.

J.M. VIDAL et J. VAUCLAIR, *Un animal*

*politique autre qu'humain ?*, Epokhè, pp. 35-55, 1996.

Gordon G. GALLUP, Jr., *On the Rise and Fall of Self-Conception in Primates*, in *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 818, pp. 73-84, 1997.

J. VAUCLAIR, *L'homme et le singe*. Psychologie, poche, Flammarion, 1999.

Gordon G. GALLUP, *Self-Awareness and the Evolution of Social Intelligence*, in *Behavioral Processes*, vol. 42, n° 2-3, pp. 239-247, 1998.

Daniel J. POVINELLI et C.G. PRINCE, *When Self Met Other*, in *Self-Awareness : Its Nature and Development*, sous la direction de M. Ferrari et R.J. Sternberg, Guilford Press, 1998.



# Le raisonnement des animaux

JAMES GOULD • CAROL GRANT GOULD

*De nombreuses espèces animales ont des capacités d'abstraction, de planification et de raisonnement logique élémentaire.*

**O**n a longtemps soutenu que seule l'espèce humaine pensait ou dressait des plans. Le raisonnement, qui aurait été l'apanage de l'homme, aurait fait de nous des animaux à part. Toutefois, au cours des 20 dernières années, cette exception intellectuelle a été réfutée. Nombre de biologistes admettent aujourd'hui que quelques animaux pensent, et plusieurs performances cérébrales qui semblaient typiquement humaines – le langage, par exemple – paraissent dues autant à une programmation innée qu'à un apprentissage.

Cette révision du statut de l'intelligence succède à presque un siècle de laxisme scientifique. L'affaire du cheval Hans le malin, en 1904, a sans doute été l'obstacle le plus important à l'étude de l'intelligence animale (voir la figure 2). Le psychologue allemand Oskar Pfungst enquêta : «L'objectif si longtemps poursuivi semblait être enfin atteint. Un cheval résolvait des problèmes arithmétiques – un animal qui, grâce à un long apprentissage, non seulement maîtrisait de simples rudiments, mais semblait aussi capable de pensée abstraites dépassant de loin les espérances du plus enthousiaste.» Hans le malin semblait, en effet, lire et comprendre l'allemand parlé.

Des groupes d'experts avaient testé le cheval (souvent en l'absence de son propriétaire) et reconnu qu'il n'y avait aucune supercherie, mais Pfungst entreprit l'étude détaillée de l'animal. Après plusieurs mois, il découvrit que ce dernier percevait de légers indices invisibles que son public lui transmettait invariablement lorsque le nombre de ses coups de sabot approchait la valeur attendue.

Cette affaire, qui discrédita les études de la pensée animale, faisait suite à un engouement parfois exces-

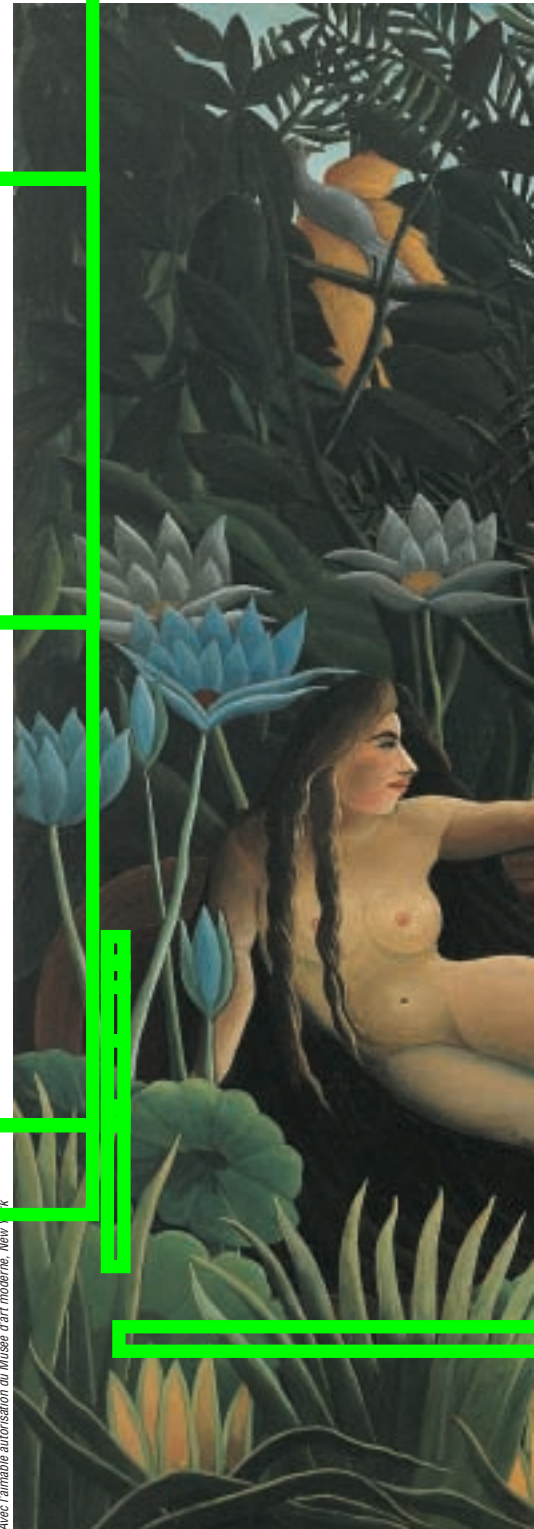
sif. Dans son ouvrage *L'intelligence de l'animal*, paru en 1888, le psychologue britannique George Romanes considérait que même les coquillages étaient doués de raison : «Nous pensons, par exemple, qu'une huître met à profit son expérience personnelle, qu'elle perçoit des relations nouvelles et, par suite, agit en fonction de ses perceptions...»

Après l'épisode de Hans le malin et l'abandon des recherches sur l'intelligence animale, l'école behavioriste est restée la seule à étudier le comportement animal. Cette théorie déniait non seulement aux animaux, mais aussi à l'homme, l'instinct, la conscience, la pensée et la liberté. En 1912, le psychologue américain John Watson, fondateur du behaviorisme, prétendait ainsi que «la conscience est un concept qui n'est ni défini ni utilisable. [...] Toute croyance en l'existence d'une conscience remonte aux temps reculés de la superstition et de la magie.»

Pour Watson, tous les comportements humains et animaux – même la respiration ou la circulation du sang – résultent d'un conditionnement. Selon lui, les humains ne pensent pas réellement, même quand ils acquiescent, avec un entraînement approprié, des «habitudes verbales» extrêmement rationnelles. Watson attribuait l'inexistence de pensée chez les animaux à l'absence de langage animal. Les comportements animaux – l'éducation des nids par les oiseaux, par exemple – auraient résulté de l'anatomie particulière des espèces, de leur habitat et des expériences individuelles.

Le behaviorisme, lui, stipulait que l'apprentissage s'effectue de façon automatique, sans intelligence et sans

1. LE RÊVE, Henri Rousseau



Avec l'aimable autorisation du Musée d'art moderne, New York

qu'aucune compréhension ne soit nécessaire de la part de celui qui apprend : de la même façon que dans le conditionnement classique, qui associe une réaction réflexe à un stimulus. Un chien apprend ainsi que le son d'une cloche ou un éclair lumineux signifie «nourriture». Selon le beha-

viorisme, l'autre forme d'apprentissage – le conditionnement opérant – est analogue : les animaux découvrent par essais et erreurs quels comportements leur valent une récompense ; ils adoptent ensuite ces comportements. Dans les deux cas, aucune compréhension n'est nécessaire.

La découverte ultérieure des programmes d'apprentissage instinctif, propres à chaque espèce, a porté un coup fatal au behaviorisme (voir *L'apprentissage instinctif*, par James Gould et Peter Marler, *Pour la Science*, mars 1987), mais n'a pas abattu la théorie qui considérait l'animal comme une

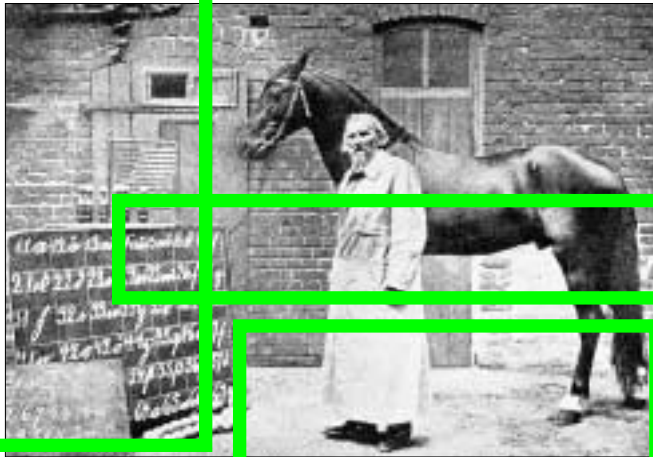


machine à apprendre passive. Le tabou behavioriste concernant la pensée des animaux a subsisté jusqu'en 1976, année où Donald Griffin publia son livre provocateur et polémique *La conscience de l'animal*. Le behaviorisme avait tant engourdi les esprits que les zoologistes ont été consternés qu'une personnalité scientifique aussi notoire que D. Griffin s'intéresse au problème de l'intelligence animale. Ses ouvrages, *Pensée animale*, en 1984, et *Raison animale*, en 1992, ont renforcé son attaque de l'opinion classique. Aujourd'hui, l'intérêt pour ses idées est mêlé de scepticisme : quelques animaux formulent peut-être des plans élémentaires, mais comment le savoir ?

## Quels sont les critères de la pensée ?

Les comportements que Romanes trouvait « intelligents » ne sont plus considérés comme tels aujourd'hui. Par exemple, les procédures compliquées d'édification des nids des oiseaux et des insectes sont en grande partie, sinon totalement, innées : des individus élevés à l'écart des autres façonnent des nids identiques à ceux qui sont fabriqués par des individus qui ont grandi en liberté, et donc en société. Si le choix du site et l'édification du nid s'améliorent souvent avec la pratique, les éléments de base du comportement sont innés. Les adaptations complexes qui nous impressionnent tant ne sont peut-être que des comportements innés.

Les behavioristes ont démontré que l'apprentissage était parfois instinctif et involontaire. Le conditionnement laisse vraisemblablement une part à l'appréciation des probabilités lorsque la réaction innée n'est pas immédiate. Un caneton changeant son comportement sur celui de ses parents comprend peut-être ce qu'il fait et pourquoi il le fait, mais un jeu d'échecs qui suit un train miniature qui lui a été présenté au cours de la période critique d'imprégnation semble inné. Ainsi, la modification d'un comportement par l'apprentissage, lors d'une expérience, n'est pas une preuve manifeste de pensée.



**2. LE CHEVAL HANS LE MALIN** a surpris les zoologistes des années 1900, parce qu'il semblait savoir compter, épeler et comprendre l'allemand. En réalité, Hans le malin percevait de discrets indices provenant du public qui l'observait.

Bien des cas de perspicacité animale ont été mal interprétés. L'un des mieux connus est le comportement des mésanges bleues d'Angleterre (voir la figure 4). Chaque matin de bonne heure, lorsque le crémier dépose devant les pavillons du lait non homogénéisé à la surface duquel se forme une couche de crème, les mésanges bleues, cousines britanniques des mésanges à tête noire, enlèvent la capsule et prélèvent la crème. Selon l'ignorance de l'histoire naturelle de cette espèce a pu faire croire qu'un oiseau astucieux avait imaginé ce passe-temps et l'avait enseigné à ses congénères. En fait, les mésanges se nourrissent de larves d'insectes qu'elles découvrent en ôtant l'écorce des arbres. Leur comportement d'écorceuses est si fort que, bien souvent, les mésanges domestiques arrachent le papier peint des pièces de leurs propriétaires. C'est peut-être par stupidité que les mésanges bleues ont appris à récolter la crème des bouteilles de lait, confondant ces bouteilles avec des troncs d'arbres !

Les chimpanzés qui vont à la pêche aux termites seraient-ils plus intelligents que les mésanges ? Certains chimpanzés adultes effeuillent de longs roseaux, les introduisent dans les orifices des termitières et croquent les termites qui y sont accrochés (voir la figure 5) lorsqu'ils les retirent. De nombreux zoologistes ont observé les jeunes chimpanzés qui voyant faire un de leurs aînés, ont reproduit ce comportement. Cependant, même les chimpanzés nés en laboratoire sont obsédés par l'idée de glisser un objet

long et fin dans un trou. De même que pour les mésanges bleues, ce comportement est probablement inné, mais un lieu approprié est nécessaire à son application.

## Premiers soupçons de pensée

On ne peut attribuer une pensée à un animal que si l'on a d'abord vérifié que le comportement par lequel s'exprime cette pensée potentielle n'est ni instinctif ni engendré par un comportement inné. La connaissance de l'histoire naturelle et des tendances comportementales innées de l'espèce, ainsi que de l'histoire de l'animal en question, sont donc indispensables. Avant le regain d'intérêt pour la pensée animale, quelques études ont mis en évidence des actions animales planifiées à l'avance, mais elles ont été controversées. Aujourd'hui, ces études guident la plupart des expériences sur ce sujet.

En 1914, au Centre de recherche sur les primates des îles Canaries, le psychologue allemand Wolfgang Köhler proposait des problèmes nouveaux à ses chimpanzés captifs, et il observait que, souvent, les solutions trouvées supposaient moins une analyse des essai et des erreurs que de la perspicacité. Par exemple, quand Köhler plaça un régime de bananes hors de portée des animaux, ceux-ci firent quelques bonds inutiles, puis se retirèrent dans un coin et « boudèrent ». Ils se retournèrent quelquefois, jetèrent un regard vers les bananes, passèrent en revue les différents objets enfermés dans leur cage et regardèrent à nouveau les bananes. Puis ils se retournèrent vers une caisse qu'ils traînèrent sous les fruits, ils montèrent dessus, sautèrent et saisirent les bananes convoitées.

Lors d'expériences analogues, mais où les bananes étaient placées plus haut, les animaux eurent la même inspiration soudaine. Selon les cas, les chimpanzés empilaient des caisses (voir la figure 3), assemblaient des bâtons pour en faire une perche ou combinaient caisses et bâtons. Les zoologistes reprochaient à Köhler d'ignorer l'his-

toire des animaux qui avaient été capturés à l'état sauvage : ils réutilisaient peut-être une solution apprise dans la nature. D'autre part, les empilements de caisses ou les associations de bâtons sont fréquentes et spontanées chez les chimpanzés élevés en laboratoire.

Dans les années 1940, à l'Université de Berkeley, Edward Tolman a mis au point des tests précis pour faciliter les interprétations. Dans ses expériences (voir la figure 6), un rat était placé dans un labyrinthe expérimental sans aucun repère, tel un labyrinthe en T, avec la même récompense (de la nourriture) à chaque extrémité du T ; ce labyrinthe était pourvu d'un élément différent à chaque extrémité. Dans certaines expériences, la partie gauche se terminait dans une boîte sombre et étroite, tandis que la partie droite aboutissait à une boîte spacieuse et blanche. Spontanément, les rats préfèrent les boîtes sombres et étroites. Le lendemain, le rat était placé dans une boîte sombre et étroite, et il subissait un électrochoc. Le troisième jour, le rat était de nouveau placé dans le labyrinthe. La théorie du conditionnement stipule que le rat, sans entraînement particulier, devrait explorer le labyrinthe au hasard. Il n'a pas appris où se trouvait la boîte sombre et étroite qu'il préfère instinctivement. Cependant, le rat en question est allé directement vers la boîte blanche.

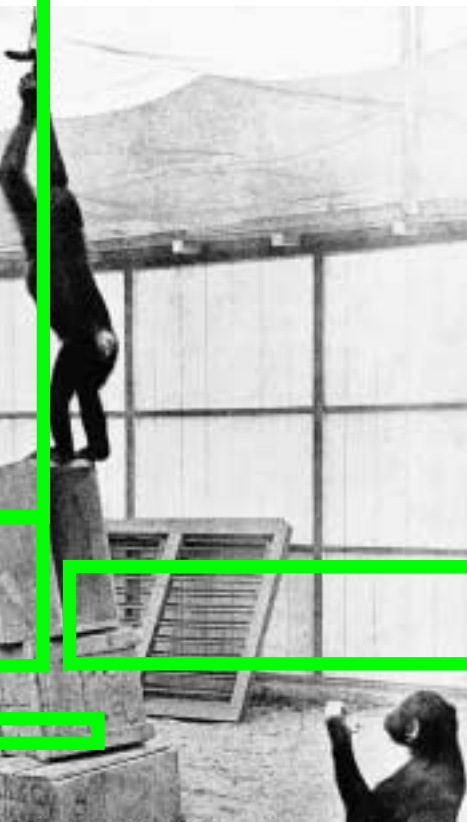
Selon Tolman, ce rat a conçu, sur la base de deux expériences indépendantes et sans lien apparent, un plan qu'il nomme «carte cognitive». Les chimpanzés de Köhler ont peut-être déjà joué avec des caisses et avec des bâtons dans une autre situation, mais le placement d'une caisse sous les bananes nécessite suffisamment de perspicacité pour lier l'utilisation des caisses à leur désir de bananes. Sans conditionnement par un entraînement essais-erreurs, les chimpanzés conçoivent et exécutent un plan simple qui, à son niveau le plus élémentaire, apporte la preuve d'une pensée animale.

Les plus sceptiques ont néanmoins critiqué les résultats de Tolman. Certains ont affirmé que les rats craignent les labyrinthes : ils auraient été récompensés par la

sortie du labyrinthe, après avoir atteint l'une des boîtes situées à l'extrémité, et cette récompense aurait été à l'origine d'un apprentissage. De retour dans le labyrinthe, le rat aurait su que sa meilleure chance de récompense (s'échapper du labyrinthe) consistait à se diriger vers la boîte dont il avait été sorti auparavant : la boîte blanche.

### Cartes cognitives

Bien que ces créatures aussi éloignées phylogénétiquement que des abeilles ou des araignées sauteuses semblent faire usage de cartes cognitives, les travaux sur le raisonnement animal ont porté sur les oiseaux et sur les primates. Plusieurs zoologistes ont cherché si des animaux pouvaient établir des concepts. À l'Université de l'Arizona, Irene Pepperberg a aussi étudié un perroquet nommé Alex (voir *Conversation avec un perroquet*, page 60). De même, à l'Université Harvard, Richard Herrnstein a étudié des pigeons à qui il montrait une série de diapositives : la moitié représentaient



**3. À L'ÉPOQUE DE LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE, Wolfgang Köhler a décrit pour la première fois la résolution de problèmes par des chimpanzés. Ici, l'empilement de boîtes pour atteindre des bananes.**

– des arbres, des poissons ou des feuilles de chêne. Lorsqu'ils becquetaient l'image d'un objet cible, les oiseaux étaient récompensés par de la nourriture. L'apprentissage est lent, jusqu'à ce que les oiseaux identifient le point commun des images «à récompense». Dans certaines conditions, les pigeons mémorisent l'ensemble des diapositives à récompense, se souvenant ainsi de centaines de clichés, mais, la plupart du temps, ils saisissent le trait commun et montrent leurs capacités de généralisation en réagissant correctement à des diapositives qu'ils n'ont encore jamais vues.

Avoir l'idée d'un concept – tel celui d'arbre – à partir de représentations particulières est difficile. On ne peut utiliser le liste de caractères nécessaires et suffisants à la reconnaissance ; or, nous reconnaissons (et les pigeons également) des arbres, qu'ils soient avec ou sans feuilles, avec ou sans tronc principal, avec ou sans ramifications secondaires, de près ou de loin, isolés ou en rangs serrés, avec des feuilles d'un vert classique ou rouges, etc. Pour l'homme (vraisemblablement pour les oiseaux aussi), un concept correspond à une liste de propriétés probables : par exemple, les arbres ont plus vraisemblablement des feuilles que des tiges à l'extrémité des branches. On reconnaît un arbre quand on observe un objet qui possède un «ensemble» suffisant de propriétés individuelles pertinentes. On ne le confond ni avec un tableau électrique ni avec une antenne de télévision. De nombreux philosophes considéraient naguère que la capacité de formulation de concepts était une preuve de pensée ; certains ont aujourd'hui changé d'avis.

D'autre part, de nombreux oiseaux sont capables de varier leurs itinéraires entre deux lieux familiers. Ils prouvent ainsi qu'ils établissent et utilisent des cartes mentales de leur zone d'habitat. Souvent, ces habitats sont petits, mais celui de l'indicateur d'Afrique, un oiseau de la famille du pic vivant de larves et de cire d'abeille, est spectaculaire.

L'indicateur a établi une relation symbiotique à la fois avec les ratels (des blaireaux carnivores, mais friands de miel) et l'homme.

L'oiseau repère une ruche, puis il appelle un ratel ou un homme afin que ces derniers lui ouvrent la ruche. L'appel de l'indicateur ressemble à un aboiement plaintif. Une fois l'attention de son auxiliaire captée, l'indicateur se dirige, par petits vols, dans la direction approximative de sa cible et il appelle de nouveau. En cas d'échec, l'oiseau fait une autre tentative, en raccourcissant son vol et en augmentant l'intensité de ses cris. Une fois la ruche atteinte (après une distance de 300 à 700 mètres environ), le ratel ou l'homme la brise pour son propre compte. L'indicateur récolte ensuite les larves et la cire qu'il affectionne.

Les expériences ont montré que les indicateurs connaissent l'emplacement de plusieurs ruches et qu'ils guident leurs auxiliaires jusqu'à la plus proche, le plus souvent par la voie la plus directe. Au cours d'une expérience, la personne qui jouait le rôle d'auxiliaire a suivi l'oiseau, mais a délibérément dépassé l'arbre à miel. Une première fois, l'indicateur a essayé de ramener cette personne vers l'arbre ; puis, lors d'une seconde tentative, l'oiseau a changé de tactique : il a tenté de conduire son « aide » vers une autre ruche, située approximativement dans la direction du trajet : c'est la preuve que les indicateurs situent parfaitement de nombreuses colonies d'abeilles, et ce dans un rayon assez étendu.

## Prédateurs détournés et approvisionnement

L'utilisation adaptable de divers comportements innés est une preuve de pensée. Les gravelots et les pluviers savent ainsi détourner de leurs nids (construits sur le sol) des animaux, prédateurs ou non, qui mettent le nid en danger. Chaque fois, l'oiseau quitte son nid et s'agagne discrètement un lieu éloigné de ses œufs. Il affiche alors des comportements variés, compris entre le simple appel à partir d'un endroit bien en vue et le mime d'une aile brisée ; l'oiseau imite aussi de façon très réaliste un rongeur. Il file sous les taillis, qu'il fait bruisser exprès tout en poussant de petits cris semblables à ceux d'une souris. Il sait aussi détourner des ani-

maux qui ne sont pas des prédateurs, tels des chats, quand ceux-ci risquent de marcher sur le nid.

Des études ont montré que le type de comportement utilisé dépend de la menace que représente le prédateur. Contre un renard qui file droit vers le nid, les oiseaux font semblant d'avoir une aile brisée. Dans les tests d'évaluation de la menace effectués par Carolyn Rissau de l'Université de Colombie, des personnes marchaient en ligne droite à proximité de nids de pluviers. Certaines scrutaient le sol soigneusement, comme si elles étaient à la recherche de nid, tandis que d'autres ne prêtient pas attention au sol. Après quelque temps, les pluviers distinguaient les chasseurs potentiels et les personnes apparemment inoffensives. Pour ces dernières, ils ne quittaient même plus leur nid, tandis qu'ils détournaient les premiers par des comportements élaborés. Cette capacité de choix parmi plusieurs réponses innées marque un certain degré de compréhension des situations.

L'étude de deux comportements inhabituels d'oiseaux en quête de nourriture a également révélé qu'ils établissent des plans. Les hérons verts, par exemple, capturent des poissons de plusieurs façons, sans doute instinctivement. Cependant, quelquefois, les hérons pêchent à l'appât : ils lancent un

morceau de nourriture ou une brindille dans l'eau, et se saisissent des poissons curieux qui s'approchent de la surface (voir la figure 8). Cette pêche à l'appât a été observée en divers endroits aux États-Unis et dans un parc japonais. Elle se manifeste spontanément, sans transmission aux autres oiseaux (excepté une fois au Japon), puis disparaît. Malgré son efficacité remarquable, la rareté de son utilisation rend peu probable sa programmation génétique. Le procédé est vraisemblablement inventé par certains hérons particulièrement imaginatifs.

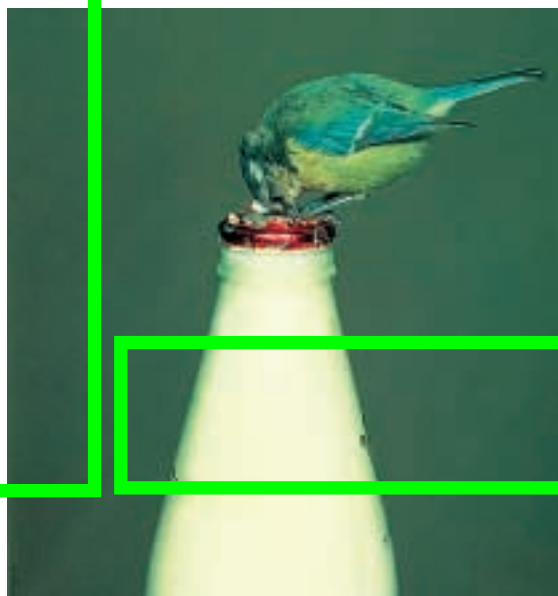
## Apprentissage et jeu

Bernd Heinrich, de l'Université du Vermont, a étudié plus précisément la naissance de nouvelles techniques de recherche de nourriture. Il a observé l'apprentissage de cinq corbeaux élevés en captivité et maintenus dans une volière. Dans la cage, des morceaux de viande étaient attachés à des bâtons par de longues ficelles, de sorte que les corbeaux ne puissent les attraper en se perchant sur un bâton. Les oiseaux ont tenté tout d'abord d'attraper la nourriture au vol, mais elle était trop bien attachée. Après plusieurs essais infructueux, ils se désintéressèrent de la nourriture.

Six heures après avoir été mis dans la cage, un corbeau a résolu le problème : il s'est perché sur un bâton, a tiré la ficelle avec son bec en la bloquant entre sa patte et le perchoir. En tirant ainsi, il a progressivement hissé la viande jusqu'au bâton.

Plusieurs jours après, un deuxième corbeau trouvait une solution un peu différente : au lieu de tirer la ficelle en tas sous ses pattes, il la tirait et la laissait pendre le long du bâton. D'autres corbeaux ont résolu le problème en enroulant la ficelle autour du bâton. Un seul oiseau n'a jamais récupéré la viande ; curieusement, c'est aussi le seul qui ne comprit jamais que la ficelle provoquait une rude secousse quand il essayait de prendre la viande en volant.

Les différentes techniques utilisées par les corbeaux montrent que les solutions sont individuelles et indépendantes de l'observation (voir *L'intelligence sociale des singes*, par Ber-



**4. DES MÉSANGES BLEUES** décapsulent des bouteilles de lait, en Angleterre, et mangent la crème formée à la surface. Ce comportement n'était pas aussi ingénieux qu'il apparaissait, car il s'apparente à l'habitude qu'ont ces oiseaux d'ôter naturellement l'écorce des arbres à la recherche de larves d'insectes.

J. Markham, Bruce Lenart Inc.

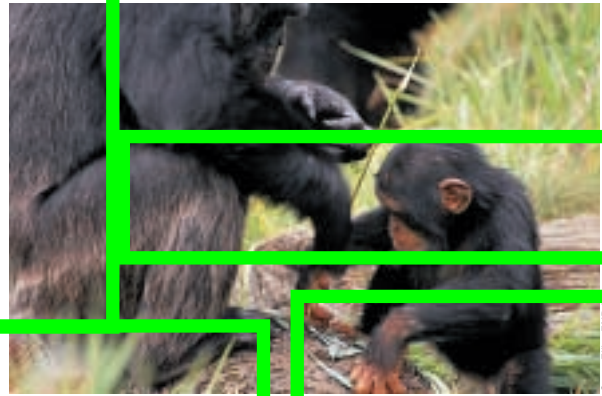
nard Thierry, page 58). En réalité, seul l'apprentissage des primates semble procéder d'observations. La majorité des acquisitions techniques observées sont aujourd'hui considérées comme des « progrès locaux » : les animaux peuvent localiser la nourriture en observant, mais la technique pour l'atteindre est personnelle. Chez les mésanges bleues, le comportement d'ouverture des bouteilles s'est généralisé, car les oiseaux apprennent les uns des autres où se trouve la crème, mais ils possèdent de naissance la technique qui permet d'ôter la capsule. Ce comportement est à rapprocher de celui des animaux domestiques.

Toutes les personnes qui ont des chats et des chiens supposent que ces animaux apprennent par imitation. Par exemple, un chat qui atteint une poignée de porte demande apparemment de l'aide pour sortir. Il reproduit apparemment le geste d'un humain qui ouvre une porte, mais les extensions verticales sont un comportement inné des félins, et la perspicacité du chat se limite peut-être à l'association de la porte avec la sortie. Cet exemple – il n'est pas unique – est une application habile, un progrès local, d'un comportement inné ou conditionné dans un environnement nouveau.

Les pieuvres sont peut-être, avec les primates, une exception à la théorie du progrès local. Lors d'un test réalisé en 1992, une pieuvre non entraînée observa à travers une vitre une pieuvre entraînée qui faisait son choix entre deux objets ne différant que par la couleur. Placée devant le même choix, la pieuvre

observatrice sélectionnait le même objet coloré que le « professeur ». Dans une autre expérience, plus difficile, la pieuvre observatrice regardait dans le comparant voisin une pieuvre entraînée qui ouvrait un conteneur à nourriture. Testée à son tour, l'« élève » ouvrait un conteneur analogue, de la même façon, beaucoup plus rapidement qu'une autre pieuvre non entraînée, sans professeur. Ces résultats sont en cours de vérification.

Le jeu consiste en actes apparemment sans raison, que les observateurs (de leur point de vue) qualifient de ludiques. Est-il commun aux animaux intelligents ? Les pieuvres projettent leur encroûtement vers des objets flottants ; les perroquets aiment la nage sur le dos et font des boules de neige. Les dauphins et les baleines font de grands bonds en l'air et recherchent le contact d'objets à la surface de l'eau. Les corbeaux se lancent des cailloux dans l'air – cela semble être un jeu de prise au vol – et font des glissades sur des talus enneigés. Les primates sont connus pour leurs facéties : ils se suspendent à une branche au-dessus d'une rivière, puis tombent dans l'eau en éclaboussant bruyamment leurs congénères ou bien se couvrent les yeux avec de

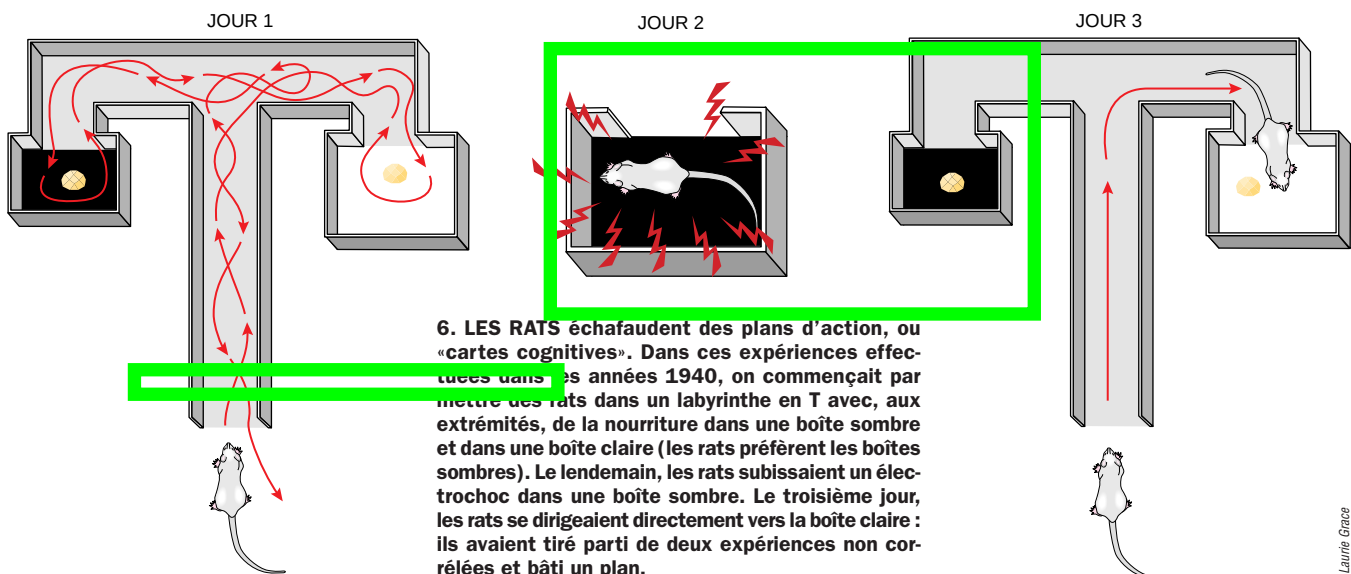


**5. LES CHIMPANZÉS « pêchent » les termites en insérant un rameau effeuillé dans une termitière ; ils dévorent ensuite les termites qui y sont accrochées. Cependant, comme dans le cas des mésanges bleues, ce comportement semble inné : seul le lieu le plus approprié à sa niche en œuvre est enseigné.**

grandes feuilles et jouent à l'aveugle dans les arbres. L'observateur le plus endurant se demande si, à défaut d'intelligence, ce n'est pas l'ennui qui pousse les animaux à introduire un peu d'animation dans leur vie.

## Les primates pensent

La reconnaissance et la modification des relations entre des objets et des individus sont des aspects importants de l'intelligence. Robert Seyfarth et Dorothy Cheney, de l'Université de Pennsylvanie, ont étudié ce que les animaux savent les uns des autres (voir *La pensée chez les singes*, par Robert Seyfarth et Dorothy Cheney, *Pour la Science*, février 1993). Les interactions de dominance avaient déjà montré qu'un singe vervet comprend la



position hiérarchique de n'importe quel autre au sein de la troupe. R. Seyfarth et D. Cheney ont déterminé ce que savaient des individus précis. Selon eux, les singes ne perdent pas de vue ni la mère de chaque enfant ni son statut social. Lorsque les chercheurs ont retransmis les appels de détresse d'un jeune vervet qu'ils avaient enregistré, la mère concernée regardait dans la direction du haut-parleur masqué, tandis que toutes les autres mères observaient la mère concernée et non le haut-parleur.

Les opérations logiques qui caractérisent le comportement spécifique des vervets pris individuellement sont essentiels à l'évaluation sociale du groupe. Frans de Waal, de l'Université d'Emory, a étudié l'exploitation des intrigues sociales au sein d'un groupe de chimpanzés capotifs. Sa description de la tromperie chez les chimpanzés rappelle celle de Jane Goodall dans la nature.

Dans le groupe de F. de Waal, le maître de la dissimulation était un mâle de rang inférieur nommé Dandy. Généralement, les mâles dominants, ou alphas, n'autorisent pas l'accouplement avec d'autres mâles. Dandy et une femelle se rencontraient derrière des rochers ou des buissons. La plupart du temps, la disparition simultanée d'une femelle et d'un mâle de rang inférieur éveille la méfiance des dominants, mais Dandy et sa partenaire choisissaient un abri qui ne cachait que la partie inférieure de leurs personnes. Ils masquaient leur accouplement en faisant semblant de chercher leur nourriture. La femelle ne poussait pas les cris aigus qui accompagnent d'habitude les copulations des chimpanzés.

Dandy créait aussi des diversions qu'il utilisait. Par exemple, il se précipita un jour à l'avant de son enclos et cria à l'adresse de personnes qui pas-

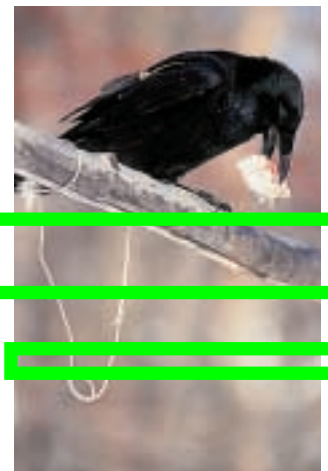
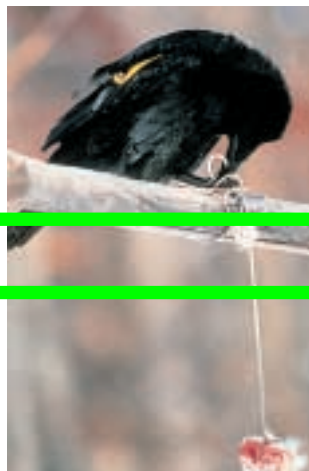
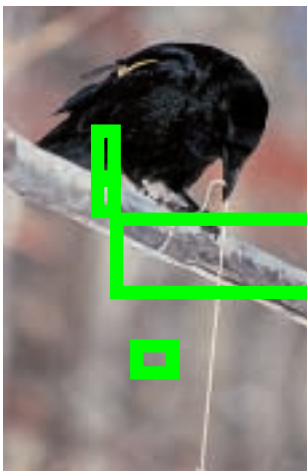
saient. Les dominants, curieux, accoururent pendant que Dandy profitait de la confusion pour s'esquiver et retrouver sa femelle. Une autre fois, Dandy aperçut un mâle de rang inférieur qui courtisait sa femelle attirée. Il ne se mit pas en colère – comme le font les mâles dominants –, mais alerta l'individu dominant le plus proche, qui a corrigé le coupable.

## Du côté des humains

Ces quelques exemples de l'utilisation habile de la logique sociale par Dandy impliquent une pensée, une planification et une ruse étonnantes. Elles s'ajoutent à de nombreuses observations de chimpanzés, en liberté ou en semi-liberté, qui démontrent l'existence d'une continuité d'évolution dans la capacité d'analyse et d'imagination. À l'extrémité, notre espèce, sans doute grâce au langage, élabore



Photographies de Robert F. Sisson. National Geographic Society



Berni Meirich

**8. DE NOUVELLES TECHNIQUES** de recherche de nourriture apparaissent parfois chez les animaux. Certains hérons verts lancent un appât ou une brindille dans l'eau et attirent ainsi des poissons à la

surface (en haut). Des corbeaux parviennent à attraper un morceau de viande qui se balance au bout d'une ficelle accrochée à un bâton (en bas). Chacun met au point une technique qui lui est propre.

des plans bien plus complexes que les opérations mentales imaginées rencontrées chez les animaux.

Le langage a longtemps tenu une place centrale dans les débats sur la pensée et la conscience, jusqu'à constituer pour certains philosophes la marque essentielle de l'intelligence humaine et l'outil indispensable à la pensée. La découverte de langages symboliques chez des animaux variés (des singes vervets aux abeilles) et de l'existence d'une planification sans langage ont ébranlé cette idée. Plus encore, la découverte chez l'homme du caractère inné de la reconnaissance des consonnes, du traitement de la langue et de la grammaire a largement contribué à diminuer le caractère exceptionnel de l'homme (voir *La perception de la parole par les nourrissons*, par Peter Tamas, *Pour la Science*, mars 1985, et *Les spécialisations du cerveau humain*, par Norman Geschwind, *Pour la Science*, novembre 1979).

Notre spécialisation génétique n'est peut-être pas beaucoup plus élaborée que celle qui donne aux chauves-souris l'aptitude à se diriger par écholocation. Cependant, le langage, source de raisonnement, de planification et de communication coordonnée, a propulsé notre espèce en une position de domination intellectuelle. Lorsque nous observons cette faune fascinante avec laquelle nous partageons la planète, nous devrions nous rappeler que, sans la capricieuse logique de l'évolution, notre espèce ne serait rien de plus qu'une variété de primates sociaux aux sons articulés.

James GOULD est professeur à l'Université de Princeton. Carol GRANT GOULD est écrivain scientifique.

Dorothy L. CHENEY et Robert M. SEYFARTH, *How Monkeys See the World : Inside the Mind of Another Species*, University of Chicago Press, 1990.

Donald R. GRIFFIN, *Animal Minds*, University of Chicago Press, 1992.

James L. GOULD and Carol GRANT GOULD, *The Animal Mind*, W.H. Freeman and Company, 1994.

Steven PINKER, *The Language Instinct*, Harper-Perennial, 1995.

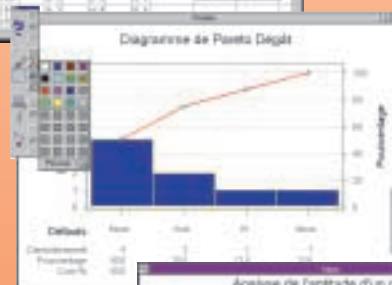
Frans B.M. de WAAL, *Chimpanzee Politics : Power and Sex among Apes*, Johns Hopkins University Press, 1998.

# MINITAB®

## Logiciel de Statistiques

*Analysez facilement vos données.*

Contactez nous:  
08 00 77 72 00  
E-Mail: [bienvenue@minitab.fr](mailto:bienvenue@minitab.fr)  
<http://www.minitab.com>



# MINITAB SARL®

L'analyse des données simplifiée

Minitab SARL, 1 Cité Paradis, 75010 Paris  
Tél: 01 55 33 12 36 Fax: 01 55 33 12 39

Toutes les noms produits et les marques déposées sont de leurs compagnies respectives  
© Minitab Inc., 1996 MINITAB est une marque déposée de Minitab Inc.

# L'intelligence sociale des singes

BERNARD THIERRY

*La vie sociale des primates requiert des facultés cognitives élaborées.*

**D**epuis 20 ans, les éthologistes et les psychologues étudient comment les singes déchiffrent les actes, les comportements et les signaux de communication de leurs congénères. Sont-ils capables d'attribuer à autrui des intentions, des pensées ou des désirs ?

De nombreuses expériences ont montré que certains signaux simiens expriment une émotion ou une motivation et possèdent également une signification symbolique. Chez plusieurs espèces, le cri d'alarme qui désigne un prédateur terrestre est différent de celui qui annonce un oiseau de proie. Dans le premier cas, les singes fuient dans les arbres en regardant vers le haut ; dans le second, ils se réfugient dans les buissons. En diffusant à ces singes verts des enregistrements de leurs propres vocalisations, Dorothy Cheney et Robert Seyfarth, de l'Université de Pennsylvanie, ont montré que les animaux réagissent selon la signification du signal. Verena Dasser, de l'Université de Zurich, a testé la capacité des macaques de Java à reconnaître les relations sociales en les plaçant devant des photographies des différents membres de leur groupe. Ils ont réussi à discriminer les individus unis par un lien de parenté et à distinguer les animaux dominés et les animaux dominants. Ces résultats démontrent que les macaques sont capables de classifier des relations en fonction de propriétés abstraites et expliquent certains comportements propres aux primates, tels que la formation de coalitions, les interventions pacifiques dans les conflits ou les réconciliations.

Cependant, la plupart des espèces de singes sont apparemment incapables de reconnaître des intentions. Les macaques échouent chaque fois qu'on leur demande de prêter un état mental à un congénère. Par exemple, une mère ne comprend pas qu'elle doit prévenir son jeune d'un danger qu'il ne perçoit pas, mais dont elle a

été avertie. Un macaque ne distingue pas un être humain qui sait où se trouve une récompense d'un autre être humain non informé. Deux macaques sont incapables de coordonner leurs efforts pour soulever une grosse pierre. En revanche, les résultats de David Premack, de l'Université de Pennsylvanie, et de Daniel Povinelli, de l'Université de Louisiane, indiquent que des chimpanzés soumis à des tâches expérimentales similaires attribuent des pensées à leurs congénères. Certains savent mentir en designant un objet de la main, coopérer, discerner le savoir ou l'ignorance d'un être humain, ou comprendre ses objectifs.

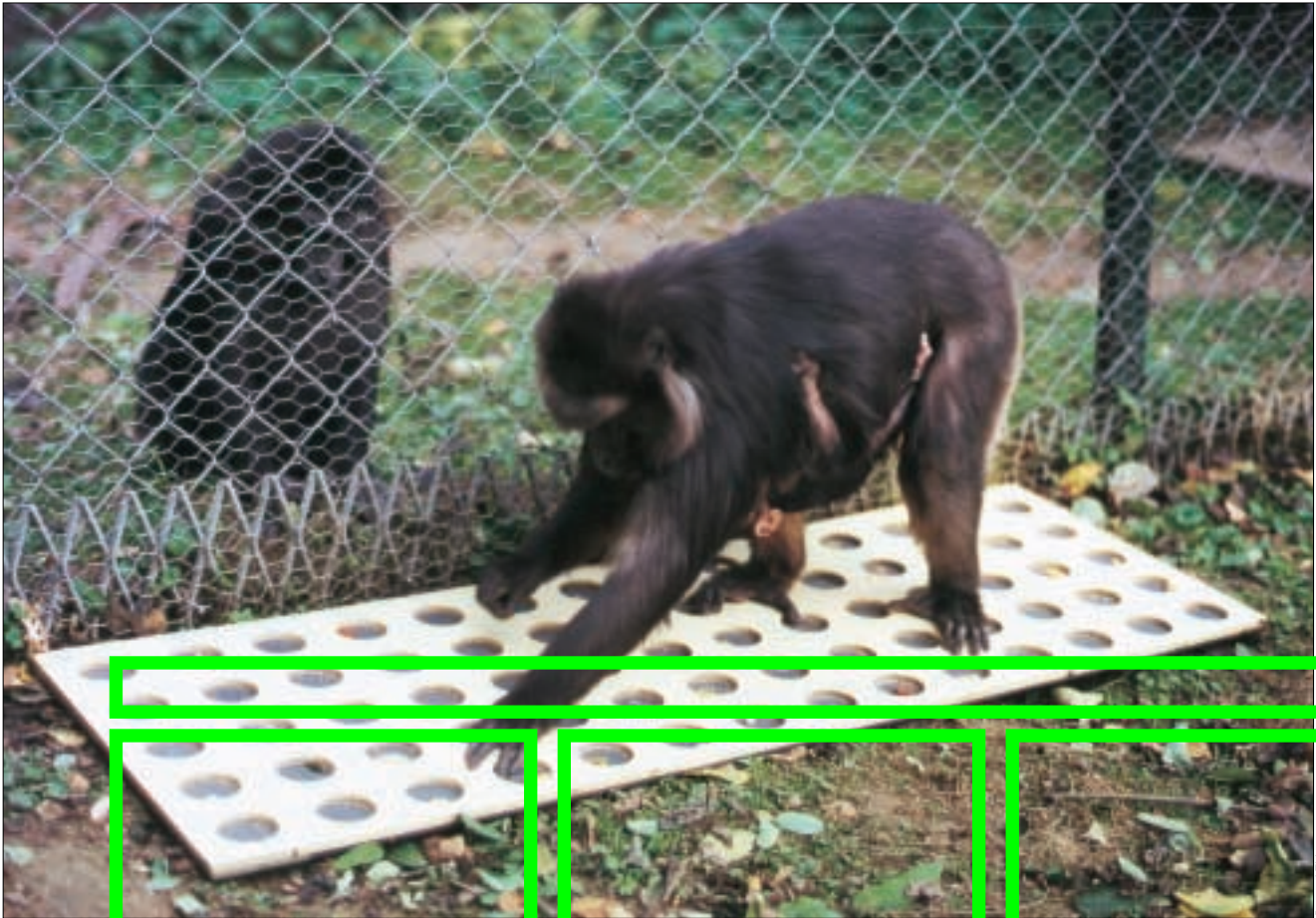
## Une théorie de l'esprit

La preuve définitive de l'existence d'une « théorie de l'esprit » chez les singes anthropoïdes reste difficile à obtenir. Cependant, ces animaux peuvent imiter leurs congénères ou se reconnaître dans un miroir, alors que les autres primates en sont incapables. Selon D. Premack, l'intelligence permet de discerner les causes dans l'univers physique et de déterminer les intentions d'autrui dans l'univers social. Un chimpanzé trouve par inférence une solution à un problème nouveau, tandis qu'un singe capucin ne découvre l'usage d'un outil que par tâtonnements, sans comprendre le lien entre la cause et l'effet. Un singe vert n'est pas alarmé lorsqu'il rencontre l'empreinte d'un prédateur dans la poussière. Un macaque qui fait tomber une branche sur un congénère ne sera jamais puni, alors que celui qui bouscule un individu dominant sera aussitôt menacé.

Les travaux d'Elisabetta Visalberghi, de l'Institut de psychologie de Rome, et de Dorothy Fragaszy, de l'Université de Georgie, ont remis en question les mécanismes de propagation des comportements acquis chez les primates. On a longtemps admis que la

tradition du lavage des patates douces chez les macaques japonais se transmettait selon un apprentissage par observation qui n'était pas précisé. Or, les résultats expérimentaux démontrent que l'apprentissage social s'effectue de manière indirecte, car les macaques sont incapables de reproduire les gestes de leurs congénères. En suivant ou en observant un partenaire, un individu remarque un élément de l'environnement ou établit une association entre deux éléments, mais c'est par lui-même qu'il retrouve les gestes et l'intention (voir *Le raisonnement des animaux*, par James Gould et Carol Grant Gould, page 50). Dire qu'un macaque regarde un congénère laver un aliment est un abus de langage : le verbe « laver » indique implicitement qu'un macaque est capable de reconnaître les buts poursuivis par un congénère, alors qu'il ne perçoit probablement qu'une activité sans fonction.

En étudiant des macaques de Tonkean élevés en semi-liberté, Maud Druhier et Ala Ducoing, du Centre de primatologie de Strasbourg, ont montré que l'efficacité de la transmission d'informations dépend de la nature de l'information en jeu. Depuis 1996, un nouveau comportement s'est transmis parmi les jeunes mâles du groupe : ils dressent des branches contre la clôture du parc pour y monter. Des expériences ont démontré que ces animaux n'apprennent pas cette utilisation d'outil même quand ils voient à plusieurs reprises un compagnon démonstrateur lever un bâton pour atteindre une banane. En revanche, dans plusieurs expériences témoins, sans démonstrateur, si le bâton est placé contre le mur, les singes sont capables d'effectuer une « translation pour l'emporter sous le fruit. Une fois l'objectif découvert, ils réussissent dans les tests ultérieurs où ils doivent ramasser le bâton à terre. L'importance de l'apprentissage individuel a été confirmée dans une seconde série d'expériences.



Un macaque de Tonkean en situation de recherche alimentaire est observé par un congénère (derrière le grillage). Parfois, les sujets subordonnés dissimulent l'information dont ils disposent.

De jeunes sujets observaient une femelle ingérer une nourriture qu'ils ne connaissaient pas. Pour approcher les conditions naturelles, une trentaine d'aliments étaient proposés aux animaux. La majorité d'entre eux étaient comestibles, mais certains étaient enduits d'un produit amer, et la femelle avait appris à éviter ces derniers. Lorsqu'ils eurent accès à la nourriture, les jeunes consommèrent d'abord les aliments non enduits et finirent par ceux qui étaient amers : c'est la preuve qu'ils avaient appris socialement, mais qu'ils préféraient tout de même vérifier. La prépondérance de l'apprentissage individuel sur l'apprentissage social explique que les traditions restent un phénomène marginal chez de nombreux primates.

Dans certaines cas, la transmission d'informations est immédiate. Quand des macaques de Tonkean sont libérés dans un parc où des fruits sont dispersés, seuls ou en petits groupes de deux, trois ou quatre, la découverte de la nourriture est d'autant plus

rapide que les sujets sont nombreux. Les individus alternent entre les tactiques d'information individuelle et sociale : tout en cherchant les fruits pour leur propre compte, ils restent attentifs aux activités de leur compagnons, à leurs déplacements et à leurs résultats. Des travaux récents montrent que les singes suivent le regard de leurs partenaires sans leur prêter attention. L'orientation ou le mouvement du regard, de la tête et du corps, ainsi que la direction ou la vitesse du déplacement, sont autant d'indices susceptibles d'attirer l'attention des congénères sur une partie de l'environnement.

Les travaux précédents s'attachent aux facultés et aux actes individuels, mais les activités cognitives des individus s'additionnent à l'échelle du groupe. L'information circule, la mémoire de chacun est mise à contribution, les comportements individuels s'additionnent et aboutissent à des décisions collectives. Sur le plan écologique, le groupe social est une unité qui se

meut de façon autonome et effectue des choix. Chez les insectes sociaux, une colonie exploite son milieu et s'adapte à ses variations. Elle dispose d'une représentation de l'ensemble de ses ressources, alors que chacune des ouvrières qui la compose ne connaît qu'une portion limitée du domaine. Aujourd'hui, de nombreuses recherches considèrent les cultures humaines en tant que systèmes de cognition distribuée en l'absence d'une instance centrale, la connaissance est répartie entre les différents membres de la société. Pour comprendre comment les systèmes d'intelligence collective ont pu se mettre en place au cours de l'évolution, nous devons poursuivre l'étude des mécanismes d'information et de décision par lesquels les organisations sociales des animaux existent.

Bernard THIERRY est directeur de recherches au Laboratoire d'éthologie et neurobiologie de l'Université de Strasbourg.



# Conversation avec un perroquet

IRENE PEPPERBERG

*Réputés excellents imitateurs, les perroquets comprennent aussi ce qu'ils disent. Ils rivalisent ainsi avec les grands singes.*

Chaque soir, lorsque nous quittons le laboratoire, Alex nous dit : «Bon soir, je vais dîner. À demain.» Ces quelques mots seraient sans importance si Alex n'était pas un perroquet gris âgé de 22 ans et si deux décennies de travail avec lui ne nous avaient montré qu'il comprend la parole humaine. Si la communication est révélatrice de l'intelligence animale, alors Alex a démontré que les perroquets sont aussi intelligents que les grands singes ou que les dauphins.

Lorsque nous avons commencé nos recherches, la capacité cognitive des perroquets était mal connue. Les perroquets qui avaient été étudiés ne faisaient que répéter ce qui leur avait été enseigné. Alors que les chimpanzés de laboratoire communiquent avec l'homme par le langage des signes, par ordinateur ou par des tableaux spéciaux, les perroquets parlent à l'aide de nos mots.

Selon Nicholas Humphrey, de l'Université de Cambridge, les primates ont acquis des aptitudes cognitives et de communication avancées parce qu'ils vivent au sein de groupes sociaux complexes. Nous avons supposé que cette explication était également valable pour les perroquets gris (*Psittacus erithacus*). Ces animaux vivent dans les forêts denses d'Afrique équatoriale, où la communication vocale joue un rôle important. Les oiseaux adultes utilisent des sifflements et des appels que les jeunes apprennent en écoutant.

En laboratoire, des perroquets se sont montrés capables de tâches symboliques et conceptuelles, souvent associées à des aptitudes cognitives et de communication complexes. Par exemple, dans les années 1940 et 1950, Otto Koehler, de l'Institut zoologique de Königsberg, et Paul Löglér, de l'Université de Fribourg, ont découvert que des perroquets qui observaient une série de huit flashes

lumineux savaient ensuite sélectionner des ensembles à huit éléments. Ainsi les perroquets comprennent la représentation d'une quantité. Cette faculté est un signe d'intelligence.

Cependant d'autres zoologistes, tel Orville Mowrer, de l'Université Harvard, croyaient avoir montré l'incapacité des oiseaux à associer un vocable à un objet donné, c'est-à-dire l'absence d'une forme de communication référentielle. Un des perroquets d'O. Mowrer apprit à articuler «Bonjour» à l'arrivée de son dresseur, qui le récompensait par de la nourriture. Toutefois, le même oiseau en vint à dire «Bonjour» n'importe quand, de sorte qu'il ne recevait pas de récompense, il finit par ne plus dire «Bonjour» du tout. D'autres perroquets ont répété des phrases, mais la plupart de ces oiseaux n'ont rien appris.

Puisque les perroquets communiquent naturellement, nous avons supposé que les échecs répétés des tentatives d'apprentissage d'un langage référentiel étaient dus à des techniques inadéquates, plutôt qu'à une incapacité. Quelle que soit la raison, les perroquets restaient insensibles aux techniques de conditionnement classiques utilisées chez d'autres espèces. Puisqu'un nombreux chimpanzés qui, après apprentissage, communiquent avec l'homme n'ont pas été conditionnés selon des méthodes classiques, nous avons supposé que les perroquets montraient mieux leurs aptitudes par un dressage approprié. Nous avons mis au point une telle méthode.

## Alex répond

La technique employée met le perroquet en présence de deux êtres humains qui se disent mutuellement le nom des objets qu'ils ont en main. Ce protocole dit du modèle et du rival (M/R) est fondé sur les travaux effec-

tués par Albert Bandura, de l'Université de Stanford. Au début des années 1960, celui-ci a montré que les enfants apprenaient efficacement quand on leur montrait l'exécution de tâches difficiles avant de leur proposer de mettre leurs observations en pratique. À l'Université de Fribourg, Dittmar Todt enseigna alors à des perroquets à reproduire la parole humaine par une technique similaire.

Au cours d'une séance d'apprentissage, D. Todt montrait à ses perroquets un dresseur et un assistant. Le dresseur prenait un objet et posait à son assistant une question qui s'y rapportait, par exemple : «Quelle est sa couleur ?» Quand l'assistant répondait correctement, le dresseur le félicitait et lui permettait de jouer avec l'objet en guise de récompense. Quand la réponse était incorrecte, le dresseur réprimandait l'assistant, mettait temporairement l'objet hors de sa vue, avant de recommencer. L'assistant jouait ainsi le rôle de modèle pour le perroquet et d'émule, de rival, pour le dresseur.

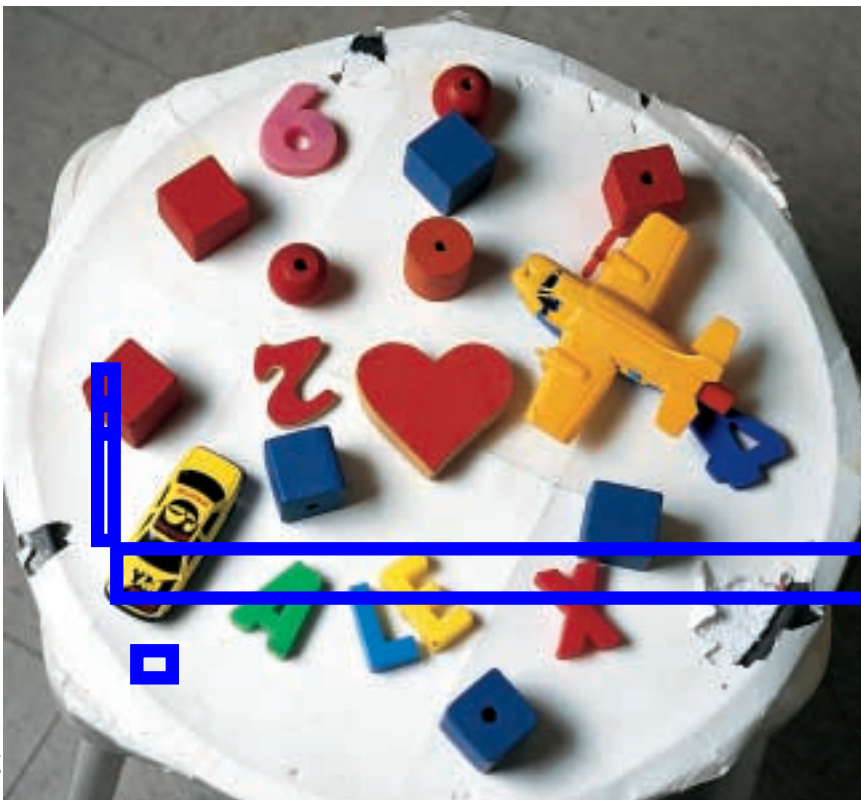
Dans les expériences de D. Todt, les rôles du dresseur et de l'assistant n'étaient jamais inversés, et les oiseaux ne répondaient qu'à la personne qui posait les questions. Avec Alex, en revanche, nous avons répété les séances en intervertissant les rôles du dresseur et de son assistant. Alex percevait une communication dans les deux sens et il a appris qu'une expression n'est pas spécifique d'un individu. Contrairement à ce que l'on nous oppose souvent, ses réponses ne sont pas suscitées par celui qui lui parle. Comment un inconnu pourrait-il savoir qu'Alex associe l'expression «noix en liège» à une amande, c'est-à-dire à la récompense attendue ?

Nous avons complété le système M/R de base par des méthodes qui améliorent l'apprentissage d'Alex.





1. ALEX IDENTIFIE des objets par leur forme, leur couleur, leur matière ou leur nombre.



2. DIFFÉRENTES VARIÉTÉS D'OBJETS sont présentées à Alex lors des tests : volumes, lettres, chiffres et petits jouets (voir la figure 3).

Lorsqu'il prononce un nouveau mot – « papier », par exemple –, nous formulons devant lui des phrases complètes qui contiennent ce nouveau mot : « Ceci est du papier » ou « Tu mâches du papier ». Le mot est ainsi répété souvent et avec insistance, mais pas de façon isolée. Cette technique a deux avantages : le mot nouveau est utilisé de la même façon que dans une conversation normale, et Alex produit un vocable sans associer une imitation des paroles de son dresseur à une récompense. Les parents et les instituteurs utilisent fréquemment ce genre de répétition vocale et de présentation physique des objets lorsqu'ils enseignent des mots à des jeunes enfants.

Nous avons également utilisé une autre technique : la cartographie référentielle, qui attribue un sens aux vocalisations spontanées d'Alex. Par exemple, après l'acquisition d'un mot, Alex en prononce d'autres qui dérivent du premier par une simple modification d'un son ou d'une syllabe. Il ne prononce probablement pas intentionnellement ces nouveaux mots, mais nous exploitons cette aptitude pour lui enseigner de nouvelles notions.

Tous les protocoles ont utilisé des récompenses qui renforçaient l'apprentissage d'un mot. Ainsi, quand Alex identifie correctement un morceau de bois, il reçoit un bout de bois à mâcher. Ce système garantit l'association du mot ou du concept avec la tâche ou avec l'objet correspondants (en revanche, dans les programmes d'O. Mowrer, chaque réponse correcte était récompensée par un aliment, par exemple une noix, sans rapport avec le mot concerné ; nous pensons que de telles récompenses retardent l'apprentissage de l'animal qui confond l'élément de nourriture avec le concept à apprendre).

Tous les objets n'ont pas le même attrait pour un perroquet. Pour éviter qu'Alex ne refuse de répondre aux questions qui concernent les objets immangeables, nous lui permettons d'échanger la récompense une fois qu'il a donné la bonne réponse à la question posée. Quand Alex identifie correctement une clé, il reçoit la noix convoitée en la demandant directement par la phrase simple : « Je veux une noix. » Ce protocole conserve la référence à une récompense.

## Différences et similitudes

Alex est arrivé dans notre laboratoire âgé de 13 mois. Chez une espèce dont la longévité atteint 60 ans en captivité, cet âge correspond au stade de bébé. Lors de son dressage, Alex a maîtrisé des tâches que l'on croyait au-delà des capacités de toute espèce autre que l'homme et certains primates. Aujourd'hui, il reproduit et comprend des mots décrivant 50 objets et aliments différents, mais il classe aussi des objets par couleur (rose, bleu, vert, jaune, orange, gris ou violet), par matière (bois, bois, papier, liège, craie, verre, pierre), par forme (objets ayant de deux à six angles, un objet ayant la forme d'un ballon de football). En combinant les mots désignant les attributs de

couleur, de matière ou de forme, Alex identifie, réclame et décrit plus de 100 objets différents avec une réussite d'environ 80 pour cent.

Alex comprend que les couleurs et les formes représentent divers types de catégories et que les objets peuvent être classés en fonction de celles-ci ; il comprend aussi qu'un même objet a plusieurs propriétés simultanément (un triangle vert, par exemple, est vert et possède trois angles). En présence d'un tel objet, Alex caractérise correctement chaque attribut en réponse aux questions : «Quelle couleur?» ou «Quelle forme?». Le nombre d'objets de la base de classification d'Alex modifie 80 fois au cent sa base de classification et répond correctement. Selon Keith Hayes et Catherine Nissen, du Laboratoire de biologie des primates de Yerkes, la

capacité des chimpanzés à reclasser des objets indique l'existence d'une «faculté d'abstraction». Nous pensons que cette théorie est aussi valable pour Alex.

Alex a également appris les notions abstraites de «similaire» et de «différent». Lorsqu'on lui montre deux objets, Alex distingue quelles qualités sont similaires ou différentes. Quand aucune propriété des objets n'est identique, il répond : «Aucun.» Sa réponse est juste même quand il n'a jamais rencontré les couleurs, les formes ou les matières des objets.

La proportion de réponses exactes d'Alex est supérieure à la probabilité de réponses faites au hasard. On lui a présenté deux triangles en bois, l'un vert, l'autre bleu, et on lui a demandé : «Qu'est-ce qui est similaire?» Si Alex avait répondu en se fondant sur ses

### DIALOGUE 1

On montre à Alex :

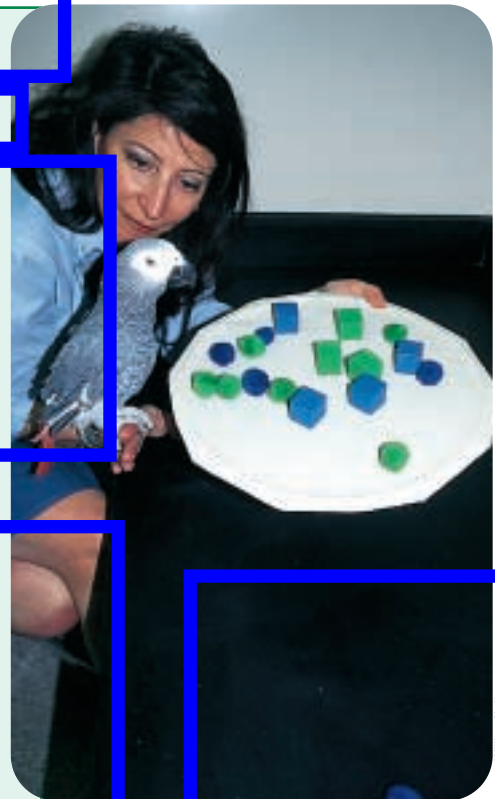
Dresseur : Combien de clefs?  
 Alex : Deux.  
 Irene (dos au plateau, s'adressant au dresseur) : Y a-t-il des lames de bois?  
 Dresseur (à Irene) : Oui.  
 Irene : Essaie ça.  
 Dresseur : D'accord, dis-moi, combien de lames de bois?  
 Alex : Deux.  
 Dresseur : Oui.

**Alex reçoit une noix en bois, qu'il mâche dans son coin. Puis on replace la lame et l'on présente à nouveau le plateau.**

Dresseur : Maintenant, combien de clefs?  
 Alex : Cinq.  
 Dresseur : C'est ça, clefs. Combien?  
 Alex : Deux lames de bois.  
 Dresseur : Il y a deux lames de bois, mais dis-moi, combien de clefs?  
 Alex : Cinq.  
 Dresseur : D'accord, Alex, c'est le nombre d'objets ; dis-moi, combien de clefs?  
 Alex : Trois.  
 Irene : Trois?  
 Dresseur : C'est bien ! Tiens, prends une clef.

### DIALOGUE 2

Irene : Alex, voici ton plateau. Tu peux me dire combien il y a d'objets bleus?  
 Alex : Un objet.  
 Irene : C'est ça, objet... Combien d'objets bleus?  
 Alex : Cinq.  
 Irene : C'est ça, tu veux cet objet.  
 Alex : Veux une noix.  
 Irene : D'accord, voilà une noix (Alex mange sa noix).  
 Maintenant, peux-tu me dire combien il y a de pelotes de laine verte?  
 Alex : Siss.  
 Irène : C'est bien !



William Nulfoz

**3. LE DIALOGUE ci-contre indique qu'Alex est capable de compter des objets disposés sur un plateau. Le dialogue 1, enregistré en 1986, montre qu'Alex peut distinguer cinq objets de deux types différents (ici, des clefs et des lames de bois). Le dialogue 2, enregistré en 1997, montre qu'Alex a progressé : il est capable de compter les objets bleus et les pelotes de laine verte sans être distrait par les autres objets présentés sur le même plateau.**

entraînements antérieurs, il aurait indiqué un qualificatif se rapportant à l'attribut qui diffère («couleur»), plutôt que par l'une des deux réponses correctes («forme» ou «matière»).

La faculté de compréhension d'Alex est comparable à celle des dauphins et des chimpanzés. Quand on lui montre un plateau contenant sept objets différents, il répond avec exactitude à des questions comme «De quelle couleur est cet objet X?» ou «Quel objet est de couleur Y et de forme Z?». Une réponse correcte indique qu'Alex comprend tous les éléments de la question et qu'il les utilise dans sa recherche d'objets répondant aux

critères demandés. Là encore, l'exactitude de ses réponses est supérieure à 80 pour cent.

Nous avons utilisé un test similaire pour évaluer les capacités de numérisation d'Alex. Il décrit aujourd'hui des nombres d'objets, même quand ceux-ci sont de nature inconnue ou quand les ensembles présentes sont hétérogènes, en utilisant uniquement les termes «deux», «trois», «quatre», «cinq» et «six». Lorsque nous présentons à Alex un ensemble composé de deux à six objets (par exemple, une série de clés et de joues rouges d'oiseaux), il répond correctement à 83,3 pour cent des questions concernant le nombre

d'objets d'une couleur ou d'une forme donnée, telles que «Combien y a-t-il de clés bleues?». À l'Université de l'Ontario, Marc Trick et Zenon Pylyshyn ont montré que des adultes humains à qui l'on donne un temps très court pour quantifier un ensemble similaire d'objets répondent convenablement dans les mêmes proportions.

Alex comprend aussi au moins une notion relative : la taille. Quand on lui demande de deux objets lequel est le plus grand ou le plus petit, il nomme la couleur ou la matière de l'objet concerné. Quand les objets sont de taille identique, il répond : «Aucun.» Enfin, quand la réaction d'un dresseur ne correspond pas à ses attentes, Alex dit : «Non» et répète sa demande initiale.

L'ensemble de ces résultats indique qu'Alex n'imité pas simplement ses dresseurs, mais qu'il a acquis une compréhension de certains composants de la parole humaine.

Nos prochains travaux concerneront l'acquisition de relations spatiales relatives telles que «au-dessus» et «au-dessous». Nous introduirons ici une difficulté supplémentaire, car la position d'un objet par rapport à celle d'un autre objet peut varier.

## Les secrets du dressage

Pourquoi notre technique de dressage est-elle si efficace? Pour le savoir, nous avons dressé trois autres jeunes perroquets gris par trois méthodes différentes : Alo, Kyaaro et Griffin. Aucune des techniques utilisées n'a fonctionné aussi bien que le système Modèle/Rival.

Nous avons notamment utilisé des enregistrements sonores et vidéo des séances de dressage d'Alex. Les trois perroquets imitaient occasionnellement les mots présentés dans les séances vidéo, mais aucun n'a appris de langage référentiel dans ces situations.

En revanche, le dressage de ces trois oiseaux a donné de bien meilleurs résultats quand nous sommes revenus au protocole M/R standard. Par exemple, au cours des deux dernières années, Griffin a appris les mots désignant sept objets et il commence à connaître leur couleur. Ces études des méthodes de dressage ont montré que le choix du modèle, les interactions sociales de l'oiseau et du dresseur, ainsi que l'environnement,

| SÉRIE D'OBJETS                                                                      | OBJETS CIBLES | RÉPONSE D'ALEX | CORRECTION                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|-------------------------------------|
|    | CLEFS         | BOIS           | <input type="checkbox"/>            |
|    | BOIS          | 2              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | PIERRES       | 2              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | CLEFS         | 3              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | BOIS          | 2              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | CLOUS         | 2              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | LAINE JAUNE   | 4              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | BOUCHONS      | 2              | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | PIERRES       | PIERRE         | <input type="checkbox"/>            |
|  | BOIS          | LAINE          | <input type="checkbox"/>            |

4. L'EXACTITUDE D'ALEX dans l'identification d'objets cibles était, en 1986, de 70 pour cent (sept bonnes réponses sur dix). Aujourd'hui, Alex atteint un score de 80 pour cent.



William Huria

**5. DANS LE PROTOCOLE MODÈLE/RIVAL, Alex regarde et écoute un dresseur demander un objet à une autre personne. Quand cette dernière répond correctement, elle gagne une récompense : l'objet concerné par la question. De cette manière, la personne qui apprend représente un modèle pour Alex et un rival pour le dresseur. Les deux personnes changent de rôle fréquemment.**

sont décisifs pour l'acquisition d'un bon niveau de communication avec l'homme.

La technique M/R et quelques variantes sont aussi utilisées avec d'autres espèces animales. Kanzi, le bonobo élevé par Sue Savage-Rumbaugh et ses collègues de l'Université de Géorgie, est même parvenu à communiquer avec l'homme à l'aide de l'ordinateur en assistant à l'apprentissage par conditionnement de sa mère. Des chimpanzés dressés selon des protocoles similaires à ceux employés par O. Mowrer ont montré des aptitudes de communication moins performantes que ceux élevés par des méthodes proches de nos techniques. Même avec des individus humains, ces techniques sont utiles. À Monterey, en Californie, Diane Sherman développe les aptitudes d'enfants retardés à l'aide de la technique M/R de l'enseignement du langage.

Alex obtient des résultats aux tests d'intelligence équivalents à ceux des grands singes et des dauphins, bien

que la structure du cerveau du perroquet diffère de celle des mammifères. Contrairement aux primates, les perroquets ont un cortex cérébral réduit, comme cette zone cérébrale constitue le siège du traitement cognitif chez les primates, ce traitement est probablement assuré par d'autres zones chez les perroquets.

Le cerveau du perroquet diffère également de celui des oiseaux chanteurs, réputés pour leurs performances vocales. Pourtant le «vocabulaire» relatif à Alex est plus étendu que le répertoire des oiseaux chanteurs. En outre, il a appris à communiquer avec des membres d'une espèce différente :

des hommes. À chaque nouvelle parole apprise, Alex confirme que les

perroquets sont capables d'effectuer des tâches cognitives complexes. Ses aptitudes reflètent les capacités innées des perroquets et indiquent que des formes avancées d'intelligence animale n'ont peut-être pas encore été découvertes.

Irene PEPPERBERG est professeur adjoint à l'Université d'Arizona.

Irene M. PEPPERBERG, *Cognition in an African Gray Parrot (Psittacus erithacus): Further Evidence for Comprehension of Categories and Labels*, in *Journal of Comparative Psychology*, vol. 104, n° 1, pp. 41-52, mars 1990.

I. PEPPERBERG, *Numerical Competence in an African Gray Parrot (Psittacus erithacus)*, in *Journal of Comparative Psychology*, vol. 108, n° 1, pp. 36-44, mars 1994.

*Social Influences on Vocal Development*, sous la direction de Charles T. Snowdon et Martine Hausberger, Cambridge University Press, 1997.



# Culture et intelligence technique chez les hominoïdes

FRÉDÉRIC JOULIAN

*Certaines capacités longtemps considérées comme spécifiques de l'homme, ne sont pas sonapanage : les primates se servent d'outils et ont des représentations collectives de leurs techniques.*

On dit de l'espèce humaine qu'elle est, aujourd'hui, celle dont les capacités intellectuelles sont les plus développées. Quand ces comportements « intelligents », sociaux, techniques ou culturels sont-ils apparus ? Ont-ils marqué une rupture avec les comportements des autres primates ? Les réponses à ces questions varient selon que l'on est paléanthropologue, préhistorien, spécialiste de psychologie animale ou d'anthropologie sociale, et selon le type de données mises en œuvre. Les paléontologues et les préhistoriens associent l'origine de cette évolution de l'intelligence aux facteurs les plus divers : l'apparition de la bipédie, l'extension du cortex cérébral, les changements dans les modes de subsistance, la libération de la main, la fabrication ou l'utilisation d'outils, ou encore l'apparition du langage.

Dans la plupart des cas, semble apparaître un seuil, une discontinuité qui distingue l'« humain » du « non-humain ». Une nouvelle catégorie a même été reconnue au cours des dix dernières années : celle de « primates non-humains » – comme si les primates ne pouvaient plus être définis que par rapport à l'homme –, qui reflète clairement le rôle des singes dans notre compréhension des hommes.

Nous allons aborder ici l'intelligence, la technique et la culture, longtemps considérées comme des « marqueurs » uniques d'humanité. Nous nous placerons dans une perspective évolutive, autrement dit qui prend en compte ces phénomènes sur plusieurs millions d'années et à travers différents genres ou espèces : les Hominiidés, les Australopithécidés (la famille des Aus-

tralopithécidés) et les Panidés (la famille des chimpanzés et des gorilles). Nous ne nous limiterons pas à quelques dizaines, voire à quelques milliers d'années, échelles temporelles sur lesquelles on travaille généralement lorsqu'il s'agit d'évoquer des changements techniques et culturels.

## Une frontière à redessiner

Il y a une quinzaine d'années encore, on qualifiait le quaternaire (commençant il y a 1,8 million d'années) d'ère « anthropique », celle de la naissance de l'homme. Aujourd'hui, nous pensons l'évolution biologique des espèces hominiennes dans un cadre géologique plus vaste, mais la prise en compte d'autres réalités – comportementales, sociales ou culturelles – parvient plus difficilement à être inscrite dans la continuité, à se lire autrement qu'en termes de rupture.

Pourtant, l'intelligence, les activités mentales sont, au même titre que la morphologie de la main, celle de la boîte crânienne ou celle des outils de pierre, les produits d'une histoire. La différence réside plutôt dans la nature même des objets sur lesquels on travaille : contrairement aux données lithiques ou aux ossements, l'intelligence ne laisse pas de traces directes. Dès lors, comment peut-on rendre compte de cette évolution ? Comment procéder ?

Deux grandes voies sont généralement empruntées, la première se fonde sur l'analyse des données anciennes, la seconde s'appuie sur les données actuelles de l'éthologie ou de la psychologie des primates. Ainsi, les préhistoriens ou les paléanthropologues travaillent-ils sur les techniques de fabri-

cation des outillages lithiques, et ils en déduisent des compétences gestuelles et mentales des artisans ; ou encore ils associent des capacités mentales à l'anatomie des structures cérébrales qu'ils étudient. Au contraire, les éthologues tentent de décrire, voire de modéliser, les capacités cognitives de nos ancêtres. Toutefois, la comparaison de ces deux types d'approches est illusoire, car, pour imaginer les hommes anciens et leurs capacités intellectuelles, il nous faut animer des objets lacunaires et nous référer à des modèles, vivants ou abstraits, de comportements.

Une troisième voie – celle que je préfère – tente de faire la synthèse entre ces deux approches. C'est la plus délicate à mettre en œuvre, car elle impose de concilier des approches antithétiques, tant dans leurs buts que dans leurs pratiques scientifiques : la paléoanthropologie qui procède par induction, l'éthologie qui observe directement les comportements, ou la psychologie qui expérimente. Comment rendre compatibles données anciennes et données actuelles, structures anatomiques, artefacts, comportements ou actes de communication ? Il n'y a pas de réponse générale, de théorie unifiée des comportements individuels, sociaux ou culturels, et tous les grands modèles d'hominisation ont fait long feu. Ils ont été utiles, ont nourri la recherche, ne serait-ce que parce qu'ils ont été contestés. C'est ainsi qu'a été découverte d'un Australopithèque, Abel, au Tchad, a pu mettre en question le modèle dit de l'*East side story*, qui expliquait l'hominisation par des changements écologiques. Toutefois, ces explications se caractérisent par leur

absence de lien directs et vérifiables avec les phénomènes non seulement biologiques, mais aussi sociaux et cognitifs qui ont mené à l'homme moderne.

Sommes-nous donc totalement dépourvus face à l'étude des comportements très anciens ou des mécanismes évolutifs ? Peut-être pas, et plusieurs petites fenêtres nous permettent aujourd'hui d'aborder les questions de technique, de culture et d'intelligence d'une façon ni trop générale, ni trop réductrice.

## Des modèles en archéologie

À quoi ressemblaient les premiers hominidés ? À quoi pensaient-ils ? Grâce aux restes fossiles, on peut imaginer leur morphologie, leur mode de locomotion, leurs postures et leur alimentation. Les vestiges archéologiques, les interactions des hominidés avec leur environnement et leurs productions matérielles éclaireront leurs comportements techniques, sociaux, alimentaires ou culturels.

Les archéologues comparent les vestiges archéologiques avec des objets que nous connaissons, et ils en déduisent les comportements des individus qui les ont produits. Dans les années 1960, période de renouveau des découvertes en paléanthropologie, les hommes du Paléolithique étaient considérés comme des chasseurs-cueilleurs. Il ne faisait guère de doute, à cette époque, que les sites anciens reflétaient des comportements de chasse, parfois très organisés.

Les populations actuelles de chasseurs-cueilleurs fournissent des ana-

logies « toutes naturelles » : c'est ainsi que l'on se réfère aux populations Okobambi ou Hadzas, qui vivent dans la savane, en Afrique (un environnement proche de celui des Australopithecines, il y a près de deux millions d'années) pour interpréter certaines structures archéologiques (voir la figure 1). Après avoir cru que la hutte okobambi pouvait être un modèle pour l'habitat australopithecine, on a rejeté cette hypothèse parce que les données géologiques et archéologiques ne coïncidaient pas. Toutefois, la question de savoir quelles analogies utiliser pour comprendre les comportements et pour

restreindre le nombre d'interprétations possibles persiste avec acuité. Sur quelles bases peut-on justifier les choix, les rapprochements des Australopithecines avec l'homme moderne ?

Les premiers outils de pierre taillée ont été considérés comme des preuves de l'hominisation : ils semblaient n'être que les premiers d'une longue lignée qui allait continûment jusqu'aux outils taillés du Paléolithique supérieur. Cette continuité et la maîtrise des savoir-faire associés à la taille de roches dures suffisaient, pour certains, à justifier le rapprochement entre les hominidés anciens et les hommes actuels : l'homme était un



**1. CET ASSEMBLAGE** circulaire de pierres (environ cinq mètres carrés), situé sur le site d'Olduvai, en Tanzanie, a été interprété comme une structure d'habitat, construite il y a près de deux millions d'années, par les chasseurs-cueilleurs du Paléolithique.



**2. PERCUTEUR** utilisé par nos ancêtres (une dizaine de centimètres de diamètre, à gauche) ; cet outil présentant une cupule centrale d'usage a 1,8 million d'années ; il a été trouvé sur le site d'Olduvai, en Tanzanie. Les chimpanzés utilisent des percuteurs analogues (au centre). Ce dernier provient du site du Mont-Béto, en Côte-

d'Ivoire. Il s'est cassé lors de son utilisation et a été abandonné tel quel sur l'enclume. Si les chimpanzés transforment les outils qu'ils tirent de végétaux, ils ne travaillent pas la pierre, tandis que les hommes préhistoriques, le faisaient, comme en témoigne ce chopper (à droite).

chasseur-cueilleur fabricant d'outils. On pensait aussi que la transmission de ces savoir-faire n'était possible qu'avec un langage ou un système de communication élaboré.

Si l'on veut justifier des rapprochements entre les hommes du Paléolithique supérieur et les hommes actuels sur des critères biologiques (nous appartenons à la même espèce *Homo sapiens*), la justification vole en éclat si nous nous reportons un million, voire plutôt 2 ou 2,5 millions, d'années en arrière. Nous sommes alors confrontés non seulement à des espèces différentes (*Australopithecus africanus*, *Paranthropus robustus*, *Homo habilis*), mais aussi à des genres différents (*Australopithecus* et *Homo*), dont plusieurs sont susceptibles d'avoir fabriqué des outils.

Nous devons tenir compte de ces distances (dans le temps et entre espèces) si nous voulons comprendre, ou expliquer quoi que ce soit. Pour réduire ces distances, nous devons interpréter de façon de plus en plus exigeante les faits archéologiques, et ouvrir le champ

des références possibles, c'est-à-dire accepter de voir que certains seuls entre le monde animal et le monde humain sont moins discriminants qu'on ne le pensait et que, dans bien des cas, la différence est quantitative et non qualitative. Alors les primates, les anthropoïdes en particulier, peuvent fournir des modèles complémentaires ou alternatifs, à confronter aux données anciennes.

## Les techniques des singes

Au début des années 1960, d'importantes découvertes paléontologiques ont été faites en Afrique de l'Est sur les origines de l'homme. Simultanément, le paléontologue et préhistorien kenyan Louis Leakey qui fouillait à Olduvai, en Afrique de l'Est, suggéra à de futures éthologues, telles Jane Goodall, Diane Fossey ou Biruté Galdikas, d'aller observer les comportements des grands singes actuels (chimpanzé, gorille et orang-outan) en milieu naturel. On connaissait certaines capacités cognitives de ces animaux, depuis les tra-

voux du psychologue allemand Wolfgang Köhler, au début du XX<sup>e</sup> siècle, mais les observations de terrain révélèrent d'étonnantes similitudes entre les capacités des grands singes et celles des premiers hominidés. Ainsi, les chimpanzés ne se contentent pas d'utiliser des outils pour pêcher des termites, ils les fabriquent!

Au cours des années 1960 et 1970, l'éthologie des primates a contredit quasiment point par point les certitudes, les critères de base sur lesquels la préhistoire, mais aussi d'autres disciplines, telles la psychologie ou l'anthropologie, se fondaient pour définir ou reconnaître l'Homme. L'outil, l'outil fabriqué, la capacité de communiquer à l'aide d'un langage appris, la coopération sociale, le partage de la nourriture, la chasse, le cannibalisme, la capacité à tromper ou à attribuer des intentions à autrui constituent autant de critères «distinctifs» qui s'estompent peu à peu.

Quand un préhistorien dit d'un site archéologique qu'il est «anthropique», c'est qu'il considère qu'il satisfait à un ou plusieurs critères, bien précis, qui définiraient l'humanité. Pourtant, lorsqu'aujourd'hui nous décrivons certains groupes de chimpanzés d'Afrique de l'Ouest utilisant des outils morphologiquement et fonctionnellement quasi identiques à certains outils d'hominidés vieux de 1,8 million d'années, ces seuils perdent tout sens, et le préhistorien s'interroge.

## Les outils de pierre des chimpanzés

À la différence de ceux d'Afrique centrale ou orientale, les chimpanzés communs (*Pan troglodytes*) d'Afrique de l'Ouest (Guinée, Sierra-Léone, Liberia et Côte d'Ivoire) consomment plusieurs espèces de noix qu'ils cassent à l'aide d'outils de pierre ou de bois (voir la figure 3). Cette activité a été observée en détail dans quelques groupes, que des chercheurs ont habitués à leur présence (les chimpanzés sont très farouches) ou par des traces matérielles enregistrées dans d'autres groupes non habitués.

Ils cassent donc des noix, de forme et de dureté variables, en utilisant deux sortes d'instruments : des enclumes sur lesquelles ils posent les noix et des percuteurs avec lesquels ils les frappent. Ils adaptent leur action aux qualités



F. Joulian



F. Joulian

**3. FEMELLE CHIMPANZÉ** sur une branche d'arbre cassant des noix de *Coula edulis* avec un percuteur de bois dans le parc de Tai, en Côte-d'Ivoire (en bas). Les femelles, plus habiles que les mâles pour casser les noix, enseignent la technique à leurs petits. Le percuteur en bois du haut présente une cupule d'usage provoquée par des coups répétés. À l'extrémité droite, le bois s'est cassé à l'endroit de deux anciennes cupules (creusées de part et d'autre du morceau de bois, au centre de gravité de l'outil, qui mesure environ 30 centimètres).

physiques des noix et à la disponibilité des matières premières : par exemple les fruits les plus résistants, ceux de la noix de *Panda oleosa*, sont ouverts de préférence à l'aide d'instruments en pierre ou en bois très dur. L'activité de cassage peut se dérouler soit individuellement, soit en groupe, être brève ou durer plusieurs heures en pleine saison de fructification des noix ; elle représente une activité de subsistance importante pour les groupes de chimpanzés qui la pratiquent.

### Contraintes techniques

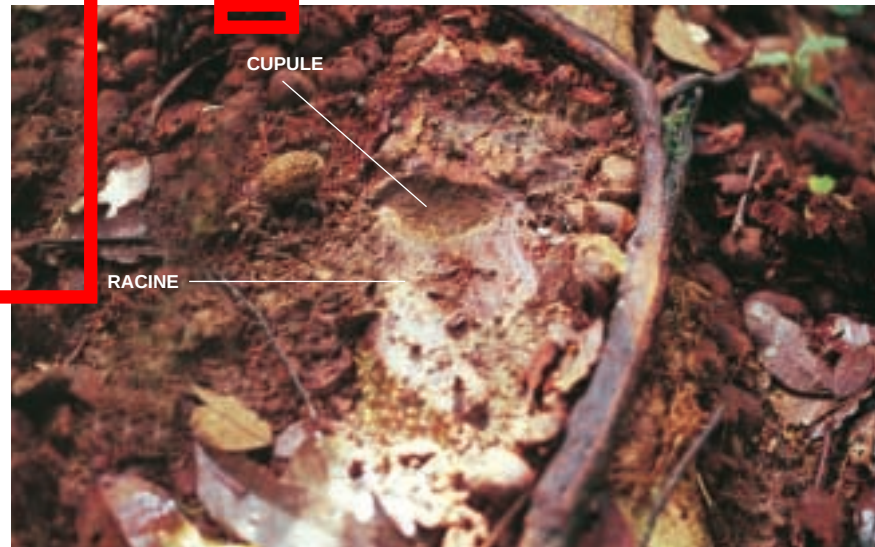
Les contraintes dues à la dureté de la noix, à la difficulté à l'immobiliser (elle est rendue glissante par sa pulpe écrasée) ou à la gestion du rebond du percuteur, nécessitent des choix techniques bien spécifiques et des gestes adaptés. Pour éviter d'écraser les amandes, on doit porter des coups puissants pour commencer, puis des coups plus légers et plus précis. Les percuteurs en bois peuvent être transformés, par exemple cassés à la bonne longueur et / ou écorcés. Quant aux instruments de pierre, ils servent tels quels. Sur certains sites où ces matériaux durs sont rares, ils peuvent être transportés, parfois sur

plusieurs centaines de mètres, voire plus d'un kilomètre. Ces transports sont optimisés et témoignent de l'utilisation de « cartes mentales » extrêmement raffinées.

Les enclumes ne sont pas modifiées mais elles n'en sont pas moins bien adaptées à l'activité. Dans les arbres, elles correspondent souvent à des branches larges ou à des fourches dans lesquelles les femelles coincent la noix. Au sol, elles se situent sur des racines d'arbres ou sur

des rochers horizontaux. Sur le site de Bossou en Guinée, on a même vu des chimpanzés utiliser des cales en pierre afin d'ajuster des enclumes mobiles à l'horizontale. Trois types d'outils distincts interviennent dans la même chaîne opératoire (percuteur, enclume, cale) : la complexité technique grandit.

Les percuteurs comme les enclumes se marquent de cupules d'usage, parfois très profondes. Les enclumes se situent généralement à proximité des



F. Jullien



F. Jullien

**4. CES ATELIERS DE CASSAGE DE NOIX** sont utilisés par les chimpanzés. Ils sont situés à proximité des arbres fruitiers et servent à chaque saison de fructification. Les chimpanzés y cassent des noix de *Panda oleosa* (environ cinq centimètres de diamètre, en vert au centre de l'atelier du bas). Dans l'atelier de Taï, en Côte-d'Ivoire (en

haut), l'enclume est une racine dont la surface est très érodée. Dans l'atelier du Mont-Béto (en bas), également en Côte d'Ivoire, l'enclume est une roche en granit. Elle est recouverte de milliers de coques de noix séchées qui permettent d'évaluer la durée d'utilisation de ces sites par ces anthropoïdes : environ 200 ans.

arbres fruitiers, avec des restes de noix cassées et des percuteurs abandonnés sur place après le cassage. Elles constituent des «ateliers», réutilisés à chaque saison de fructification des noix, et dont j'ai pu estimer la durée d'utilisation à plus de 200 ans, dans certains cas (voir la figure 4).

L'apprentissage d'un tel comportement est extrêmement long – jusqu'à neuf ans – et suppose un investissement important de **mères (On** montré que les femelles réussissent mieux que les mâles dans l'activité de cassage. La transmission du savoir-faire se fait par imitation des femelles par les enfants. De plus, certaines femelles

laissent des outils «idéaux», c'est à dire de poises et de forme adaptés, auprès des enclumes pour que les enfants les manipulent et jouent avec.

L'éthologue suisse Christophe Boesch a observé, dans le parc de Taï, en Côte d'Ivoire, des femelles qui montraient leurs petits comment tenir correctement le percuteur. L'une a décomposé le mouvement au ralenti et l'autre a positionné correctement la noix **sur** l'enclume. **Les observati** ons indiquent, selon moi, l'existence d'une réflexion, au sens littéral du terme, et d'une connaissance sur la technique utilisée. Ces mères ne montrent non pas seulement «ce qu'il faut faire», mais

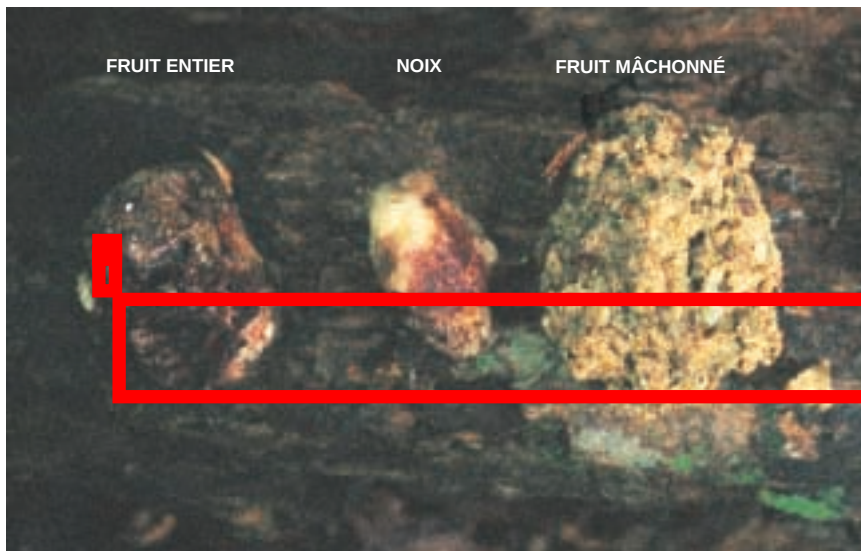
aussi «comment il faut le faire». Cela atteste l'existence d'une représentation explicite des tâches à effectuer et de la façon de les effectuer, représentation intégrée au sein d'une connaissance, d'une mémoire plus large, celle du groupe. Les comportements qu'indiquent les mères à leurs petits portent sur les «bons outils», les «bonnes noix», les «bons gestes», éléments essentiels à la réussite des cassages des fruits du *Panda oleosa*.

Cette capacité à modifier son comportement afin de l'enseigner – autre critère que l'on pensait propre aux humains – constitue l'un des éléments essentiels du débat actuel sur l'intelligence. Outil, technique, cognition et société fonctionnant ensemble – chez les chimpanzés comme chez les premiers hommes –, la complexité des interactions des hommes ou des primates avec leur milieu naturel et leurs semblables ne peut être appréciée correctement que si l'on considère l'intelligence en situation, au travers des actions des individus en société.

## Choré et traditions

L'activité de cassage des noix par les chimpanzés avait déjà été signalée par des navigateurs portugais des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles. De telles permanences comportementales, associées aux estimations des durées d'utilisation des ateliers et reliées à la mise en évidence de variantes techniques entre groupes de chimpanzés vivant dans des conditions similaires, nous ont autorisé à parler de traditions. Ces variantes techniques, ou traditions, portent sur différents aspects du cassage des noix. Tous les groupes ne cassent pas les mêmes noix : certains ne cassent qu'une seule espèce, d'autres en cassent plusieurs. Toutes les parties de la noix ne sont pas également consommées : certains mangent l'extérieur de la noix sans la casser, et d'autres la cassent pour consommer les amandes (voir la figure 5). Les outils utilisés sont aussi variables : certains groupes cassent avec des percuteurs en bois, et d'autres avec des percuteurs associés en pierre qu'en bois. Et cela bien que les disponibilités en fruits et en matières premières pour les outils soient comparables.

Le cassage peut aussi s'effectuer en tenant le percuteur à une main



**5. SELON LEURS TRADITIONS**, les chimpanzés ne consomment pas toujours les noix de la même façon. Ici, sur le site de Monogaga, en Côte d'Ivoire, les chimpanzés n'ont mangé que la chair entourant cette noix de *Parinari excelsa* ; sur d'autres sites, les chimpanzés cassent les noix afin d'en extraire les amandes.



**6. CETTE ENCLUME** sert aux chimpanzés pour le cassage de noix de *Panda oleosa*. Ce type d'enclume à une seule cupule bien délimitée ne s'observe que sur certains sites, ici au Mont-Béto, en Côte d'Ivoire.



National Geographic/M. Nichols

**7. KANZI, un chimpanzé bonobo élevé en captivité, apprend à tailler des éclats de silex, dans le cadre d'une expérimentation.**

ou à deux mains, selon les groupes. Les objets eux-mêmes révèlent des variantes techniques : des percuteurs sont utilisés sur une seule face, d'autres sur plusieurs, selon les groupes. L'usure de la surface des enclumes peut aussi être restreinte à une cupule ou occuper une surface plus étendue (voir la figure 6). L'ensemble de ces variantes techniques entre les groupes de chimpanzés de l'Afrique de l'Ouest constitue des traditions au sein desquelles nous l'entendons pour les groupes humains actuels.

Si nous les relierons aux observations faites sur la transmission active de connaissances par les chimpanzés femelles évoquées précédemment, nous voyons qu'une part de leur «enseigne-

ment» implique des éléments de tradition (type d'outil, matière première, pratiques gestuelles, etc.). Cela atteste d'une objectivation des connaissances et, par conséquent, d'une transmission à dimension sociale et collective.

Ces observations étonnantes sur l'intelligence technique des chimpan-

Frederic JOULIAN, étho-archéologue, est maître de conférences à l'École des hautes études en sciences sociales.

W. C. MACGREW, *Chimpanze Material Culture. Implications for Human Evolution*, Cambridge University Press, 1992.

C. BOESCH et H. BOESCH, *Transmission Aspects of Tools Use in Wild Chimpan-*

zés nous montrent qu'elle est contenue dans des objets non transformés ; si l'intelligence n'est pas nécessairement lisible sans l'aide de données comportementales (à la différence des outils taillés qu'étudie le préhistorien), il n'en demeure pas moins qu'elle est, bel et bien, dans les conduites de choix, et pas seulement dans les actes de transformation ni dans les produits transformés. L'analyse des seuls outils transformés renvoie trop souvent à un aspect cognitif individuel et non social.

## Kanzi, le bonobo

Et même si l'on a pu apprendre à un chimpanzé bonobo, nommé Kanzi, à produire des éclats lithiques qui ressemblent à ceux des hominidés anciens, rien de cette expérience ne nous informe sur les dimensions sociales, culturelles et même mentales que pourrait revêtir une telle activité. Cette expérience nous dit essentiellement qu'un bonobo est capable de résoudre de tels problèmes techniques et de maîtriser le savoir d'un expérimentateur humain moderne. Kanzi nous dit que les actes de percussion entrent dans son registre de compétence, guère davantage. N'oublions pas que cet animal, cette « chimère », pourrait-on dire, comprend l'anglais, maîtrise un langage iconique de plusieurs centaines de mots et a vécu toute sa vie en captivité alors que ses congénères sauvages du Zaïre, n'utilisent pas d'outils du tout !

Quelle valeur heuristique peut revêtir un tel exemple au regard des comportements anciens ou des phénomènes évolutifs ? Si l'on cherche à ouvrir le champ des modèles d'homínisation possibles, à propos des origines de la société ou de la culture notamment –, la référence à des données naturelles où l'intelligence s'exprime dans des configurations sociales réelles et variées, sera privilégiée afin de nous permettre d'affronter la complexité de l'homínisation.

zees, in *Tools, Language and Cognition in Human Evolution*, sous la direction de K. Gibson et K. Ingold, Cambridge University Press, 1993.

*La culture est-elle naturelle ? Histoire, épistémologie et applications récentes du concept de culture*, sous la direction de A. Ducros, J. Ducros et F. Joulain, éditions Errance, 1998.



# Les stratégies alimentaires des Néandertaliens

MARYLINE PATOU-MATHIS

*Les comportements alimentaires des Néandertaliens, notamment ceux associés à la chasse, révèlent une intelligence semblable à la nôtre.*

L'intelligence de l'homme le place à part dans le règne animal. Aujourd'hui, ses capacités techniques et sa maîtrise de l'environnement surpassent de beaucoup celles de toutes les autres espèces vivantes. En a-t-il toujours été ainsi ? Pour tous les types d'homme qui ont prospéré à la surface de la Terre ?

À l'arrivée, il y a 40 000 ans, des premiers représentants de notre espèce, *Homo sapiens*, l'Europe était peuplée, par d'autres hominidés, les Néandertaliens. Cette population, morphologiquement proche de nous, mais qui possédait aussi des traits physiques très caractéristiques, a laissé de ses activités des vestiges matériels qui ressemblent beaucoup à ceux qu'*Homo sapiens* a produits à la même époque, dans d'autres régions du monde. Que peut-on en déduire quant à l'intelligence des Néandertaliens ? Était-elle proche de la nôtre ?

Pour répondre à cette question, je me suis intéressée aux comportements alimentaires des Néandertaliens, que j'ai reconstitués en étudiant les restes osseux des animaux qu'ils avaient consommés ou utilisés. Au Paléolithique, les hommes exploitent exclusivement les ressources alimentaires sauvages. Les comportements de subsistance, notamment les techniques d'acquisition de viande, dépendent en premier lieu des besoins physiologiques de l'homme et des caractéristiques de l'environnement. Toutefois, chez les Néandertaliens, la diversité des comportements d'approvisionnement atteste aussi de choix économiques et culturels. On observe toute une gamme de choix, souvent pendant les mêmes périodes et dans des environnements semblables : cueillette ; col-

lecte (de miel ou d'œufs) ; récupération de carcasses ; chasse limitée au petit gibier ; chasse opportuniste diversifiée ; chasse orientée vers quelques espèces, chasse spécialisée sur une ou deux espèces, ou sur un groupe d'espèces vivant dans le même biotope ou ayant la même taille ; chasse hyperspécialisée d'une seule espèce particulièrement productive. Ces choix témoignent de stratégies perfectionnées, donc de l'existence d'une pensée complexe.

La chasse pratiquée par les Néandertaliens révèle à la fois des capacités cognitives individuelles, telles que la mémoire ou la déduction, et une organisation sociale. Ainsi, la capture et l'abattage de grands herbivores nécessite l'accord des membres du groupe sur les méthodes de chasse, mais aussi sur le partage et l'utilisation des animaux tués.

## Des hommes différents

La lignée des Néandertaliens appartient, comme la nôtre, au genre *Homo*. Elle s'individualise en Europe au début du Paléolithique moyen, il y a environ 300 000 ans, se développe avec des caractères morphologiques propres au cours du dernier stade climatique interglaciaire, il y a 125 000 ans, en Europe et au Proche-Orient, puis disparaît, apparemment sans descendance, au début du Paléolithique supérieur, il y a 28 000 ans. Le crâne des Néandertaliens est volumineux : de 1 300 à 1 700 centimètres cubes (pour 1 000 à 2 000 centimètres cubes chez l'homme moderne). Il est caractérisé par un front fuyant, des bosses pariétales marquées et un « chignon » occipital. La face, large et en « museau », est marquée par des bourrelets sus-orbitaires et par l'ab-

sence de menton. Le reste du squelette est assez proche de celui de l'homme moderne. Relativement petits et trapus, les Néandertaliens étaient parfaitement redressés.

Les Néandertaliens ont taillé de nombreux types d'outils perfectionnés en pierre, en utilisant des techniques variées de débitage et de façonnage. Ils ont développé, à différentes périodes et dans différentes régions, de nombreuses « cultures », que l'on distingue traditionnellement, en préhistoire, par les types d'outils produits et par les méthodes de taille. Vivant le plus souvent en petits groupes d'une dizaine d'individus, les Néandertaliens installaient, en fonction de leurs besoins, des campements de base temporaires. S'ils construisaient rarement de véritables habitats, ils aménageaient fréquemment leur espace domestique, surtout depuis 110 000 ans.

Morphologiquement bien adaptés aux climats froids des périodes glaciaires, les Néandertaliens ont aussi prospéré sous des climats tempérés et humides, lors des périodes interglaciaires et lors des brèves réchauffements qui ont ponctué les glaciations. Ils évoluèrent ainsi dans des environnements divers : steppe, prairie, forêt peu dense, où ils côtoyaient de grands mammifères herbivores, chevaux, bœufs, mammoths, rhinocéros, cerfs, rennes et bouquetins, et de grands prédateurs carnivores : lions, ours et hyènes des cavernes.

## Des mangeurs de viande

Que savons-nous des repas des hommes préhistoriques ? Les seuls reliefs qui nous soient parvenus sont des os d'animaux. Les Néandertaliens ont-ils

aussi exploité les ressources alimentaires végétales présentes dans leur environnement, abondantes pendant les périodes tempérées ou peu froides?

Selon Hervé Bocherens, du Laboratoire de biogéochimie isotopique de l'Université Pierre et Marie Curie, leur régime alimentaire était majoritairement carnivore. Il a mesuré les abondances relatives des différents isotopes du carbone et de l'azote contenus dans les os de Néandertaliens : elles sont plus proches de celles des carnivores que de celles des herbivores (les isotopes du carbone et de l'azote, qui ont des masses légèrement différentes les uns des autres, sont plus ou moins abondants selon le régime alimentaire de l'animal).

Comment les Néandertaliens s'approvisionnaient-ils en produits carnés, viande, graisse et moelle? On retrouve des vestiges de récupération d'animaux morts, de mort naturelle

ou tués par d'autres prédateurs, comme à la Cotte Sainte-Brelade, sur l'île de Jersey, à Grobern, en Allemagne, à Skara Vågå et à Krakow-Nowa Huta, en Pologne, et à Chokurcha, en Crimée. Des animaux, surtout des proboscidiens, éléphant antique ou mammoth, et quelques rhinocéros, tués par des carnivores, enlisés dans des marécages ou encore échoués sur les rives y ont été consommés.

Ce « charognage » semble plus fréquent chez les Néandertaliens que chez les hommes modernes, notamment pour la récupération de viande de très grosses espèces. Mais ce comportement n'est pas un indice de culture peu évoluée. Il relève plus de choix ou d'opportunités que de l'incapacité à chasser. La pratique du charognage nécessite en effet une bonne connaissance du territoire et des comportements des animaux : du gibier, pour le repérage des carcasses, et des pré-

dateurs concurrents, pour la récupération des meilleurs morceaux avant qu'ils ne soient dévorés. Ce n'est pas non plus un indicateur chronologique : il est encore pratiqué aujourd'hui par des groupes de chasseurs-cueilleurs, tels les Hadza en Tanzanie.

Parallèlement, et surtout, les Néandertaliens s'approvisionnaient en viande en chassant. Ils ont pratiqué très tôt une chasse orientée vers deux ou trois espèces, souvent grégaires, migratrices et vivant dans des espaces ouverts, tels les chevaux, les rennes ou les bisons. Pendant la dernière glaciation, des chasses hyper-spécialisées apparaissent : des sites d'Europe orientale d'environ 50 000 ans ont livré des restes osseux provenant à plus de 90 pour cent de la même espèce : le bouquetin dans le Caucase, l'antilope saïga ou l'*Equus hydruntinus* (petit animal de la famille des équidés) en Crimée.



**1. LE COMBAT AVEC L'OURS DES CAVERNES**, qui a enflammé l'imagination des artistes, est emblématique de la maîtrise de l'environnement par les Néandertaliens. De tels affrontements étaient toutefois rares : ni prédateur ni gibier, cet ours n'était qu'un concu-

rent pour l'occupation de grottes. Pour se nourrir, les Néandertaliens chassaient de grands herbivores, car le rapport entre l'énergie dépensée pour la capture et l'abattage, et celle apportée par la consommation de la viande est plus favorable.

Les Néandertaliens, nomades, étaient très mobiles. Beaucoup de sites correspondent à des haltes de chasse de quelques jours, éventuellement utilisées durant plusieurs années successives. Les territoires qu'ils parcouraient, dont on estime la taille d'après, notamment, l'origine des outils de silex, semblent vastes : jusqu'à 100 kilomètres de rayon.

Cette mobilité est inhérente à leur statut de chasseurs-cueilleurs : les chasseurs délimitent le territoire en pistant le gibier. Pour les groupes qui pratiquent une chasse hyperspécialisée, sur une seule espèce migratrice, le suivi des troupeaux est indispensable. Une telle mobilité augmente les chances de survie : une nourriture dispersée sur un vaste territoire est recherchée par des unités sociales dispersées, et inversement. Ainsi, les éthologues ont observé que les territoires de chasse des prédateurs carnivores sont toujours plus vastes que les espaces parcourus par les espèces végétariennes.

## Des chasseurs avisés

Les caractéristiques de la chasse chez les Néandertaliens révèlent la mise en œuvre de plusieurs capacités cognitives. D'abord, la mémoire : on ne tue pas un renne comme un cheval ni comme un mammouth. Les méthodes et les armes utilisées doivent être adaptées aux caractéristiques du gibier : caractéristiques biologiques (taille, âge, sexe), éthologiques (animaux grégaires ou solitaires, mobiles ou sédentaires), écologiques (vie en milieu ouvert ou forestier, sur des rochers ou en plaine...). Des connaissances anatomiques sont aussi indispensables, afin de viser juste un organe vital ou de déclencher une forte hémorragie.

Les armes des Néandertaliens n'étaient efficaces qu'à courte portée : une dizaine de mètres tout au plus pour les armes de jet, lances en bois ou armées d'une pointe en pierre ; au corps à corps avec les armes de main, coups-de-poing, massues,

épieux de bois et couteaux, pierres taillées en manchées sur des morceaux de bois. Ils mettaient donc en œuvre des stratégies perfectionnées pour approcher le gibier.

Ainsi utilisaient-ils fréquemment des pièges naturels, marécages, avens, vallons fermés ou précipices. À Starocelié en Crimée, par exemple, un grand nombre de petits équidés ont été abattus après avoir été acculés au fond d'un vallon fermé. Les rhinocéros ou les mammouths ont probablement aussi été massés de cette façon.

De nombreux outils portent des traces de travail du bois. Les Néandertaliens récupéraient des fibres végétales, sans doute pour les tresser en fils ou en cordelettes, utilisables pour la confection de pièges artificiels, lacets, gaules et filets.

Les Néandertaliens connaissaient bien le comportement de leurs proies. La spécialisation de la chasse indique qu'ils savaient précisément où ils trouveraient le type d'animal qu'ils souhaitaient abattre.



Zdeněk Burian Moravské Zemské Museum, Brno

**2. LES ARMES DE JET** des Néandertaliens, telles les lances, n'étaient efficaces qu'à courte distance. Ils devaient donc s'approcher par ruse du gibier : de nombreuses traces indiquent qu'ils savaient tirer parti des particularités topographiques pour piéger les animaux.

Même s'ils profitaient des proies qui se présentaient à eux, ils ne chassaient pas au hasard. Il y a 250 000 ans, les premiers Néandertaliens utilisaient déjà leurs connaissances de la biologie des animaux pour choisir soigneusement les caractéristiques de ceux qu'ils abattaient : l'espèce, le sexe et l'âge. Selon les espèces, par exemple, les mâles et les femelles ne sont pas gras à la même période de l'année.

Leurs choix semblent aussi guidés par des traditions culturelles, par le goût ou par l'aptitude des chasseurs. Ainsi, les animaux abattus ne sont pas obligatoirement les plus abondants dans l'environnement proche, les plus productifs ni les plus faciles à capturer. On observe des orientations différentes de la chasse dans une même région et pour des périodes de climats comparables. La plus ou moins grande spécialisation de la chasse vers une ou plusieurs espèces ne semble pas non plus liée directement à la « culture » matérielle des groupes. Dans de nombreux cas, les ensembles d'os animaux de composition similaire sont associés à des cultures différentes.

Les Néandertaliens semblent avoir planifié et géré leur alimentation carnée en contrôlant aussi son transport et son stockage. L'emplacement du lieu d'abattage déterminait le site et le type de campement. Selon leur taille et l'éloignement du campement, les animaux sont dépecés sur place ou transportés entiers, ou en quartiers pour les plus grandes espèces. Le site de La Justice, à Beauvais, daté d'environ 50 000 ans, a livré plusieurs foyers où de la viande a été séchée en vue de la conservation : prévoyant des mois d'hiver pauvres en captures, les Néandertaliens accumulaient des provisions pendant l'été.

### La socialisation par la chasse

La chasse a aussi une fonction sociale. Elle nécessite connaissances, savoir-faire et expériences. Elle forge des traditions et crée des souvenirs individuels et collectifs. Elle augmente la cohésion sociale du groupe, et de grandes chasses élargissent cette coopération à plusieurs groupes.

La chasse spécialisée est associée à un apprentissage. Chez les chasseurs-cueilleurs actuels, celui-ci se

déroule lors de la préparation des armes, au cours des discussions sur la stratégie à déployer, mais aussi au retour de la chasse, durant le partage, les danses, les chants et les histoires contées autour du foyer.

La chasse de grands mammifères souligne l'organisation sociale des Néandertaliens : ces animaux ne peuvent être capturés et abattus que par un groupe de chasseurs. Une chasse collective requiert une bonne coordination entre les chasseurs : les Néandertaliens, dont les paléontologues discutent toujours les capacités anatomiques à parler, possédaient donc un langage de communication élaboré, oral ou gestuel.

La chasse en groupe, plus fructueuse, nécessite aussi la capture d'une proie plus grosse ou l'abattage de plusieurs bêtes. Plus la stratégie est perfectionnée, plus la collaboration entre les individus est intense, plus grande est leur interdépendance. Une organisation sociale doit régir l'équilibre entre les apports caloriques et nutritifs, l'énergie dépensée pour la capture, l'abattage et le transport, et le nombre de consommateurs.

Le partage est peut-être l'acte social le plus important : chez les populations actuelles de chasseurs-cueilleurs, le partage du produit de la chasse est

équitable, ce qui assure la cohérence du groupe et renforce les relations, y compris entre les groupes. Un morceau de gibier peut devenir, au sein du réseau tissé entre différentes communautés, un objet d'échange ou un présent. Les vieillards, les malades et les jeunes enfants restés au camp reçoivent leur part. La découverte, par exemple à La Grotte, en Charente, ou à Shanidar, en Iraq, de squelettes de Néandertaliens adultes portant des marques de pathologies graves, parfois congénitales, témoigne d'un comportement social avancé, où les infirmes n'étaient pas exclus.

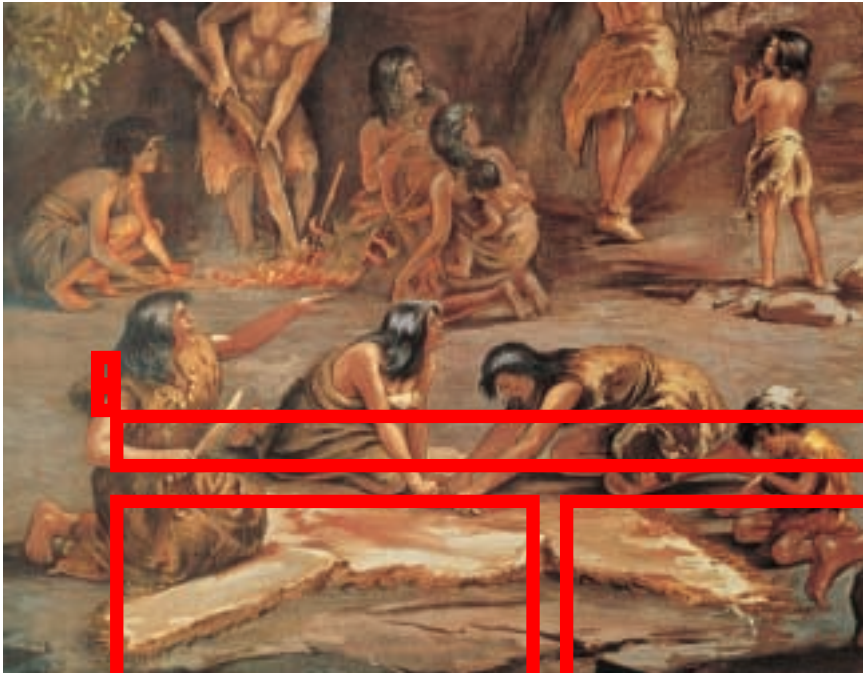
### L'animal, matière première

Après l'abattage, les Néandertaliens dépouillaient et dépeçaient les animaux en suivant des chaînes opératoires semblables à celles des hommes modernes du Paléolithique. C'est l'anatomie de l'animal qui impose la succession des étapes du traitement, plus que le « boucher » lui-même.

Outre des ressources alimentaires, les Néandertaliens tiraient des animaux plusieurs matières premières nécessaires à leur vie quotidienne. Ainsi, les os servaient de combustible, de godets, telles les cavités cotyloïdes de grands mam-



**3. LA CHASSE DE GRANDS HERBIVORES**, que pratiquaient les Néandertaliens, est indissociable d'une vie en groupe. La préparation et le déroulement de la chasse, mais surtout le partage des animaux abattus tissaient de multiples relations sociales.



AKG Paris

#### 4. LES ANIMAUX TUÉS par les Néandertaliens leur fournissaient de nombreuses matières premières. Les tissus mous, en particulier les peaux, étaient récupérés et traités.

mifères découvertes à Engihoul, en Belgique, et, peut-être, de pendeloques, tels le métapocrien et la vertèbre caudale perforée de Bocksteinschmiede, en Allemagne. On a aussi retrouvé quelques éclats osseux non transformés, utilisés pour retoucher les outils de pierre, quelques racloirs et quelques pointes.

Les bois de cervidés servaient de percuteurs pour la taille des outils de pierre, de structures d'habitat ou de pics. Ainsi, dans la grotte Raj, en Pologne, 67 bois de chute de rennes forment un « mur » en demi-cercle dans le couloir d'accès. À Lovas, en Hongrie, les hommes de Néandertal ont utilisé des bois d'élans pour dégager des morceaux d'hématite et de limonite, matières colorantes de couleur ocre. Cependant, alors que d'un point de vue technique les Néandertaliens en étaient probablement capables, ils ne semblent pas avoir développé une véritable industrie osseuse au Paléolithique moyen : sans doute n'en avaient-ils tout simplement pas besoin.

Des dents ont été perforées, telle la canine de renard trouvée dans un des niveaux mésolithiques du site de La Quina. Ont-elles constitué des éléments de parure, comme, peut-être aussi, la plaque d'ivoire de mammoth découverte à Tata, en Hongrie ?

Des marques de dépouillement ou de prélèvement laissées sur les os par

des coupeaux en pierre indiquent enfin l'utilisation des tissus mous et périssables. On en déduit l'usage par des comparaisons ethnographiques : la corne finie fournit de la colle ; les tendons et les ligaments permettent de confectionner des fils et des lacets ; l'enveloppe de l'estomac et celle des intestins servent de récipients ; les crins, les poils, les soies, les plumes, le cuir, la peau et la fourrure entrent dans la composition de vêtements, de couvertures, de toitures ou d'auvents.

Cette exploitation des ressources de l'animal révèle que les Néandertaliens percevaient celui-ci à plusieurs

niveaux. Vivant, et avant tout traitement, l'animal est un ensemble de ressources. Après traitement et transformation, c'est une diversité de produits finis. Le passage de l'un à l'autre est possible grâce à l'anticipation des éléments recherchés, à l'apprentissage d'un savoir-faire et à une suite d'étapes soigneusement ordonnées.

La chasse et les activités qui en découlent sont des phénomènes sociaux, sont aussi des révélateurs sociaux. Comme l'a écrit Claude Fischler en 1983, ce n'est pas tant la composition de leurs repas que la façon dont ils se nourrissaient qui a séparé l'homme des autres primates. C'est vrai autant pour l'homme de Néandertal que pour notre espèce.

Les comportements de subsistance des Néandertaliens et leur exploitation des ressources animales ne sont pas fondamentalement différents de ceux des hommes modernes du Paléolithique, que les préhistoriens étudient de la même façon. Les différences sont en tout cas beaucoup plus faibles que les similitudes, et l'on peut dans de nombreux cas les associer à des choix culturels. Dans ces activités, et comme cela a aussi été montré pour la fabrication d'outils, la même « intelligence » est mise en œuvre par les deux espèces.

On ne peut donc pas croire que, comme cela a souvent été proposé, les hommes modernes, arrivant en Europe, aient conduit les Néandertaliens à l'extinction en accaparant les ressources alimentaires. La question demeure alors : pourquoi les Néandertaliens aussi intelligents que nous, ont-ils disparu ?

Maryline PATOU-MATHIS est chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de préhistoire du MNHN.

F. POIRIN, *L'animal et l'os devant l'archéologie*, in *Les nouvelles de l'archéologie*, n° 11, 1983, Paris, 1983.

*Dictionnaire de la préhistoire*, sous la direction de André Leroi-Gourhan, PUF, Paris, 1988.

M. PATOU, *Subsistance et approvisionnement au Paléolithique moyen*, in *L'homme de Néandertal*, 6, Étude et recherche archéologique de l'Université de Liège, vol. 33, pp. 11-18, 1989.

C. FISCHLER, *L'omnivore*, Odile Jacob, Paris, 1993.

M. PATOU-MATHIS, *Les comportements de subsistance au Paléolithique inférieur et moyen en Europe centrale et orientale*, in *Exploitation des animaux sauvages à travers le temps*, APDCA, pp. 15-28, Antibes, 1993.

M. PATOU-MATHIS, *Techniques d'acquisition et de traitement des grands mammifères par les Néandertaliens européens : exemples de « chaînes opératoires »*, in *Colloque de Rome*, mai 1995.

M. PATOU-MATHIS, *Stress biologiques et comportements de subsistance au Paléolithique moyen et au Paléolithique supérieur en Europe*, in *Nature et Culture, Actes du Colloque international de Liège*, décembre 1993, *Étude et recherche archéologique de l'Université de Liège*, vol. 68, pp. 445-452, 1995-1996.



# Les inventions des derniers Néandertaliens

FRANCESCO D'ERRICO • DOMINIQUE BAFFIER • MICHÈLE JULIEN

*Les derniers Néandertaliens ont décoré des outils en os et ont fabriqué des objets de parure : l'expression de leur pensée symbolique ressemble à celle*

**D**ans *Le clan de l'ours des cavernes*, publié en 1980, Jean Auel brosse un tableau imagé de la période entre 40 000 et 30 000 ans avant notre ère où, en Europe, des hommes anatomiquement modernes, les hommes de Cro-Magnon, côtoient, puis supplantent les derniers Néandertaliens. La société néandertalienne y est fon-

dée sur la mémoire collective, la domination masculine, le respect des règles sociales, une faible innovation technique : elle étouffe les élans d'humanité et d'initiative personnelle de ses membres et vénère la tradition qu'elle considère indispensable à la survie du groupe. Au contraire, les hommes modernes sont ouverts aux innovations techniques, aux échanges culturels et à l'essor de l'individu. Bref, l'intelligence des Néandertaliens est très différente de celle des Cro-Magnons.

Ce scénario, soutenu par un style alerte, n'offre pas l'image la plus fidèle de cette époque de transition. Les Néandertaliens ont en effet évolué techniquement et culturellement au cours de leur histoire. En particulier, il y a

environ 40 000 ans, ils ont inventé de nouvelles façons de tailler la pierre et ils ont produit en plus grand nombre des outils spécialisés, tels des burins et des grattoirs, déjà connus dans les périodes précédentes. Ils ont aussi commencé à travailler l'os et l'ivoire et, surtout, à produire des objets de parure.

Ces évolutions sont contemporaines de l'arrivée en Europe des hommes



**1. DES FRAGMENTS DE TUBES EN OS** d'oiseaux, décorés d'entailles, (a) ont été fabriqués dans la grotte du Renne, à Arcy-sur-Cure, dans l'Yonne, par des Néandertaliens de culture châtelperronienne, il y a environ 40 000 ans. Ces objets n'ont pas été ramassés, ni échangés avec des hommes modernes de culture aurignacienne qui vécurent dans la même région au cours de la même période. On a en effet

découvert, dans les mêmes couches sédimentaires, des déchets de leur fabrication : des épiphyses (les parties renflées situées aux extrémités des os) d'ulnas de cygnes et de vautours fauves (b) portant des traces de sciage. Les déchets de fabrication d'autres outils en os (c) portent les traces caractéristiques d'une extraction de baguettes par rainurage longitudinal avec un burin en silex.



2. Les sites néandertaliens où l'on a retrouvé des traces de la culture châtelperronienne (points rouges), qui a prospéré entre 40 000 à 30 000 ans avant notre ère, sont présents dans la moitié Sud de la France et sur la côte cantabrique en Espagne.

modernes. Du moins les imprécisions des dates obtenues par la méthode du carbone 14, qui atteint ses limites pour cette période, ne permettent-elles pas encore d'affirmer une chronologie claire. Y a-t-il une relation de cause à effet, les Néandertaliens s'étant contentés d'imiter les hommes modernes ou de leur emprunter des objets sans en comprendre le véritable sens ?

Les préhistoriens partisans de cette hypothèse pensent généralement que les Néandertaliens n'étaient pas assez « intelligents » pour innover de manière autonome. L'extinction même de ces populations, il y a un peu moins de 30 000 ans, est parfois invoquée comme preuve de leur infériorité intellectuelle, biologique et culturelle.

Notre étude des objets produits dans cette période par les Néandertaliens montre, au contraire, que ces derniers ont fabriqué eux-mêmes les nouveaux objets, et avec des techniques différentes de celles des Cro-Magnons. Ainsi, quelle que soit l'origine des innovations, elles étaient parfaitement intégrées dans le psychisme individuel et collectif des Néandertaliens. Le seul examen des vestiges archéologiques ne permet pas de conclure quand à la supériorité intellectuelle de l'un des deux types humains sur l'autre.

## Une diversité culturelle

Pour la période d'il y a 50 000 à 30 000 ans, les préhistoriens ont découvert, dans toute l'Europe occidentale, des vestiges de la culture moustérienne, surtout

des outils de pierre, produits par des Néandertaliens. On trouve aussi des ensembles culturels régionaux dérivés du Moustérien : le Châtelperronien en France et en Espagne, l'Uluzzien en Italie, le Lincolnién en Angleterre, le Lezianowicien en Belgique et en Allemagne. Ces ensembles culturels sont superposés, à des époques différentes selon les régions européennes, par la culture aurignacienne, œuvre de l'homme moderne.

En 1996, Jean-Jacques Hublin, alors au Laboratoire d'anthropologie biologique du CNRS au Musée de l'homme, et ses collègues ont montré qu'un os temporal d'enfant, découvert dans les niveaux châtelperroniens de la grotte du Renne d'Arcy-sur-Cure, dans l'Yonne, appartenait à un Néandertalien. Cette découverte, avec celle d'un squelette de Néandertalien dans des couches châtelperroniennes à Saint-Césaire, en Charente, confirme que les Néandertaliens sont les auteurs du Châtelperronien et, probablement, d'autres ensembles culturels de cette période de transition. La continuité technique entre ces cultures et le Moustérien est un indice supplémentaire de leur origine néandertalienne.

Les niveaux châtelperroniens de la grotte du Renne, fouillés à la fin des années 1970 sous la direction d'André Leroi-Gourhan, ont aussi livré un ensemble d'objets de parure comprenant des dents de divers animaux, perforées ou rainurées, et des pendentifs en coquillage, en os et en ivoire. Des tubes en os d'oiseau portent des entailles régulièrement espacées. De telles gravures décorent aussi des côtes de grands herbivores. Plusieurs de ces objets portent des traces d'ocre.

Sept autres sites châtelperroniens ont livré des objets de parure comprenant des dents perforées et sciées, des coquillages perforés, ainsi que des fragments osseux décorés de groupes d'incisions alignées et équidistantes. Les sites uluzziens contemporains, dans la péninsule italienne, contiennent aussi

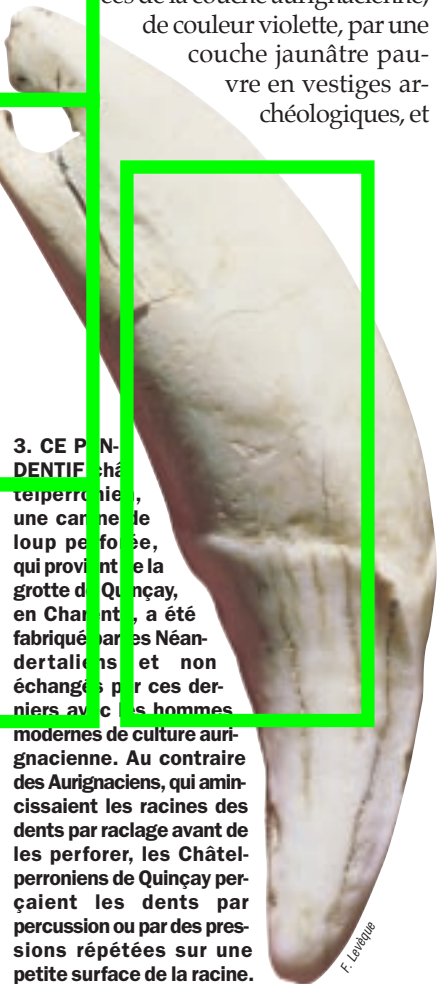
des pendentifs en os décorés d'entailles et des coquillages perforés.

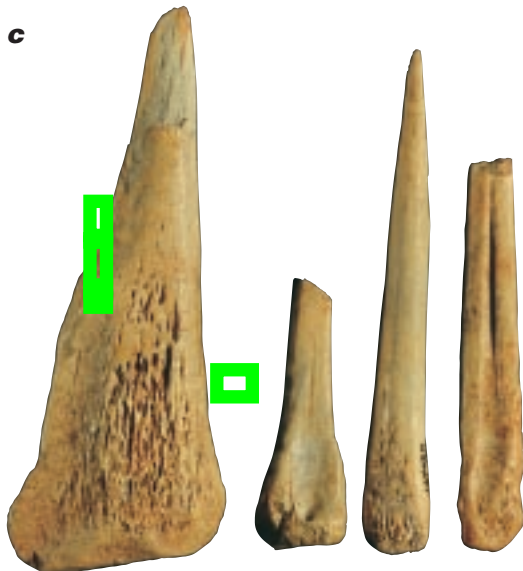
## Des créations néandertaliennes ?

De nombreux préhistoriens pensaient que les Néandertaliens avaient été incapables de produire eux-mêmes des objets de parure ou des objets décorés. Des bouleversements du sol avaient-ils introduit des éléments aurignaciens dans des couches châtelperroniennes sous-jacentes ? Ou ces objets avaient-ils été façonnés par les hommes modernes, de culture aurignacienne, puis ramassés par les Néandertaliens ou échangés lors d'un troc ?

Nous avons réexaminé la stratigraphie et le matériel archéologique de la Grotte du Renne : l'industrie osseuse et les objets de parure découverts dans les niveaux châtelperroniens de ce site ne proviennent pas des niveaux supérieurs aurignaciens. Les couches châtelperroniennes les plus riches, fortement imbibées d'ocre, sont séparées de la couche aurignacienne, de couleur violette, par une couche jaunâtre pauvre en vestiges archéologiques, et

3. CE PENDENTIF châtelperronien, une canine de loup perforée, qui provient de la grotte de Quinçay, en Charente, a été fabriqué par les Néandertaliens et non échangé par ces derniers avec les hommes modernes de culture aurignacienne. Au contraire des Aurignaciens, qui amincissaient les racines des dents par raclage avant de les perforer, les Châtelperroniens de Quinçay perçaient les dents par percussion ou par des pressions répétées sur une petite surface de la racine.





par un niveau stérile. En outre, contrairement à ce que l'on attendrait dans le cas d'un remaniement du sédiment, les outils en os et les objets de parure sont beaucoup plus abondants dans les couches châtelperroniennes que dans les couches aurignaciennes. Enfin, on n'observe aucun mélange entre les deux cultures pour les outils en pierre.

La présence, dans les couches châtelperroniennes, d'objets en os et en ivoire ne résulte pas non plus d'échanges avec des hommes modernes : on trouve, dans les mêmes couches, des déchets du travail de ces matières, qui attestent d'une production locale. Cette dernière est aussi confirmée par le raccordement de la partie centrale d'une ulna de cygne, sciée pour obtenir un tube en os, et l'extrémité du même os.

Une récente étude des dents châtelperroniennes percées de Quinçay, en Charente, aboutit à la même conclusion : les Néandertaliens produisaient eux-mêmes ces objets. D'une part, l'absence de traces de la présence postérieure d'hommes modernes sur ce site exclut toute possibilité d'une intrusion de ces objets à partir de couches plus récentes. D'autre part, la technique utilisée par les Châtelperroniens de Quinçay pour perforer les dents d'animaux et les transformer en éléments de parure diffère de celles pratiquées par les Aurignaciens. Au contraire des Aurignaciens, qui amincissaient les racines de dents par raclage avant de les perforer, les Châtelperroniens de Quin-

**4. LES POINÇONS EN OS CHÂTELPERRONIENS** de la grotte du Renne, à Arcy-sur-Cure, dans l'Yonne, ont été fabriqués en utilisant trois techniques (le plus long, en haut, mesure une douzaine de centimètres). Certains os longs de différentes espèces sont transformés en poinçons en modifiant par raclage la morphologie naturellement pointue du support (a). D'autres poinçons ont été réalisés en appointant avec un silex l'extrémité d'un éclat de diaphyse (la partie centrale de l'os) obtenue par fracturation d'os longs de mammifères de taille moyenne (b). Les poinçons les plus perfectionnés (c) révèlent une parfaite connaissance de la structure de l'os. Après l'extraction du support par la technique du rainurage au silex, une partie de l'épiphyse, riche en os spongieux, est transformée en poignée de l'outil ; le milieu de la diaphyse, où l'os est plus résistant, est utilisé pour façonner la pointe.

çay perceaient les dents par percussion ou par des pressions répétées sur une petite surface de la racine.

Les outils châtelperroniens en os de la grotte du Renne, dont nous poursuivons l'étude, sont aussi perfectionnés que ceux fabriqués par les Aurignaciens. Loin d'être des imitations à pauvres, les choix techniques châtelperroniens sont originaux et variés. Ainsi, des poinçons en os, utilisés vraisemblablement pour percer des peaux, ont été fabriqués avec plusieurs méthodes, adaptées à la nature de l'os lui-même (voir la figure 4).

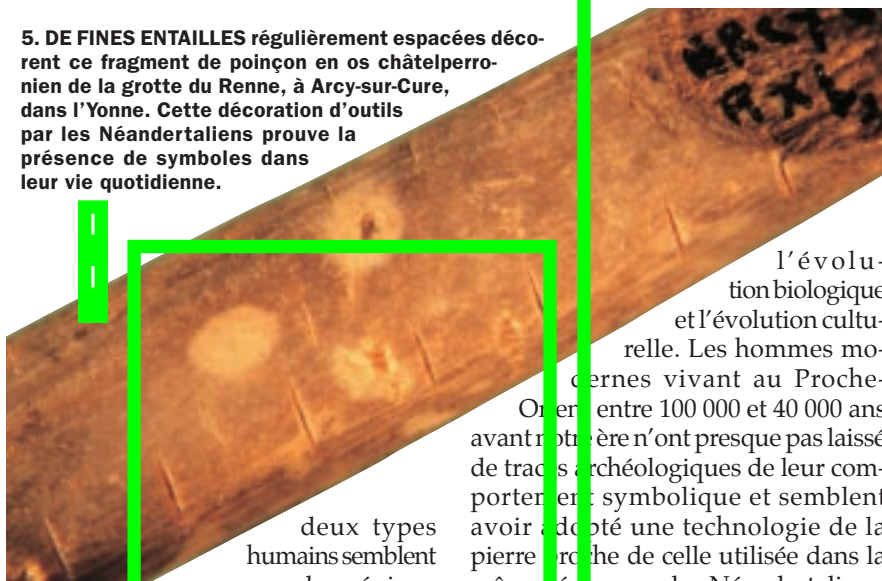
## Des symboles quotidiens

L'«intelligence technique» des Néandertaliens semble donc équivalente à celle des hommes modernes. En outre, les objets découverts à Arcy-sur-Cure nous révèlent les aspects symboliques de la pensée des Néandertaliens. Un nombre jusqu'ici insoupçonné de poinçons étaient en effet originellement décorés de fines entailles régulièrement espacées (voir la figure 5), presque complètement effacées par l'intense utilisation de ces objets. La présence d'un décor sur des outils domestiques semble indiquer que chez les derniers Néandertaliens, comme chez les hommes modernes du début du Paléolithique supérieur, les symboles imprégnaient tous les aspects de la vie du groupe.

Nous pouvons donc, sans trop de risques, interpréter les objets de parure du Châtelperronien comme l'expression de codes destinés à traduire des messages complexes : comme chez les chasseurs-cueilleurs actuels, la présence, l'absence, l'association et la position de ces objets sur le corps informaient probablement sur l'âge, le genre, le statut social et l'appartenance ethnique du porteur. Des sépultures découvertes au Proche-Orient avaient déjà révélé que, dès 100 000 ans avant notre ère, les Néandertaliens et les Cro-Magnons enterraient également leurs morts. Nous n'avons donc aujourd'hui aucune raison de penser que la pensée symbolique des Néandertaliens était moins développée que celle des Cro-Magnons de la même époque.

La reconnaissance aux Néandertaliens de ces capacités remet en question leur cohabitation avec les hommes modernes en Europe occidentale, à l'exception de la péninsule ibérique, où les

**5. DE FINES ENTAILLES** régulièrement espacées décorent ce fragment de poinçon en os châtelperronien de la grotte du Renne, à Arcy-sur-Cure, dans l'Yonne. Cette décoration d'outils par les Néandertaliens prouve la présence de symboles dans leur vie quotidienne.



F. d'Errico / D. Baffier

deux types humains semblent occuper des régions voisines sans s'influencer mutuellement. Ainsi, le réexamen des techniques de taille de la pierre du Châtelperronien et de l'Uluzzien révèle que, contrairement à l'opinion la plus répandue, il n'existe pas de preuves d'adoption ou d'absorption des techniques lithiques des Aurignaciens par les derniers Néandertaliens. Il s'agit plutôt d'un processus indépendant d'invention de façons différentes de résoudre des problèmes techniques similaires.

Ce résultat concorde avec les répartitions chronologique et géographique de l'Aurignacien, du Châtelperronien, de l'Uluzzien et des dernières occupations moustériennes en Europe occidentale. D'autre part, l'analyse critique des sites indique que l'interstratification des niveaux occupés par les deux types humains, qui aurait démontré leur cohabitation prolongée dans la même région, résulterait de remaniements postérieurs.

Un autre modèle se dessine : il n'existe pas de relation univoque entre

l'évolution biologique et l'évolution culturelle. Les hommes modernes vivant au Proche-

Orient, entre 100 000 et 40 000 ans avant notre ère n'ont presque pas laissé de traces archéologiques de leur comportement symbolique et semblent avoir adopté une technologie de la pierre proche de celle utilisée dans la même région par les Néandertaliens. Les comportements culturels «modernes» émergent presque à la même époque chez les deux types d'hommes, après une longue période caractérisée, dans les deux groupes, par une continuité dans la technologie de la pierre taillée, l'absence de travail de l'os et la rareté des objets pouvant témoigner de comportements non utilitaires ou symboliques.

Les sociétés constituées par ces deux types humains se sont-elles engagées de manière autonome, à partir de 50 000 ans avant notre ère, dans une évolution déterminant l'adoption de nouvelles techniques et d'objets destinés à marquer des rôles sociaux ou des différences ethniques ? La rencontre entre ces sociétés a-t-elle provoqué des échanges qui auraient accéléré des processus déjà engagés avant le contact ? Nous n'avons en tout cas aucune raison de penser que les Néandertaliens aient été en situation d'infériorité cognitive ou intellectuelle dans de tels échanges.

Francesco d'ERRICO est chargé de recherche à l'UMR 5808 du CNRS, à Talence. Michèle JULIEN et Dominique BAFFIER sont respectivement directeur de recherches et ingénieur d'études au Laboratoire d'ethnologie préhistorique du CNRS, à Nanterre.

J.-J. HUBERT, P. STÖCK, M. BRÜHN, F. ZONNEVELD et S. CONDEMI, *A bone Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts*, in *Nature*, vol. 381, pp. 224-226, 1996.

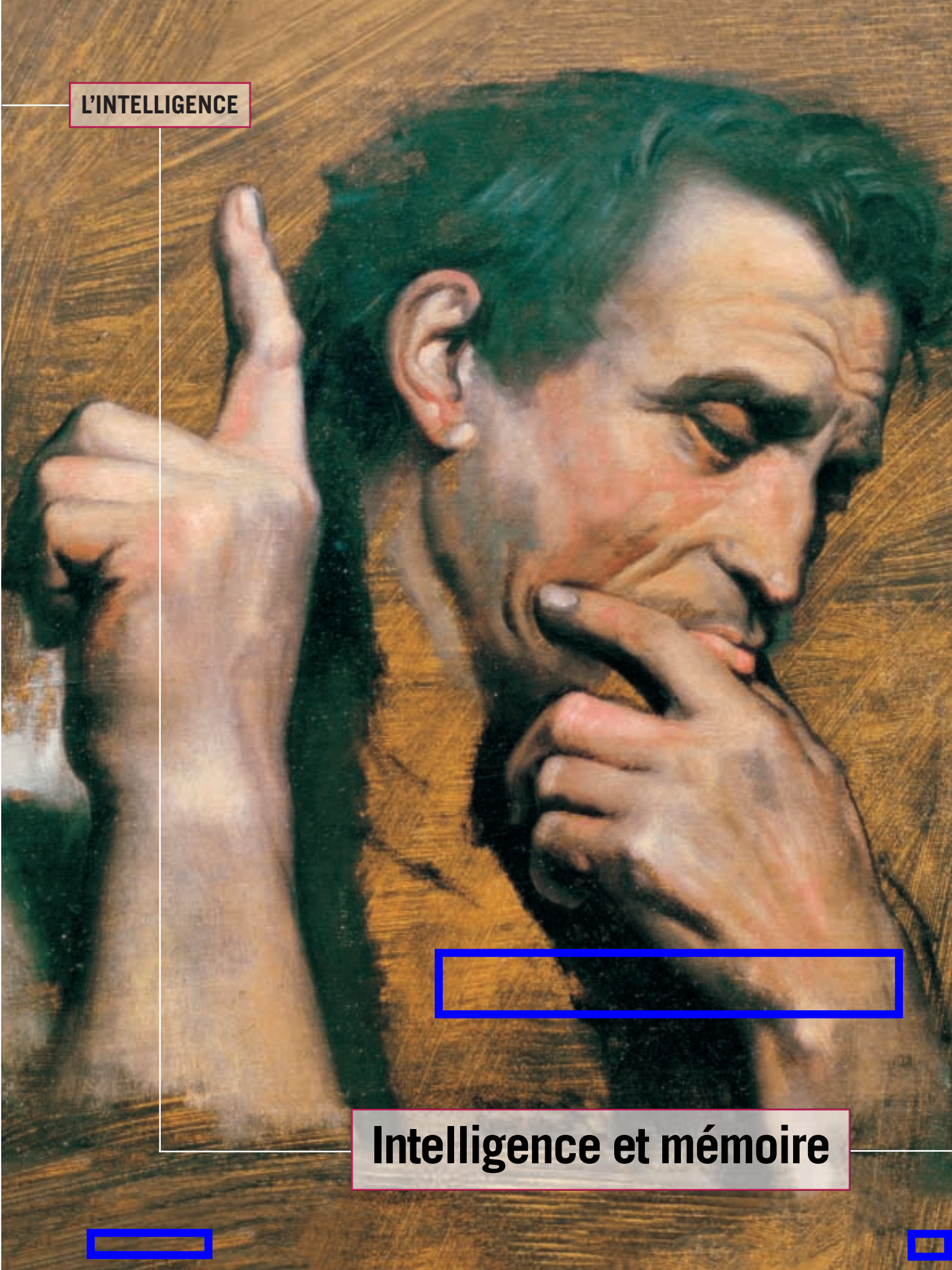
J.-M. GRANGER et F. LÉVÊQUE, *Parure châtelperronienne et aurignacienne : étude*

*de trois séries inédites de dents percées et comparaisons*, in *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, vol. 325, pp. 537-543, 1997.

D. BAFFIER, *Neanderthals associated with Upper Palaeolithic artefacts*, in *Nature*, vol. 394, pp. 719-721, 1998.

F. d'ERRICO, J. ZILHAO, M. JULIEN, D. BAFFIER, J. PELEGRIN, *Neanderthal acculturation in Western Europe ? A critical review of the evidence and its interpretation*, in *Current Anthropology*, vol. 39, pp. 1-44, 1998.

P. MELLARS, *The Fate of the Neanderthals*, in *Nature*, vol. 395, pp. 639-640, 1998.



L'INTELLIGENCE

Intelligence et mémoire



# Plasticité cérébrale et apprentissage

JEAN-PIERRE CHANGEUX

*L'acétylcholine, un neurotransmetteur, et son analogue, la nicotine, modulent l'apprentissage et les empreintes moléculaires de la mémoire dans le cerveau.*

Si le <sup>XX</sup><sup>e</sup> siècle a été celui de l'atome et de la biologie moléculaire, le <sup>XXI</sup><sup>e</sup> sera celui du cerveau. Les raisons d'un tel espoir se fondent sur l'évolution théorique et expérimentale qui s'est concrétisée, dans les années 1970, par l'apparition du mot «neurosciences». Il n'est plus question de disciplines coisonnées. Anatomie, physiologie, biochimie, psychologie, génétique moléculaire, immunologie ou biophysique participent aujourd'hui à la compréhension des bases neuronales des fonctions supérieures du cerveau de l'homme, dont la conjugaison définit son «intelligence». Le cerveau de l'homme reste un univers complexe, qui sera peut-être, un jour, en mesure de comprendre son propre fonctionnement.

La biologie moléculaire a directement contribué à l'essor des neurosciences. Elle a, en particulier, participé à l'enrichissement du répertoire des molécules qu'utilisent les neurones dans leurs communications : plus de 40 neurotransmetteurs interviennent dans la signalisation chimique entre cellules nerveuses. Jusqu'à la fin des années 1970, on pensait que les neurones ne synthétisent qu'un seul type de neurotransmetteur, mais on sait aujourd'hui que plusieurs coexistent parfois dans un même neurone, enrichissant la palette des signaux dont dispose chaque neurone pour communiquer avec ses voisins.

Puis les récepteurs de ces neurotransmetteurs ont été découverts. Entités mythiques postulées dès 1905, ces protéines membranaires sont aujourd'hui caractérisées. Les séquences et les grands traits de l'organisation tridimensionnelle de plusieurs d'entre eux ont été établis. Les récepteurs ont été regroupés en deux grandes familles en fonction du type d'activité biologique qu'ils contrôlent. Ce sont soit des récepteurs canaux, soit des récepteurs qui interagissent avec les protéines G, les

quelles se valent de relais dans la transmission des informations à travers la membrane cellulaire.

L'acétylcholine est l'un des principaux neurotransmetteurs, au niveau périphérique (aux jonctions entre les nerfs moteurs et les muscles squelettiques) comme au niveau central. Un premier type de récepteur de l'acétylcholine, qui est aussi celui de la nicotine, est associé à un canal ionique, une structure qui sert au passage des ions d'un côté à l'autre de la membrane cellulaire. D'autres récepteurs de l'acétylcholine, les récepteurs muscariniques, sont liés aux protéines G. Après avoir décrit les récepteurs nicotiniques, nous montrerons qu'ils subissent des changements de conformation, lesquels règlent l'amplitude de la réponse au neurotransmetteur. Selon l'hypothèse que nous proposons, des changements conformationnels de ce type, de courte ou de longue durée, modulent le rythme des communications entre neurones au cours de l'apprentissage. D'une manière générale, l'apprentissage et la mémoire pourraient être liés à des modifications de récepteurs, mais d'autres processus peuvent également intervenir.

## Les récepteurs nicotiniques

Chez l'homme ou chez le primate, le cortex préfrontal est le siège principal de la «mémoire de travail», qui assure le stockage temporaire des informations et la réactualisation des informations déjà stockées par élimination des données qui ne sont pas pertinentes.

La mémoire de travail se distingue de la mémoire de référence, où sont stockées les informations «indélébiles». Des lésions de domaines définis du cortex préfrontal perturbent les performances de la mémoire de travail, notamment au cours de tâches qui nécessitent un traitement de l'information avec un effort et une attention soutenue.

La mémoire de travail et les mécanismes de l'attention nécessitent l'intégrité de l'innervation cholinergique (dont le neurotransmetteur est l'acétylcholine) du néocortex. Les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer présentent des troubles de la mémoire de travail, et leurs performances cognitives sont améliorées par des médicaments qui bloquent l'action d'une enzyme qui dégrade l'acétylcholine : par l'intermédiaire de ses récepteurs muscariniques et de ses récepteurs nicotiniques, l'acétylcholine contribue aux fonctions de mémoire. La transmission cholinergique par les récepteurs nicotiniques du cortex préfrontal joue un rôle essentiel dans les fonctions cognitives telles que la compréhension et le raisonnement.

Quels sont ces récepteurs nicotiniques ? En 1857, Claude Bernard étudia l'effet paralysant du curare, poison dont les Indiens d'Amérique du Sud se servent encore pour empoisonner leurs flèches ; il montre que le curare agit sur le système nerveux périphérique, et qu'il entraîne la mort par asphyxie en bloquant l'action des nerfs moteurs qui commandent les muscles respiratoires. Plus tard, un de ses disciples, le Britannique John Newport Langley montra que la nicotine appliquée à forte concentration sur un muscle en provoque la contraction, et que le curare inhibe l'effet de la nicotine. Sur la base de ces expériences, il proposera, dès 1905, qu'il existe à la surface du muscle une «substance réceptrice» qui reconnaît la nicotine et le curare. Il faudra attendre les années 1970, pour que le concept de récepteur se matérialise avec l'identification du récepteur de l'acétylcholine.

Nous avons isolé le récepteur de l'acétylcholine à partir de l'organe électrique du gymnote, un poisson redouté pour ses décharges électriques puissantes (trois décharges de gymnote tuent un homme). Ces décharges correspondent à la mise à feu simultanée

de milliards de synapses dont le neurotransmetteur est l'acétylcholine. L'organe électrique constitue une source exceptionnellement riche et homogène de récepteurs, qui permet sa purification en quantités suffisantes et l'identification de l'organisation moléculaire et de la séquence (voir la figure 2). Les récepteurs de l'acétylcholine sont présents non seulement dans l'organe électrique des gymnotes, mais aussi à la jonction neuromusculaire et dans le cerveau de l'homme, et ils ont une structure très voisine.

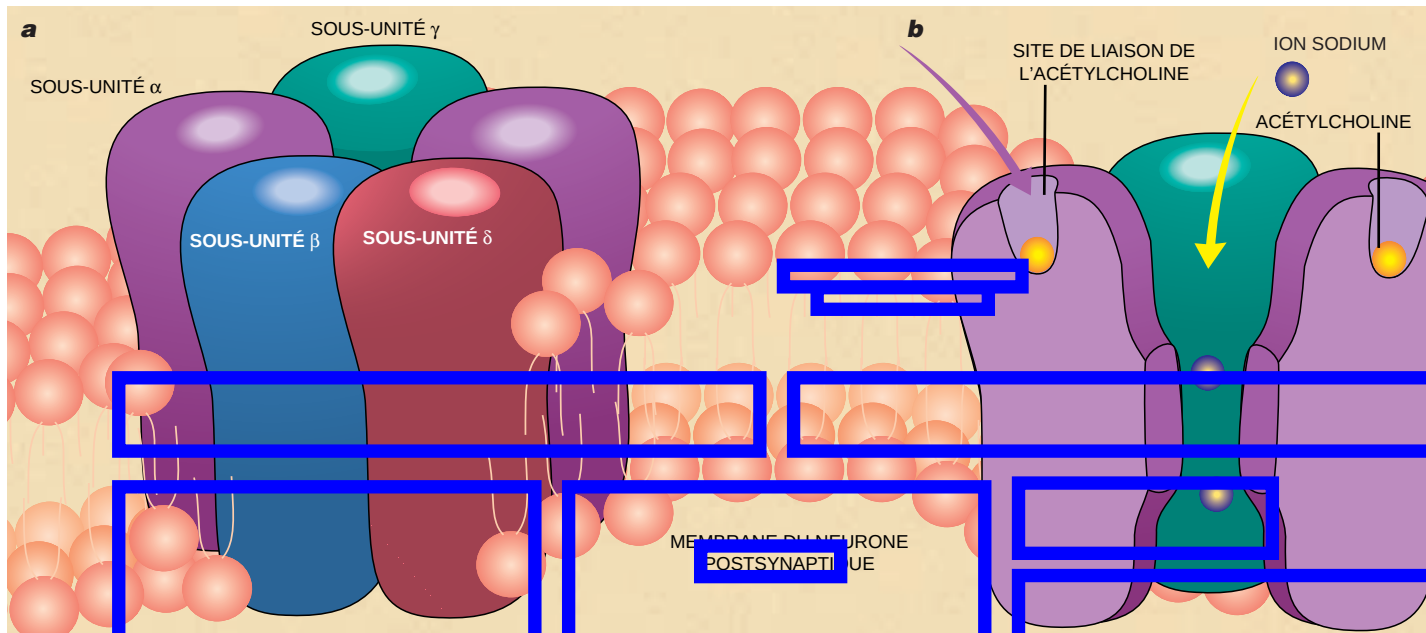
Les canaux ioniques ouverts par l'acétylcholine et par d'autres neurotransmetteurs excitateurs comme le glutamate, laissent passer des ions sodium, potassium ou calcium, chargés positivement. Ils produisent alors une dépolarisation de la membrane synaptique (la différence de potentiel qui règne de part et d'autre de la membrane de la cellule nerveuse s'annule). Ceux qui laissent passer des ions chargés négativement, comme le chlore, ont l'effet inverse ; ce sont des neurotransmetteurs inhibiteurs, tels la glycine et le

GABA. Dans tous les cas, la transduction d'un signal chimique en un signal électrique engage l'ouverture d'un canal ionique (correspondant à une activation). Il y a ouverture d'une porte ionique par une cleu-neurotransmetteur.

Au niveau du contact entre cellules nerveuses, ou synapses, lorsqu'une impulsion électrique envahit la terminaison nerveuse, le neurone libère une bouffée de molécules de neurotransmetteur (environ trois millions de molécules d'acétylcholine à la jonction neuromusculaire). Le



**1. LE FUMEUR** des *Joueurs de cartes* de Paul Cézanne (peint entre 1890 et 1892) se concentre grâce à la nicotine contenue dans le tabac, qui améliore les facultés d'attention et la mémoire de travail.



**2. LE RÉCEPTEUR DE L'ACÉTYLCHOLINE** est associé à un canal ionique (a), qui est constitué de cinq sous-unités nommées alpha (α), bêta (β), gamma (γ) et delta (δ). Lorsque l'acétylcholine se fixe sur l'un de ses deux sites de liaison, le canal s'ouvre, laissant les ions sodium pénétrer dans la cellule postsynaptique (b). Rapidement l'acétylcholine se dissocie de son site, le canal se referme, et le sys-

volume de la fente synaptique (l'espace qui sépare le neurone présynaptique du neurone postsynaptique) étant très modeste, la concentration locale d'acétylcholine augmente brusquement et pendant un temps très bref. Il en résulte une impulsion chimique de haute concentration qui franchit l'espace synaptique en moins d'une milliseconde avant d'atteindre les molécules de récepteur, situées sur la face postérieure de la synapse.

Dès que le neurotransmetteur se fixe à son récepteur, le canal ionique s'ouvre, laissant passer des ions qui modifient la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane du neurone postsynaptique. Le message électrique véhiculé par le neurone présynaptique a d'abord été transformé en message chimique, lequel est à nouveau traduit en message électrique par le neurone postsynaptique.

L'affinité de l'acétylcholine pour son récepteur est, en général, faible, et le neurotransmetteur se dissocie rapidement de son site de liaison : le canal se referme. Le récepteur est prêt à fonctionner à nouveau, sans temps mort. Les paramètres physico-chimiques de l'interaction récepteur-neurotransmetteur sont ajustés pour une transmission rapide, fiable et répétitive.

Toutefois, quand le neurotransmetteur est appliqué sur la membrane

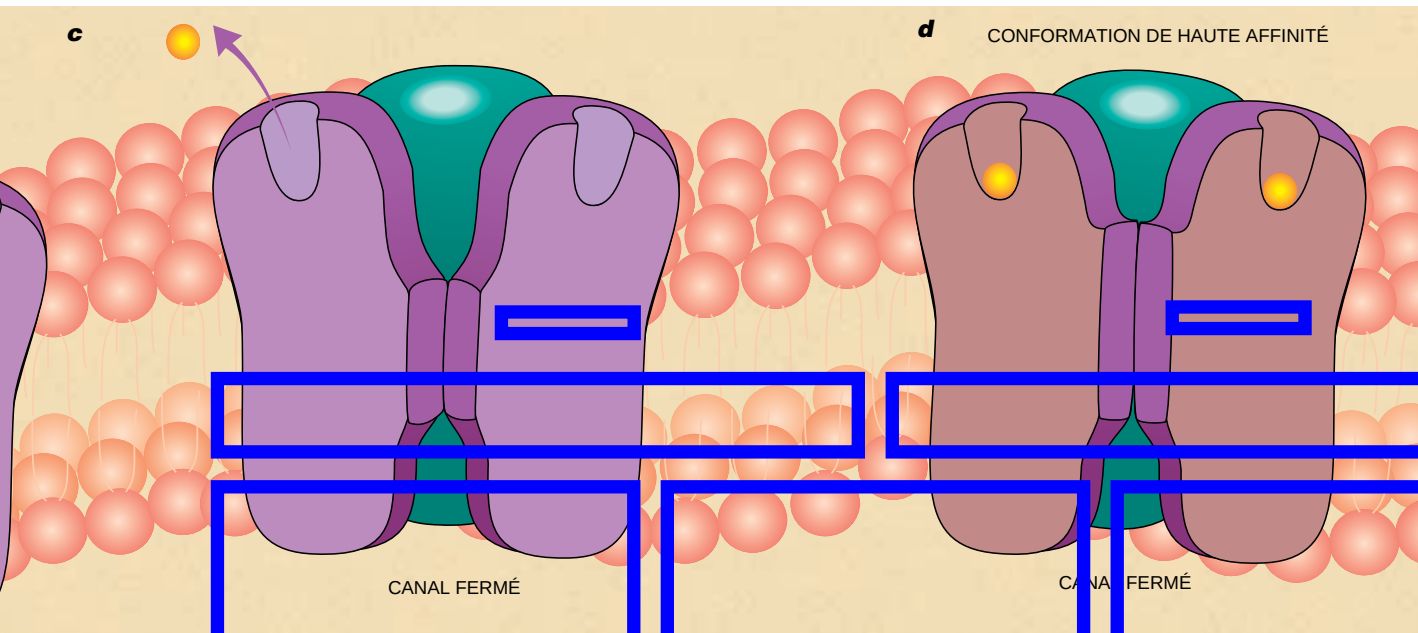
postsynaptique de manière prolongée, l'amplitude de la réponse diminue lentement. Cette

«désensibilisation» de la réponse se manifeste entre quelques centaines de secondes et plusieurs minutes. Dans ces conditions, le récepteur ne répond plus à l'acétylcholine : il est désensibilisé ou réfractaire. Normalement l'acétylcholine a une faible affinité pour son récepteur. Au contraire, quand le récepteur est réfractaire, c'est que l'acétylcholine y est fixée avec une affinité particulièrement élevée. Dans ces conditions, la dissociation du neurotransmetteur est lente, et la transmission des signaux chimiques émis par le neurone présynaptique est bloquée.

Ainsi, les récepteurs nicotiniques présentent spontanément au moins trois conformations différentes : la conformation fermée, la conformation ouverte et la conformation réfractaire. Ces états sont interconvertibles, mais dans des délais différents. Ils ne sont pas restreints aux récepteurs de l'acétylcholine : on les retrouve pour la plupart des récepteurs liés à un canal ionique (glutamate, GABA, glycine), mais aussi pour les récepteurs liés aux protéines G. L'existence de cette flexibilité conformationnelle introduit une plasticité fonctionnelle des récepteurs, certes à court terme, mais critique dans les communications entre cellules nerveuses.

## Un commutateur moléculaire

Les transitions conformationnelles d'activation et de désensibilisation ont été analysées par diverses méthodes physico-chimiques. On peut les reproduire dans le tube à essai avec des fragments de membrane synaptique et suivre la dynamique des transitions entre états avec un analogue fluorescent de l'acétylcholine. Thierry Heidmann, dans mon laboratoire, a démontré que l'état désensibilisé lie l'acétylcholine, même si celle-ci n'est présente qu'en très faible quantité (à des concentrations beaucoup plus faibles que l'état de repos ou que l'état actif). Son affinité pour le neurotransmetteur est plus de 100 fois élevée que celle de la conformation active et de la conformation de repos. Le chercheur britannique Nigel Urwin a même pu distinguer ces états à l'aide d'une méthode de microscopie électronique très élaborée : lors de la transition vers l'état ouvert, les segments polypeptidiques qui bordent les parois du canal et sont enroulés en hélice, passent d'une conformation brisée à une conformation linéaire. Au contraire, le passage vers l'état désensibilisé s'accompagne d'une réorganisation plus globale de la molécule qui modifie la disposition relative des sous-unités du récepteur.



tème est prêt à fonctionner à nouveau (c). Le récepteur peut aussi prendre d'autres conformations, pour lesquelles l'affinité du neuro-transmetteur augmente : le récepteur devient réfractaire, c'est-à-dire

qu'il reste fermé en présence d'acétylcholine (d). Selon l'hypothèse proposée, des changements de conformation de ce type participent à la plasticité neuronale et à la mémoire.

Ces transitions entre conformations moléculaires distinctes ressemblent aux transitions «allostériques», mises en évidence, dans les années 1960, avec des enzymes bactériennes, alors que j'étais l'élève de Jacques Monod. Enzymes et récepteurs régulateurs servent de commutateurs moléculaires. Dès 1982, avec U. Heidmann, nous avons supposé que les transitions lentes vers des états réfractaires de haute affinité pouvaient jouer un rôle dans la régulation de l'efficacité des synapses à transmettre un signal. La conversion lente vers l'état désensibilisé pourrait représenter une première «trace de mémoire» au niveau moléculaire.

### Détecteurs de coïncidences

De surcroît, les récepteurs des neurotransmetteurs pourraient servir à détecter des coïncidences temporelles, comme le supposait le neurophysiologue canadien Donald Hebb, d'une manière beaucoup plus générale, en 1949, dans sa théorie de l'apprentissage. Cette capacité pourrait résulter d'une propriété partagée par la plupart des récepteurs : ils possèdent plusieurs sites de reconnaissance de signaux moléculaires différents et ils en intègrent les effets. Par exemple, les récepteurs neuronaux de l'acétylcholine portent, sur leur face synap-tique, en plus des sites de liaison du

neurotransmetteur, des sites de liaison du calcium et, sur leur face interne, en contact avec le milieu interne du neurone postsynaptique, des sites susceptibles d'être phosphorylés par des enzymes cytoplasmiques (ces enzymes ajoutent des groupes phosphate).

Le calcium a un double rôle de modulateur, selon qu'il s'agit du calcium localisé dans la fente synaptique ou du calcium situé dans le neurone postsynaptique. Le calcium de la fente synaptique règle la fréquence d'ouverture des récepteurs nicotiniques : c'est un régulateur de l'efficacité synaptique. Quand il entre dans le neurone postsynaptique, par une autre voie, indépendamment, il déclenche un système de signalisation intracellulaire : par exemple, les réactions de phosphorylation. La transition concertée et rigide du récepteur va «lire» la coïncidence entre les deux voies et contribuer à une modulation à plus long terme.

On connaît une douzaine de sous-unités pour le récepteur nicotinique, qui se combinent pour donner des propriétés physiologiques et pharmacologiques variées. La combinatoire de ces différentes espèces chimiques et de leurs diverses conformations offre d'innombrables «modulations» possibles. Selon l'hypothèse que nous proposons, ces mécanismes participent à la plasticité cérébrale à court terme des informations et à leur stockage à long terme.

Les mécanismes cellulaires et moléculaires qui sous-tendent l'apprentissage et la mémoire ont été étudiés dans des organismes simples, telle la drosophile, ou dans des structures limitées du cerveau, tel l'hippocampe. Toutefois, la difficulté est grande lorsqu'il s'agit de relier les observations faites au niveau moléculaire sur ces systèmes élémentaires avec le comportement d'un organisme plus évolué et avec ses fonctions cognitives.

Pour contourner cette difficulté, nous avons d'abord élaboré avec Stanislas Dehaene, des modèles formels d'organismes artificiels, qui paraissent plausibles sur le plan neurobiologique et qui sont capables d'effectuer des tâches de mémoire cognitive. Ces modèles servent de passer directement du niveau moléculaire au niveau cognitif sans prendre en compte la complexité d'organisation du système nerveux central. En particulier, ils mettent en place les récepteurs allostériques à des positions critiques du réseau. Toutefois, ces schémas restent encore très spéculatifs. Afin de les mettre à l'épreuve, nous avons tenté d'abord avec Sylvie Granon et Catherine Vidal, puis avec Marina Picciotto, d'examiner les conséquences sur le comportement d'apprentissage soit le blocage, soit même de l'inactivation totale de récepteurs nicotiniques spécifiques dans le cerveau.

## L'inhibition et l'inactivation des récepteurs nicotiniques

Quelles sont les conséquences de l'inhibition des récepteurs de l'acétylcholine par un agent pharmacologique sur les mécanismes d'apprentissage cognitifs? Pour le savoir, nous avons injecté dans le cortex préfrontal de rat des antagonistes spécifiques des récepteurs nicotiniques et, en parallèle, à titre de contrôle, un antagoniste des récepteurs muscariniques. Nous avons utilisé un labyrinthe en T à deux branches.

Quand on place un rat dans un labyrinthe de ce type et qu'il trouve de la nourriture à l'extrémité de l'une des branches du T, le rat a spontanément tendance à explorer l'autre branche au cours de l'expérience suivante. Ce comportement exploratoire inné, qui s'est développé au cours de l'évolution, est «intelligent». De manière quelque peu naïve, on peut dire que, dans la nature, quand une source de nourriture a été découverte, elle risque d'être rapidement épuisée, et l'animal a peu de chances de trouver de la nourriture au même endroit, quelques jours plus tard.

Dans un second temps, on impose à l'animal un «effort», puisqu'on ne lui donne de la nourriture que s'il revient dans le même bras que celui où se trouvait la nourriture, la première fois. Après plusieurs essais, le rat apprend à aller contre son «instinct» et réussit le test.

La réussite de cette tâche de réponse différée dépend de l'intégrité du cortex préfrontal, la partie la plus évoluée

du cortex cérébral chez les mammifères. Mieux, un antagoniste spécifique du récepteur nicotinique bloque sélectivement la tâche qui demande un effort, mais pas la conduite instinctive. En revanche, les deux conduites sont également inhibées par un antagoniste du récepteur muscarinique.

Ainsi l'inhibition des récepteurs nicotiniques perturbe la sélection de la réponse correcte dans les tâches qui demandent un effort : ces récepteurs nicotiniques contribuent très sélectivement à la mémoire à court terme dans ces tâches particulières. Une autre façon d'étudier le rôle des récepteurs nicotiniques dans la mémoire consiste à inactiver sélectivement, *in vivo* et de manière irréversible, le gène codant l'une des sous-unités du récepteur nicotinique cérébral, puis à étudier le comportement d'apprentissage de ces souris mutantes.

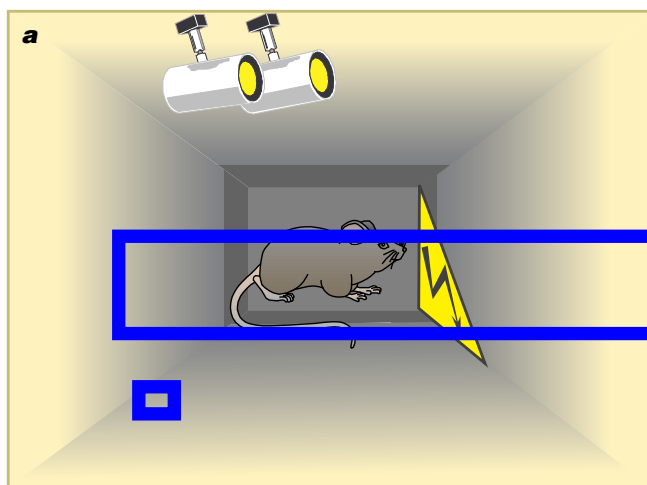
M. Nicototto, dans mon laboratoire, a étudié le comportement de souris, chez lesquelles on a éliminé le gène codant la sous-unité bêta2 ( $\beta_2$ ) du récepteur nicotinique. Ces souris se développent et se reproduisent normalement, bien qu'elles aient perdu le récepteur qui lie la nicotine avec une haute affinité. Des différences apparaissent lorsque l'on étudie leurs réactions au cours d'un test d'apprentissage par évitement passif.

On place les souris dans une boîte séparée en deux compartiments, l'un éclairé et l'autre sombre. Spontanément, les souris se réfugient dans la zone sombre, mais, quand elles y pénètrent, elles reçoivent un léger choc élec-

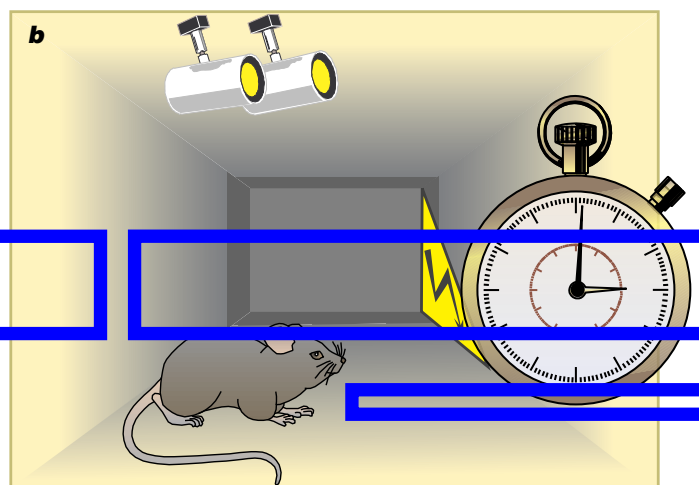
trique sur les pattes. Immédiatement après, on leur injecte soit une solution de nicotine, soit du sérum physiologique. Le lendemain, on replace les souris dans l'espace éclairé de la boîte à deux compartiments. La souris qui a «appris» reste plus longtemps dans le compartiment éclairé, afin d'éviter le choc électrique. Les souris qui ont reçu de la nicotine restent encore plus longtemps dans la nicotine a consolidé la mémoire à court terme. Lorsque l'on fait passer les tests aux souris mutantes, on constate que la nicotine n'a plus d'effet sur la rétention de la mémoire du choc électrique. Le résultat était prévisible, puisqu'elles n'ont plus de récepteur de haute affinité pour la nicotine. Plus surprenant, elles paraissent avoir une «meilleure mémoire» que les souris sauvages, en l'absence de nicotine. Le phénomène n'est pas encore bien compris, mais la conclusion de l'expérience est claire : l'acétylcholine endogène et les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine interviennent dans cette tâche de mémoire à court terme.

## Nicotine, récompense et dépendance

Dans les expériences de réponse différée, on donne de la nourriture aux rats qui réussissent le test, ce qui active le «système de récompense». Dans les expériences d'évitement passif, les souris reçoivent, au contraire, une punition (le choc électrique dans l'expérience précédente). Nous pensons



**3. LE COMPORTEMENT DES SOURIS** renseigne sur le rôle des récepteurs nicotiniques dans la mémoire. Lorsqu'une souris est placée dans une cage à deux compartiments, l'un éclairé (au premier plan) et l'autre sombre (à l'arrière-plan), elle se réfugie spontanément



dans la zone obscure (a). Dès que la souris entre dans le compartiment obscur, elle reçoit une légère décharge électrique. Le lendemain, si l'on replace la souris dans la cage, elle se souvient de la douleur et reste dans la zone éclairée pendant quelques minutes (b). Quand

que l'acétylcholine, avec d'autres neurotransmetteurs, intervient dans les systèmes de récompense/punition. Un processus de ce type pourrait expliquer la dépendance des fumeurs vis-à-vis de la nicotine (la nicotine se fixerait sur les récepteurs de l'acétylcholine, activant le circuit de la récompense). Le système dopaminergique mésolimbique et, notamment, ses projections vers une région cérébrale particulière, nommée le noyau accumbens, sont considérés comme un «tronc commun» neuronal engagé dans la dépendance aux drogues, tels l'alcool, la cocaïne, la morphine et les amphétamines. Très étudiés, en particulier par des chercheurs suédois, ces neurones participeraient aux processus de dépendance. Ils modifieraient en particulier l'état d'activation de neurones qui commandent les émotions et certains comportements de «plaisir».

En fait, l'administration de nicotine déclenche la libération de dopamine dans le noyau accumbens en agissant sur des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine localisés sur les corps cellulaires ou sur les terminaisons des neurones dopaminergiques. Elle stimule aussi la consommation locale de glucose, comme le font les drogues qui déclenchent une dépendance grave. Parmi toutes les sous-unités possibles des récepteurs nicotiniques, six sont exprimées par les neurones dopaminergiques du noyau accumbens.

En collaboration avec notre groupe, Emilio Merlo Pich, des laboratoires

Glaxo, a tenté d'identifier laquelle de ces sous-unités contrôle la libération de dopamine chez la souris, dans des conditions qui rappellent le comportement des fumeurs invétérés de tabac. Le dispositif expérimental est celui de l'auto-administration de drogue : les souris ont accès à une pédale sur laquelle elles peuvent appuyer pour recevoir une injection de nicotine, laquelle active le système mésolimbique dopaminergique. Pour tester le rôle de la sous-unité  $\beta_2$  qui entre dans la composition des récepteurs nicotiniques de haute affinité, nous avons étudié le comportement d'auto-administration de nicotine chez les souris mutantes dépourvues de ces sous-unités.

D'abord on entraîne les souris à s'auto-administrer de la cocaïne, puis on remplace cette drogue par de la nicotine. Les souris normales continuent à s'auto-administrer la nicotine, remplaçant ainsi la cocaïne par la nicotine. À l'inverse, les souris mutantes abandonnent rapidement l'auto-administration ce qui montre que les sous-unités  $\beta_2$  des récepteurs nicotiniques de haute affinité participent à l'effet de dépendance vis-à-vis de la nicotine.

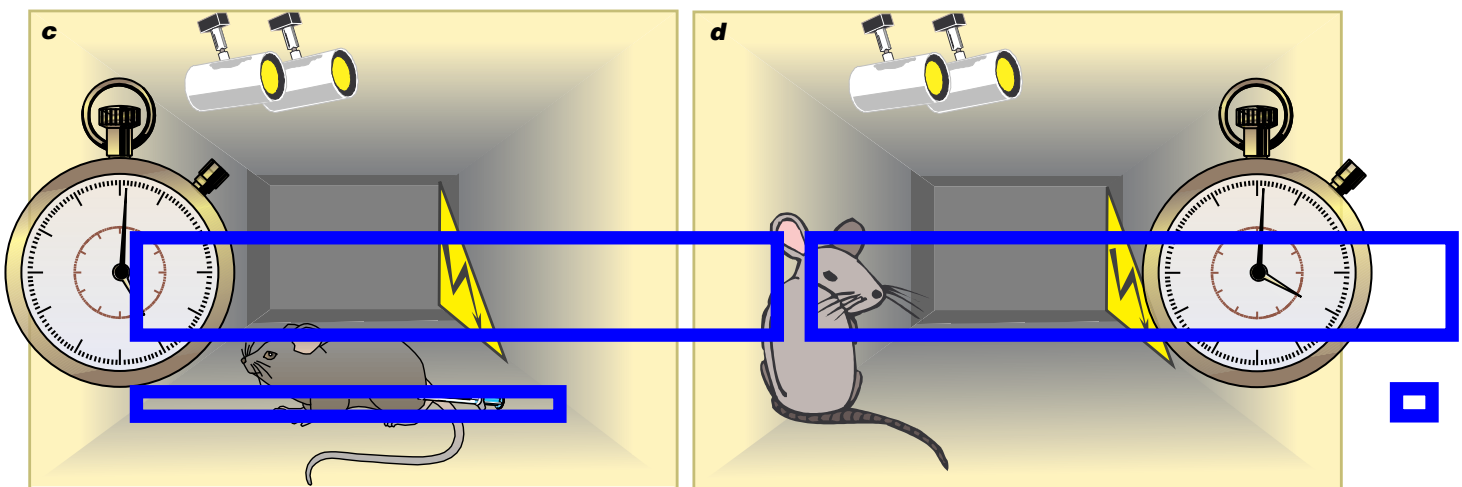
Bien que l'on ignore encore le site où ont lieu les modifications responsables de la tolérance et de la dépendance, on peut supposer que les propriétés moléculaires des récepteurs nicotiniques eux-mêmes, notamment leurs transformations allostériques, y participent. Il faut noter, toutefois, que

nous sommes encore loin d'avoir fait le lien entre les propriétés allostériques des récepteurs nicotiniques et l'auto-administration de nicotine, mais cette hypothèse sera prochainement mise à l'épreuve : il ne s'agira plus d'inactiver le gène codant la sous-unité  $\beta_2$  des récepteurs nicotiniques, mais de le remplacer, *in vivo*, par un gène muté, dont le produit a des propriétés allostériques modifiées.

Ainsi le rôle des récepteurs nicotiniques se précise-t-il progressivement. Il convient désormais de les réintégrer dans les réseaux immensément complexes des neurones de notre cerveau. Les modèles réalisés avec S. Dehaene peuvent nous y aider, en particulier parce qu'ils mettent en évidence des principes d'architecture originaux, engagés dans l'auto-évaluation et dans la prise de décision à l'occasion d'épreuves d'apprentissage cognitif. Ils soulignent, très spécifiquement, la contribution du cortex préfrontal que l'on sait recevoir une riche innervation cholinergique.

## Anomalies de la mémoire

De multiples données pharmacologiques et comportementales montrent que les systèmes cholinergiques cérébraux participent à diverses formes d'apprentissage. La biologie moléculaire des récepteurs nicotiniques cérébraux ouvre ainsi de nouvelles voies de recherche dans la biologie de ces fonctions cognitives et de leurs



on injecte à la souris, lors de la première expérience, une solution de nicotine, immédiatement après le choc électrique, elle reste plus longtemps, le lendemain, dans le compartiment éclairé : la nicotine a renforcé la mémoire à court terme (c). Enfin, quand on fait l'expé-

rience avec des souris mutantes (d) dépourvues de récepteurs nicotiniques de haute affinité, la nicotine est sans effet sur la mémoire. En revanche, elles restent plus longtemps dans le compartiment éclairé que les souris normales : leur mémoire à court terme paraît supérieure.

PIERRE THUILLIER  
**La revanche  
des sorcières**  
L'irrationnel et la pensée scientifique

BELIN

La science, nous dit-on, est «objective» et «neutre». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de «l'irrationnel». Le puritanisme rationaliste neurtent, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Mains exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites «occultes».

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

2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 194

BELIN

pathologies. Des modifications de la structure et de la distribution de ces récepteurs rendraient compte de certaines anomalies graves du fonctionnement du cerveau chez l'homme. Chez les personnes âgées ou atteintes de la maladie d'Alzheimer, qui ont des déficits de la mémoire importants, on constate un déficit sélectif des récepteurs nicotiniques cérébraux. Par ailleurs, on a découvert qu'une mutation dans le gène codant la sous-unité  $\alpha_4$  de ces récepteurs est associée à un type particulier d'épilepsie. Diverses myasthénies congénitales (provoquant une faiblesse musculaire excessive) sont dues à des mutations qui modifient les propriétés allostériques des récepteurs musculaires. Enfin, certaines formes de schizophrénie ont été mises en relation avec un déficit de la sous-unité  $\alpha_7$ . Des médicaments ayant pour cible une sous-espèce spécifique des récepteurs de l'acétylcholine soulageront peut-être un jour ces malades.

De l'organe électrique à la maladie mentale, le chemin aura été long et difficile. Il reste encore beaucoup à découvrir, mais un nouveau regard se trouve désormais posé sur les mécanismes élémentaires de l'apprentissage.

Jean-Pierre CHANGEUX est professeur au Collège de France et à l'Institut Pasteur.

S. DEHAENE, J.-P. CHANGEUX, *A Simple Model of Prefrontal Cortex Function in Delayed-Response Tasks*, in *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 1, n° 3, pp. 244-261, 1989.

S. GRANO et al., *Nicotinic and Muscarinic Receptors in the Rat Prefrontal Cortex: Differential Roles in Working Memory, Response Selection and Effortful Processing*, in *Psychopharmacology*, vol. 119, pp. 139-147, 1995.

M. PICCINOTTO et al., *Abnormal Avoidance Learning in Mice Lacking Functional High-Affinity Nicotine Receptor in the Brain*, in *Nature*, vol. 374, pp. 65-67, 1995.

C. LÉNA, J.-P. CHANGEUX, *Pathological Mutations of Nicotinic Receptors and Nicotinic-Based Therapies for Brain Disorders*, in *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 7, pp. 674-682, 1997.

S. EDELSTEIN, J.-P. CHANGEUX, *Allosteric Transitions of the Acetylcholine Receptor*, in *Advances in Protein Chemistry*, vol. 51, pp. 121-184, Academic Press, 1998.



# Les mécanismes de la mémoire

SERGE LAROCHE

*La mémoire est l'une des composantes essentielles de l'intelligence. La façon dont les souvenirs sont «imprimés» dans le cerveau se précise : chaque souvenir est associé à un assemblage spécifique, mais remodelable, de neurones.*

Les organismes vivants acquièrent, conservent et utilisent tout un ensemble d'informations ou de connaissances traitées et stockées par le système nerveux : il n'y a pas de cognition ni d'intelligence sans mémoire. Grâce à la mémoire, le passé guide notre perception du présent et nous permet d'anticiper et de nous adapter. Toutefois, la mémoire n'est pas un enregistrement passif des expériences vécues. La machine neuronale est créatrice d'information : le souvenir que nous avons d'un événement est empreint d'impressions ou d'images qui reflètent notre interprétation de cet événement et notre propre histoire, auxquelles s'ajoutent les signaux élémentaires transmis par nos sens. Ainsi, notre mémoire renferme non seulement nos perceptions, nos actions et leurs buts, mais aussi nos sentiments, notre imagination et le cheminement même de notre pensée. L'ensemble des expériences emmagasinées dans le cerveau est la marque de notre identité.

Quelle est la nature des représentations mnésiques ? Quels mécanismes président à leur construction, à leur stockage et à leur évocation ? Quel est le support neuronal et quelle est l'organisation de la mémoire ? Progressivement, les mécanismes de la mémoire se précisent. Les études neuropsychologiques de personnes dont le cerveau est lésé, ainsi que les nouvelles techniques d'imagerie qui montrent le cerveau humain en activité ont battu en brèche les anciennes théories de la mémoire.

On distingue aujourd'hui la mémoire à court terme ou mémoire de travail, et la mémoire à long terme. La mémoire à court terme est une sorte de bloc-notes où sont stockées les informations utiles pour une durée limitée. C'est cette mémoire qui est défaillante quand on oublie le numéro de téléphone tout juste

lu dans l'annuaire, ou quand on cherche les clés ou l'endroit où l'on a garé sa voiture. Des déficits sélectifs de la mémoire à court terme, sans perturbation de la capacité à former des souvenirs à long terme, sont parfois observés à la suite d'une commotion cérébrale ou chez des personnes qui ont des lésions de certaines régions du cortex.

## La mémoire plurielle

Plusieurs aires du cortex préfrontal participent à la gestion d'un système de mémoire de travail qui permet de maintenir temporairement une représentation active de l'information et de la manipuler pour l'utiliser immédiatement. Un tel système, essentiel pour le raisonnement et la planification de l'action, résume le fonctionnement coordonné de plusieurs aires cérébrales qui assurent des opérations mnésiques spécifiques. James Haxby et ses collègues de l'Institut américain de la santé (NIH), à Bethesda, ont mesuré l'activation du cerveau par imagerie par résonance magnétique ; ils ont montré qu'une petite région du cortex, le sillon frontal supérieur, est temporairement activée tandis que des informations spatiales persistent dans la mémoire de travail ;

**1. LA MÉMORISATION D'UN SOUVENIR** résulte de modifications des connexions au sein de réseaux de neurones activés par un signal. Lorsqu'une information est traitée, des protéines et des gènes sont activés dans les neurones postsynaptiques (à droite). Des protéines sont produites, acheminées vers les connexions établies entre les neurones pré- et postsynaptiques. Ces protéines servent au renforcement des synapses, les sites de communication entre neurones, et à la construction de nouvelles synapses. Lors de la mémorisation d'un souvenir, un réseau spécifique de neurones s'élabore dans diverses structures cérébrales, l'hippocampe notamment, puis le souvenir se grave de la même façon dans le cortex, le lieu de stockage définitif des souvenirs.

une autre région, dans le cortex frontal inférieur gauche, est activée par des visages. Certains neurones du cortex préfrontal sont activés lors de l'«arrivée» de l'information, et ils restent actifs aussi longtemps que l'information doit être maintenue en mémoire de travail ; une interruption fortuite de cette activation par un élément perturbateur efface immédiatement l'information.

Certaines zones du cortex préfrontal jouent aussi un rôle fondamental dans l'élaboration et la préparation de plans d'action différés. Par ses connexions avec les aires corticales motrices, le cortex préfrontal joue le rôle d'un centre exécutif permettant la planification de l'action et l'adaptation

SIGNAL DÉCLENCHANT

HIPPOCAMPE



du comportement aux informations, à mesure qu'elles se présentent. Cette fonction cognitive fondée sur l'analyse de la situation en cours joue un rôle fondamental dans l'élaboration de la pensée et de la représentation du monde.

Dans la plupart des cas, les mécanismes neurobiologiques de la mémoire à court terme n'assurent pas les opérations de stockage à long terme : la mémoire à court terme est plus un espace de travail qu'une passerelle entre les informations reçues et la mémoire à long terme. Certaines personnes atteintes de lésions cérébrales ont des déficits notables de la mémoire de travail, mais ne perdent pas la capacité d'élaborer de nouveaux souvenirs : le cerveau utilise des circuits différents pour ces deux types de mémoire. Pour autant, les souvenirs destinés à laisser une trace à long terme passent nécessairement par l'espace de la mémoire à court terme, puis subissent un ensemble de mécanismes de consolidation et de maturation qui, chez l'homme, prennent parfois des années.

Les interactions des systèmes de mémoire de travail et de la mémoire à long terme sont plus dynamiques qu'on ne l'imaginait : les pre-

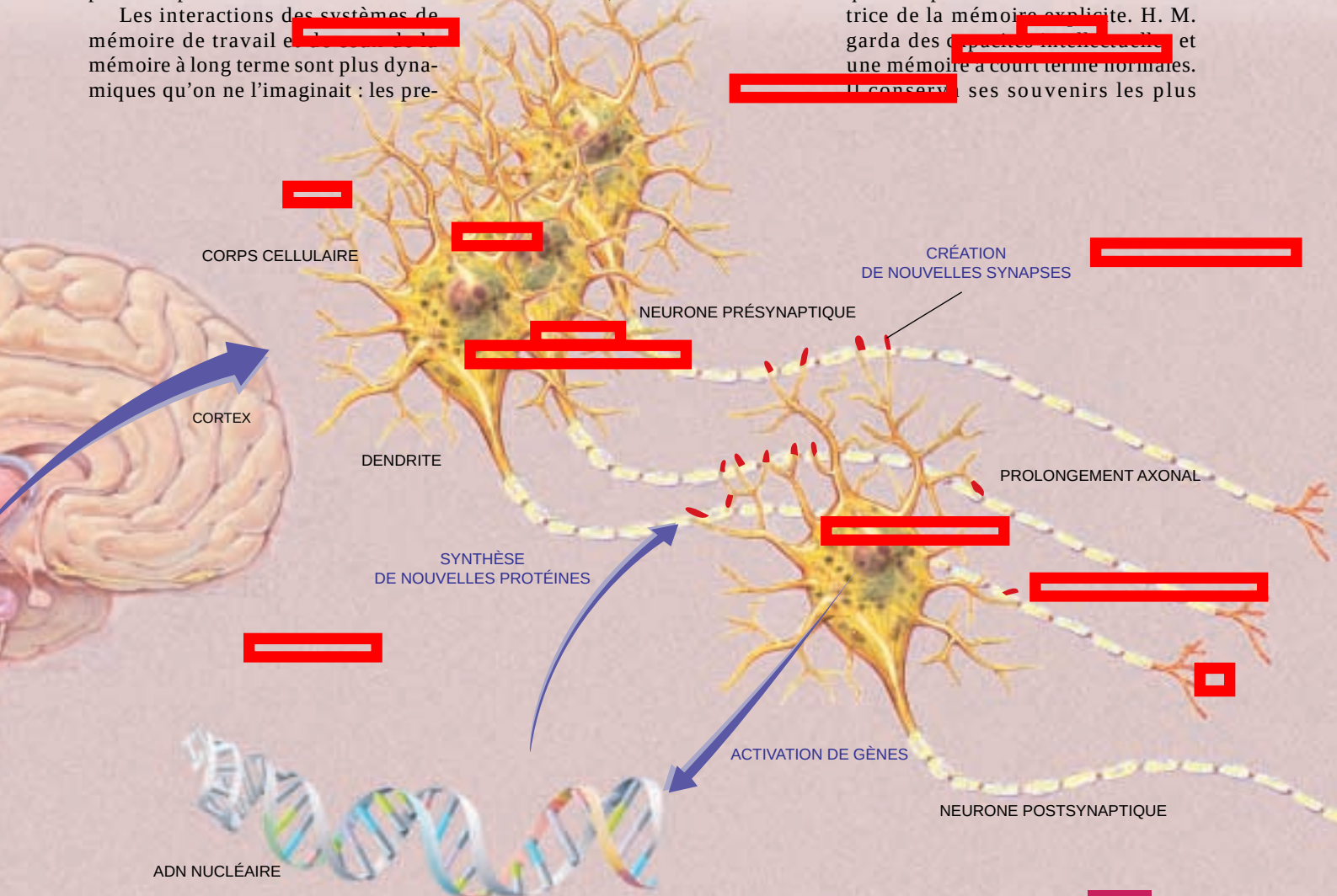
miers jouent un rôle dans la mémorisation à long terme en commandant notamment le stockage des souvenirs. Inversement, tout événement peut activer très rapidement des souvenirs à long terme, qui deviennent alors accessibles à la mémoire de travail, laquelle les utilise immédiatement ou remet à jour le stock des souvenirs.

La mémoire à long terme repose aussi sur plusieurs systèmes distincts. Ainsi, les recherches récentes en psychologie cognitive ont montré qu'il existe une mémoire implicite et une mémoire explicite. La mémoire implicite concerne les habiletés motrices, verbales ou cognitives : quand on acquiert une expérience et qu'on la renouvelle ultérieurement, la mémoire implicite facilite la performance sans qu'il soit nécessaire de faire appel à son souvenir conscient. La mémoire explicite est elle-même subdivisée en mémoire sémantique, c'est-à-dire la mémoire des faits et des connaissances générales, et en mémoire épisodique, ou mémoire des événements, contenant les éléments

du passé individuel (que l'on pourrait qualifier de mémoire autobiographique). Par exemple, quand on se souvient que l'on a vu *Femme à l'ombrelle* de Claude Monet au musée d'Orsay, on se sert de la mémoire sémantique ; mais, quand on se souvient des circonstances où l'on a vu le tableau pour la première fois (avec qui l'on était, le temps qu'il faisait, ce que l'on a fait ensuite, etc.), on utilise la mémoire épisodique.

## Les circuits de la mémoire

On a commencé à comprendre qu'il existe plusieurs types de mémoire et qu'elles reposent sur des circuits neurobiologiques distincts en 1953 : pour soulager une personne épileptique – H. M. – de sa maladie, un chirurgien réalisa une ablation partielle des régions temporales gauche et droite, qui contiennent une structure sous-corticale, l'hippocampe. La lésion de l'hippocampe et des régions avoisinantes soulagea l'épilepsie, mais elle provoqua une perte immédiate et dévastatrice de la mémoire explicite. H. M. garda des capacités intellectuelles et une mémoire à court terme normales. Il conserva ses souvenirs les plus



anciens, mais perdit ceux des années qui avaient précédé l'opération. Enfin, après l'opération, il perdit toute capacité de former de nouveaux souvenirs.

En revanche, sa mémoire implicite, nécessaire pour apprendre comment réaliser certaines tâches, est relativement préservée. Quand on lui demande de dessiner les contours d'une étoile sans croiser les lignes, en regardant la figure et ses mains dans un miroir (une tâche que la plupart des participants aux tests trouvent difficile), ses performances sont normales et s'améliorent chaque jour. Pourtant, d'un jour à l'autre, il oublie qu'il a déjà pratiqué cette tâche et ne conserve pas de souvenirs conscients de l'expérience. Il ne se souvient ni du nom ni du visage des infirmières ou des médecins qu'il côtoie tous les jours.

Aujourd'hui, on sait que l'hippocampe et certaines régions du lobe temporal sont indispensables à la formation de souvenirs explicites et à leur conservation (de quelques mois à quelques années); puis ces souvenirs sont éventuellement stockés de façon permanente dans les régions corticales. Rappelons que les neurones de l'hippocampe, par exemple, ont des prolongements qui leur permettent de communiquer avec les neurones de zones cérébrales très éloignées, par exemple avec ceux du cortex. Le néostriatum, un ensemble de boucles sous-cortico-frontales, les circuits du cervelet et ceux de l'amygdale (une structure proche de l'hippocampe, qui joue un rôle fondamental dans les conditionnements émotionnels) parti-

cipent à l'élaboration de différentes formes de mémoire implicite.

«La mémoire est ainsi constituée de plusieurs systèmes qui traitent et stockent des composantes spécifiques de l'information. Dans les conditions normales, ces sous-systèmes fonctionnent en étroite collaboration, un même événement pouvant avoir un contenu sémantique et un contenu épisodique, et une même information pouvant être représentée sous forme explicite et sous forme implicite.

De nombreuses régions du cerveau traitent différentes dimensions des informations et les mettent en mémoire sous plusieurs contenus, mais ces régions sont assemblées en réseaux temporaires ou permanents, sur lesquels repose le souvenir dans sa globalité.

Comment les souvenirs s'impriment-ils dans le cerveau? Quelle est la nature physique des traces mnésiques et quels sont les mécanismes qui président à leur construction, à leur stockage et à leur évocation? Comment apprenons-nous et comment nous souvenons-nous? Certains mécanismes cellulaires et moléculaires de la mémoire se révèlent progressivement.

## Le support neuronal des souvenirs

Quand un neurone émet une décharge spécifique à l'évocation d'un souvenir ou à la présentation d'un mot ou d'un visage, doit-on en conclure que ce neurone est le siège d'une mémoire rudi-

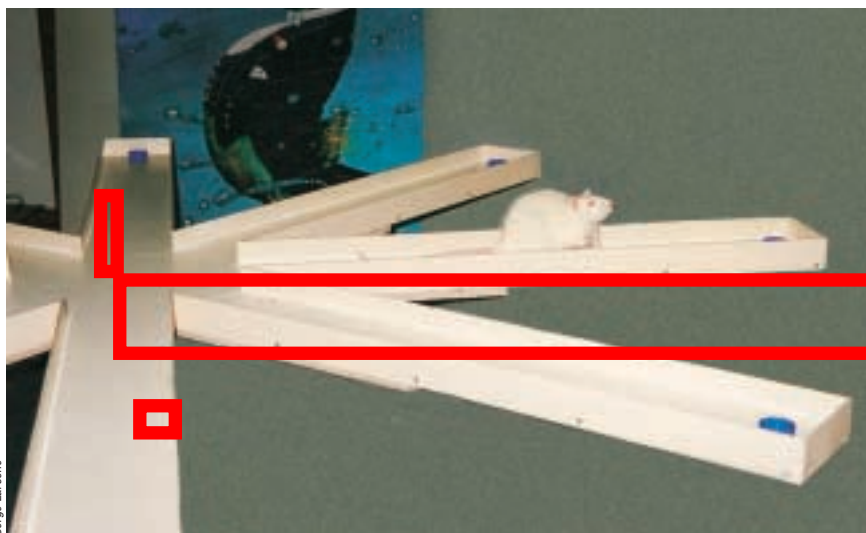
mentaire? L'hypothèse d'une mémoire endonuronale et celle d'un codage chimique sous forme de molécules de mémoire ont été abandonnées.

En fait, chaque neurone reçoit des informations de milliers d'autres neurones par l'intermédiaire de plusieurs milliers de connexions synaptiques, réparties le long de ses dendrites (voir la figure 3). La décharge spécifique d'un neurone en réaction à un stimulus donné ne reflète que les propriétés des circuits où il se trouve, et le support physique des représentations stockées en mémoire est réparti au sein de vastes réseaux de neurones d'une extrême complexité.

La mémoire résulte de variations d'activités neuronales dans des réseaux où chaque souvenir correspond à une configuration unique d'activité spatio-temporelle de neurones interconnectés. Les événements environnants sont codés dans les aires sensorielles sous forme de configurations de décharges neuronales qui se propagent vers les aires associatives, qui ont le lien entre des informations de natures différentes; elles y constituent une collection de représentations plus ou moins abstraites, capables de coordonner les unités responsables des programmes moteurs.

Grâce à des électrodes implantées dans le cerveau d'un animal, on peut suivre la construction des traces mnésiques. Par exemple, pour tester l'acquisition d'une mémoire associative chez le rat, on couple systématiquement un stimulus sensoriel, un son d'une fréquence donnée, à un choc électrique bref et peu intense. Le rat acquiert rapidement une connaissance de la relation entre ces deux événements: il construit une représentation de cette association, où le son annonce le choc.

Les travaux de Norman Weinberger, à l'Université de Californie, et de Jean-Marie Edeline, dans notre laboratoire, montrent que, dans ce type d'apprentissage, certains neurones des voies sensorielles du traitement de l'information auditive modifient leur activité: ils sont «reaccordes» à la fréquence du stimulus et réagissent à ce son de façon plus intense qu'à tout autre son d'une autre fréquence. Nous avons montré qu'au début de l'apprentissage, les neurones de l'hippocampe ne sont pas activés par un son, mais que, progressivement, ils réagissent en émettant des bouffées d'impulsions



Serge Laroché

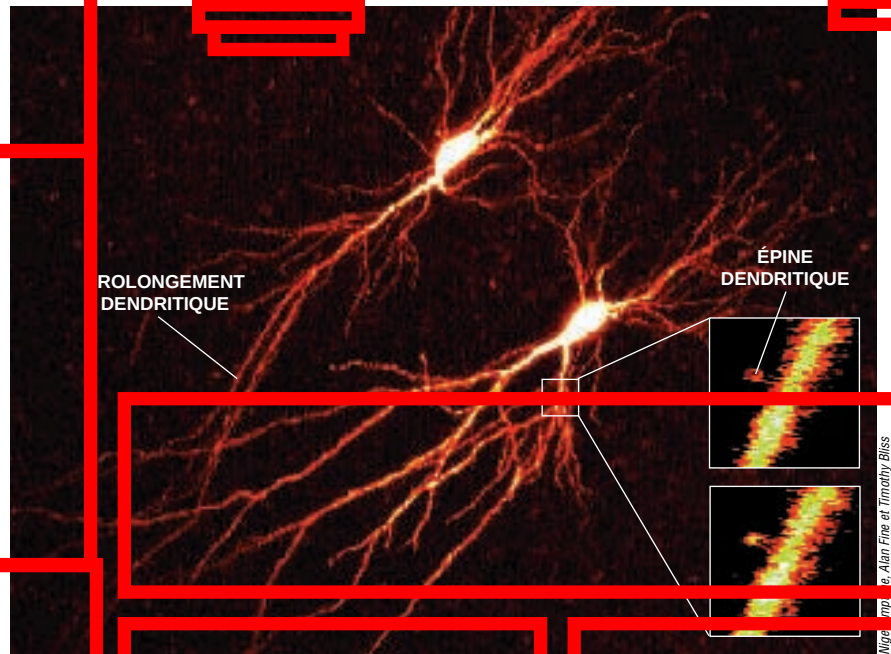
**2. DANS UN LABYRINTHE**, un rat construit une carte cognitive de son environnement, où sont mémorisées les relations spatiales entre les éléments remarquables, par exemple entre la photographie sur le mur et d'autres indices de la pièce où ont lieu les expériences.

électrique, nommées potentiels d'action. Cette réponse neuronale, sélective du stimulus signifiant, se construit en quelques essais, parallèlement à l'apprentissage. Plusieurs mois après, les neurones restent capables de réagir au même son : les neurones de l'hippocampe conservent une mémoire à long terme de l'association apprise. Le codage des composantes implicites et émotionnelles de telles associations est réalisé par des circuits du cervelet et par des circuits liant le thalamus et les noyaux amygdaliens.

La mémoire spatiale, très étudiée chez l'animal, est un autre exemple de mémoire explicite. Lorsqu'il se déplace, l'animal construit une carte cognitive de son environnement qui lui permet de se représenter simultanément les relations spatiales entre différents points remarquables. Cette carte, construite grâce à l'intégration des informations sensorielles acquises successivement au cours des déplacements, fournit un cadre de référence où les objets, le sujet lui-même et tout emplacement, occupé ou non, sont localisés.

En 1971, John O'Keefe et ses collègues de l'Université de Londres ont découvert dans l'hippocampe, des neurones qui sont spécifiquement activés lorsqu'un animal passe par une position particulière de l'environnement. Ces neurones, nommés les neurones de lieu, sont très nombreux dans l'hippocampe. Certains ont de petits champs spatiaux et codent des emplacements extrêmement précis, d'autres sont activés sur des zones plus larges de l'environnement, qui se recouvrent partiellement. De nombreuses recherches ont montré que les décharges des neurones de lieu ne dépendent pas d'un indice particulier de l'environnement, mais d'une combinaison spatiale ordonnée d'informations extérieures, telles les caractéristiques de la pièce de l'expérience et des objets qui s'y trouvent.

L'ensemble des neurones qui déchargent dans les différents lieux d'un même environnement formerait un réseau unique représentant cette structure spatiale, et la propagation de l'activité dans ce réseau (par l'intermédiaire des multiples connexions entre neurones) ferait «défiler» la représentation de l'espace au cours des déplacements. Qui plus est, après apprentissage, les décharges sélectives des neurones de lieu persistent en l'ab-



**3. L'ACTIVATION DE DEUX NEURONES** a été visualisée après injection d'un marqueur fluorescent des ions calcium. L'image d'une portion de dendrite avant activation synaptique (le cartouche en haut à droite) et pendant l'activation (le cartouche en bas à droite) montre l'élévation transitoire de la concentration en ions calcium (en jaune) dans une épine dendritique et dans un prolongement. Les ions calcium activent la synthèse de diverses protéines utilisées pour la formation de la mémoire. Photographie, dont le grossissement est égal à 2 000, est de Nigel Emptage, Alan Fine et Timothy Bliss, de l'Institut britannique de la recherche médicale, à Londres).

sence d'indices (par exemple, dans l'obscurité), à condition que l'animal ait vu ces indices au moment de son entrée dans la chambre d'expérience, c'est-à-dire qu'il connaisse son orientation initiale.

Ainsi, la représentation neuronale peut être activée par ce que l'animal sait et a mémorisé de l'espace. De plus, il utilise cette représentation mnésique pour guider ses déplacements. Si chaque représentation spatiale utilise un grand nombre de neurones, un même neurone de l'hippocampe participe à plusieurs représentations spatiales dans des environnements différents, et à d'autres types de représentations, non spatiales.

### Plasticité synaptique et formation des souvenirs

Ces exemples illustrent comment les neurobiologistes traquent les représentations mnésiques dans le cerveau et étudient leurs propriétés. Pourtant, il ne s'agit là que d'un état transitoire de mémoire : cette activité électrique évanescence ne constitue pas une trace stable à long terme, compatible avec la quasi-permanence des souvenirs. Les activités neuronales spécifiques de

chaque souvenir ne restent pas en permanence sous cet état : nous n'avons pas l'ensemble de nos souvenirs présents à l'esprit en même temps. En fait, les motifs d'activation neuronale forment la mémoire active, présente seulement au moment de la construction du souvenir, lorsque les événements déclencheurs se produisent, ou lors de son rappel et de son utilisation ultérieure. Qu'est-ce qui se passe-t-il entre les deux ? Comment un souvenir se maintient-il pendant des années, alors que l'activité neuronale qui représente ce souvenir a « disparu » ?

On a découvert que les expériences sensorielles laissent des traces dans le cerveau en modifiant l'efficacité des synapses entre neurones et la structure des réseaux neuronaux. Selon leur degré d'activation pendant l'expérience sensorielle, certaines synapses sont renforcées, d'autres affaiblies ou de nouveaux contacts synaptiques apparaissent : la configuration de ces changements synaptiques représente le souvenir de l'expérience.

Comme le psychologue canadien Donald Hebb l'avait supposé dès 1949, des modifications cellulaires gravent, puis stabilisent les réseaux, supports

de la trace mnésique. Ces mécanismes assurent un maintien stable de la trace en mémoire et permettent la restauration de l'activité neuronale spécifique lors du rappel du souvenir. Ainsi, lorsqu'un animal est à nouveau confronté à un environnement connu, les mêmes cellules de lieu sont activées aux mêmes emplacements que lors des visites précédentes.

Depuis quelques années, les preuves que la formation de traces mnésiques s'accompagne de remaniements synaptiques se sont accumulées. Tout commence en 1973, lorsque Timothy Bliss, à Londres, et Terje Lømo, à Oslo, découvrent que certaines synapses de l'hippocampe ont une remarquable plasticité, connue sous le nom de potentialisation à long terme. Chez l'animal adulte, une brève stimulation électrique à haute fréquence d'une voie nerveuse qui aboutit dans l'hippocampe provoque une augmentation durable de l'efficacité de la transmission synaptique, de telle sorte que les neurones cibles réagissent davantage à toute activation ultérieure des mêmes synapses. La potentialisation à long terme est un exemple de la plasticité neuronale : la seule activation d'un circuit pendant quelques dizaines de millisecondes (par des stimulations qui imitent les décharges spontanées des neurones) modifie les synapses de ce circuit pendant plusieurs semaines voire des mois ou plus. Ainsi, les neurones conservent une trace de leur activation antérieure : le circuit est modifié. Un tel mécanisme sert de filtre pour rejeter les messages trop faibles et favoriser les associations entre messages d'origines différentes dans le cerveau, mais qui convergent vers les mêmes neurones et les activent de façon synchrone. Un lien préférentiel – ou chemin spécifique – se crée durablement entre les neurones activés et leurs cibles.

Avec Valérie Doyère, nous avons mis en évidence une augmentation de l'efficacité de la transmission synaptique dans les circuits de l'hippocampe lors d'apprentissages associatifs.

Quand on bloque cette plasticité synaptique, les neurones de l'hippocampe ne modifient plus leur activité pour coder l'information mise en mémoire. De telles modifications synaptiques ont aussi été observées dans d'autres structures du cerveau (le cortex ou les noyaux amygdaliens, selon le type d'information à mémoriser).

D'après des études que nous avons réalisées, les phénomènes de dépression à long terme, réciproques de la potentialisation à long terme, se produisent également. Tout se passe comme si la potentialisation de certaines synapses pendant l'apprentissage s'accompagne de l'affaiblissement d'autres synapses. Un tel système de modification des synapses augmente notablement les configurations possibles, donc les capacités de stockage des réseaux neuronaux.

En outre, l'amplitude des modifications synaptiques, pendant l'apprentissage, est liée à la force du souvenir. Avec le temps, si les modifications synaptiques disparaissent, on observe un oubli de l'information mémorisée. L'évolution des modifications, dans un réseau neuronal spécifique, reflète la force et l'accessibilité d'un souvenir.

## Mécanismes d'induction de la plasticité synaptique

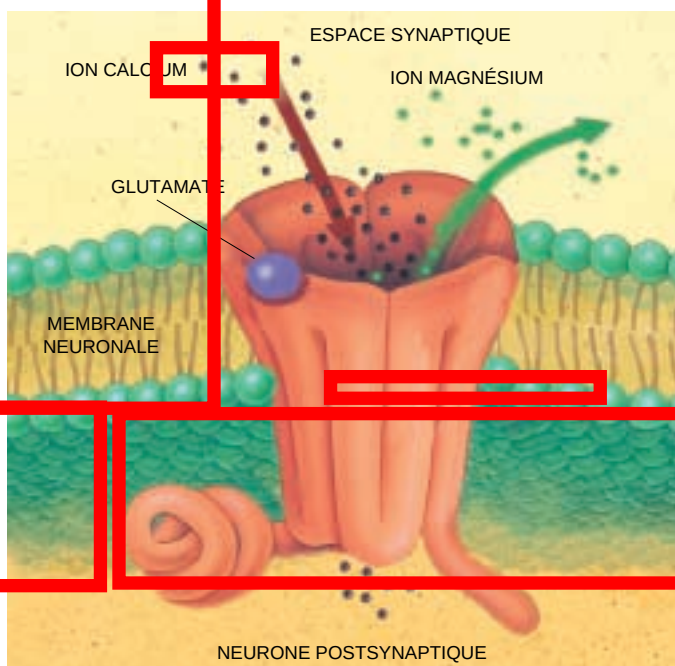
On connaît, aujourd'hui, le mécanisme moléculaire qui déclenche ces modifications durables des synapses. La synapse a deux composantes : la terminaison du neurone présynaptique (le bouton terminal) et la membrane réceptrice du neurone cible postsynaptique. Quand un neurone est activé, le signal électrique transmis le long de l'axone atteint le bouton terminal, et une substance chimique contenue dans les vésicules synaptiques – un neurotransmédiateur – est libérée dans l'espace synaptique. La plupart des synapses modifiables utilisent le glutamate comme neurotransmédiateur. Une fois libéré dans la fente synaptique, le neurotransmédiateur se fixe sur des récepteurs situés à la surface des épines dendritiques des neurones postsynaptiques : le signal chimique est transformé en signal électrique, que transmet le neurone postsynaptique.

Plusieurs types de récepteurs du glutamate interviennent dans la transmission et la plasticité synaptique. Les récepteurs AMPA assurent la transmission synaptique rapide et normale, permettant à l'influx nerveux de se propager de neurone en neurone.

Un autre type de récepteurs, le récepteur NMDA (voir la figure 4), commande spécifiquement la plasticité sur la majorité des voies qui fonctionnent avec le glutamate. Un bloquant spécifique des récepteurs NMDA ne modifie pas la transmission synaptique, mais empêche le déclenchement de la potentialisation à long terme. Dans les conditions normales, le récepteur NMDA est inactif ; il entre en jeu lorsque l'activité des neurones présynaptiques est élevée (libération importante de glutamate) et que les neurones postsynaptiques sont fortement dépolarisés (leur potentiel de repos est dépassé).

Quand les récepteurs NMDA sont activés, le réseau neuronal est modifié.

Dans ce cas, le canal ionique associé au récep-



**4. LE RÉCEPTEUR NMDA du glutamate (en orange) est associé à un canal ionique. Quand le glutamate (en violet) s'y fixe, le canal, initialement bloqué par les ions magnésium, s'ouvre : les ions magnésium sont rejetés dans l'espace intercellulaire, tandis que les ions calcium pénètrent dans le neurone postsynaptique. L'entrée massive des ions calcium déclenche des réactions moléculaires qui aboutissent au renforcement des connexions entre les neurones pré- et postsynaptiques.**

teurs s'ouvre, et les ions calcium entrent massivement dans le neurone postsynaptique. Les ions calcium déclenchent la plasticité synaptique. Leur entrée massive amorce une cascade de réactions moléculaires qui aboutit à une modification durable de la synapse.

## Le rôle des ions calcium

Les récepteurs métabotropiques, qui forment une autre classe de récepteurs du glutamate, n'ont pas de canal ionique, mais sont couplés à des protéines, nommées protéines G ; ils semblent amplifier le phénomène en mobilisant les ions calcium des réserves intracellulaires.

Cette cascade de réactions déclenchée par l'élévation transitoire de la concentration en ions calcium commence par l'activation d'un ensemble de protéines, notamment des kinases, qui participent à la transduction des signaux dans les cellules. Ces kinases assurent la phosphorylation d'autres protéines, c'est-à-dire qu'elles y fixent un groupe phosphate. Plusieurs cascades de phosphorylation ont été identifiées. En utilisant des inhibiteurs de ces kinases ou des animaux génétiquement modifiés qui ne synthétisent pas ces protéines, on a montré que la plasticité synaptique est peu stable et décroît en quelques heures. Ainsi, les cascades de phosphorylation jouent un rôle essentiel dans les premières étapes de la mise en place des modifications synaptiques durables. La phosphorylation des récepteurs AMPA et NMDA, qui augmente leur sensibilité, est une des étapes ultimes de ce mécanisme.

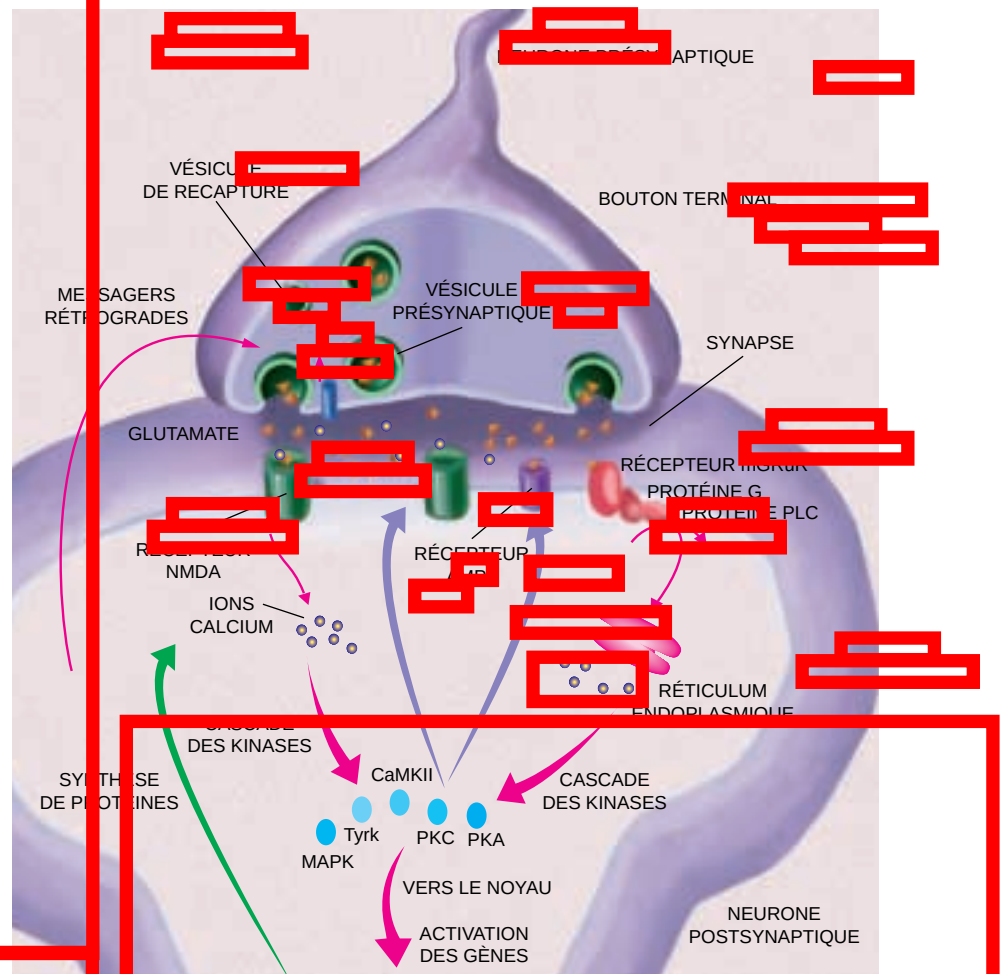
Enfin, le bouton terminal présynaptique subit aussi des modifications, la plasticité synaptique reposant en partie sur une augmentation durable de la capacité des synapses à libérer du glutamate : l'activation de certaines kinases semble moduler l'activité des complexes protéiques qui participent à la mobilisation, à l'amarrage et à la fusion des vésicules synaptiques, ce qui augmente la libération des neurotransmetteurs. Ces modifications présynaptiques seraient déclenchées par des messages libérés par le neurone postsynaptique et qui agiraient comme des signaux rétrogrades sur la libération du glutamate par le bouton présynaptique correspondant.

Or, ces mécanismes de plasticité cérébrale sont essentiels à la formation

des traces mnésiques. Avec le groupe de I. Bliss, nous avons montré que l'apprentissage d'une association entre deux stimuli s'accompagne d'une augmentation de la capacité des synapses du gyrus denté et de l'hippocampe à libérer du glutamate. De plus, les mécanismes mis en jeu reposent sur les mêmes messagers que lors de la potentialisation à long terme et ils sont bloqués par les antagonistes des récepteurs NMDA.

De plus, des modifications similaires ont été observées dans l'hippocampe après un apprentissage spatial, et d'autres changements, tels que l'activation des kinases ou l'augmentation

de la sensibilité des récepteurs du glutamate ont été identifiés au niveau postsynaptique. En outre, la modification expérimentale de ces mécanismes perturbe notablement la mémoire : Sabrina Davis et Richard Morris, de l'Université d'Edimbourg, ont montré que le blocage des récepteurs NMDA rend les animaux incapables d'apprendre une tâche de localisation spatiale. À mesure que les doses d'antagonistes augmentent, la plasticité synaptique diminue et les déficits mnésiques se renforcent. De même, des déficits mnésiques notables sont observés chez des souris mutantes dont les gènes codant des kinases ou des récepteurs indis-



**5. LA CASCADÉ DES RÉACTIONS** déclenchées lors de la mémorisation commence par la libération de glutamate dans la fente synaptique qui sépare le neurone présynaptique, qui a reçu le stimulus déclenchant (visuel, par exemple), du neurone postsynaptique. Le glutamate, en se fixant à son récepteur AMPA, assure la transmission rapide de l'influx nerveux. Quand le récepteur NMDA est activé, des ions calcium entrent dans le neurone postsynaptique. Les récepteurs métabotropiques augmentent l'afflux d'ions calcium en favorisant leur libération des réserves intracellulaires (le réticulum endoplasmique). Les ions calcium activent toute une série de protéines nommées kinases, lesquelles phosphorylent d'autres protéines (elles leur ajoutent un groupe phosphate) ; parmi elles, les récepteurs AMPA et NMDA, dont la sensibilité augmente. Les cascades de kinases déclenchent aussi, dans le noyau du neurone postsynaptique, l'expression de divers gènes codant des protéines essentielles à la modification de la synapse et à la construction de nouvelles synapses.

pensables au déclenchement et au maintien de la plasticité synaptique sont inactivés. Ainsi, les étapes clefs des mécanismes de plasticité synaptique sont activées dans le cerveau lors de la mémorisation.

## Les mécanismes moléculaires de la mémoire

Si la mémorisation repose sur des modifications synaptiques, celles-ci doivent être stabilisées et consolidées, sinon la force synaptique décroît rapidement, et le souvenir s'estompe. Ces mécanismes de consolidation nécessitent la synthèse de protéines. Dans les années 1960, des expériences avaient montré que des inhibiteurs de la synthèse protéique, délivrés pendant l'apprentissage, ne perturbent pas l'acquisition ou la rétention à court terme, mais produisent des déficits sélectifs de la mémoire à long terme. On sait que la potentialisation à long terme déclenchée par une stimulation électrique repose, dans une première phase, sur l'activation de kinases, mais, en présence d'inhibiteurs de la synthèse protéique, cette potentialisation à long terme décroît rapidement et ne peut se stabiliser au-delà de quelques heures. Des modifications stables nécessitent donc l'activation de gènes et la synthèse de protéines.

Le déclenchement de la potentialisation à long terme, après l'activation du récepteur NMDA et de différentes voies de signalisation cellulaire, s'accompagne de l'expression de gènes précoces (c'est-à-dire activés très rapidement), tels *c-fos*, *zif268*, *CREB* ou des gènes de la famille *jun*. Il existe probablement plusieurs centaines de gènes précoces ; on les estime à plus de 500 dans le cerveau humain, plus de la moitié étant spécifiques du système nerveux central. Ils commandent la synthèse de facteurs de transcription nucléaire, d'enzymes cytoplasmiques, de composants structuraux ou de certains facteurs de croissance.

A. Silva et E. Kandel ont montré l'importance de la protéine CREB dans la plasticité neuronale et dans la mémoire à long terme. L'inactivation de cette protéine, chez des souris

mutantes, perturbe non pas le déclenchement de la potentialisation à long terme, mais son maintien. Lors des tâches d'association de stimulus, de reconnaissance olfactive des congénères ou de mémorisation de l'espace, les animaux mutants retiennent bien l'information pendant les quelques heures qui suivent l'apprentissage, mais ils présentent de graves déficits de la mémorisation à long terme.

Les facteurs de transcription agissent comme des « commutateurs moléculaires ». Ils modulent l'expression d'autres gènes tardifs qui commandent la synthèse de protéines dites effectrices et qui assurent la stabilisation des changements synaptiques et la formation de nouveaux contacts entre neurones (protéines de structure pour la construction des nouvelles synapses, récepteurs membranaires, protéines du maintien de l'intégrité cellulaire, nouvelles kinases, etc.).

Quel est l'aboutissement des cascades de régulations transcriptionnelles ? Avec S. Davis, et les groupes de T. Boss et Jacques Mallet, à Paris, et de Stephen Hunt, à Cambridge, nous avons découvert que le déclenchement de la potentialisation à long terme dans l'hippocampe s'accompagne de vagues successives d'expression de gènes spécifiques, vagues qui s'étendent sur plusieurs jours et se chevauchent partiellement.

Après l'activation rapide et transitoire de différents facteurs de transcription, l'expression de gènes qui codent les kinases, des protéines d'exocytose participent à la libération du

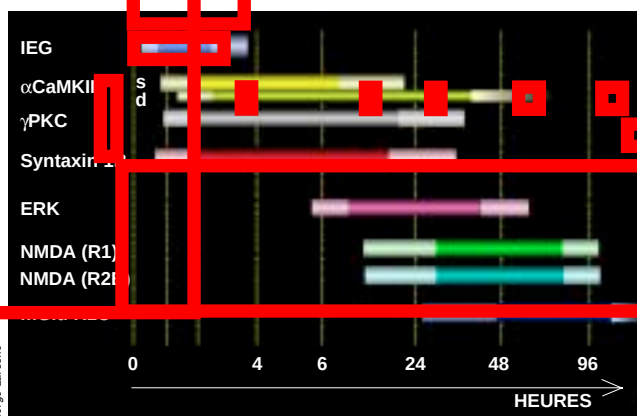
neurone édicateur, des facteurs de croissance neuronale et, après plusieurs jours, des récepteurs du glutamate augmente. Comment ces protéines trouvent-elles les bonnes adresses, c'est-à-dire les synapses activées, parmi les milliers qui jalonnent les arborisations dendritiques des neurones ? Uwe Frey et Richard Morris ont récemment montré que l'activation initiale qui potentialise l'efficacité d'une synapse laisse une marque, une sorte d'étiquette qui permet aux vagues ultérieures de protéines de trouver leur chemin et de consolider spécifiquement les synapses étiquetées.

Les nouvelles protéines transportées vers les synapses nouvellement activées transformeraient le changement temporaire en un changement permanent, mais on ignore encore quelle est l'étape finale de remodelage des réseaux neuronaux qui assure une mémoire stable.

Les études morphologiques, en microscopie électronique, ont révélé la trace de profonds remaniements des réseaux neuronaux après induction de la plasticité synaptique : changements de forme et de taille des synapses, augmentation des surfaces d'apposition entre les éléments pré- et postsynaptiques, transformation de synapses silencieuses en synapses actives et croissance de nouvelles synapses. Le remaniement de la structure des réseaux neuronaux serait un mécanisme fondamental des processus de mémorisation.

Aujourd'hui, on comprend mieux les mécanismes moléculaires locaux de formation des traces mnésiques en un point donné des circuits cérébraux. Mais comment un réseau réparti sur plusieurs relais synaptiques, voire entre plusieurs structures, peut-il se stabiliser ? En étudiant la régulation génique dans la plasticité synaptique avec S. Davis et avec le groupe de J. Mallet, nous avons identifié un commutateur moléculaire qui pourrait jouer un rôle essentiel dans la propagation de la plasticité au sein des réseaux interconnectés. Il s'agit notamment de la syntaxine, une protéine qui intervient dans

l'amarrage et dans la fusion des vésicules synaptiques à la membrane neuronale et dans la libération du neurotransmetteur, au cours de l'étape finale de l'exocytose.

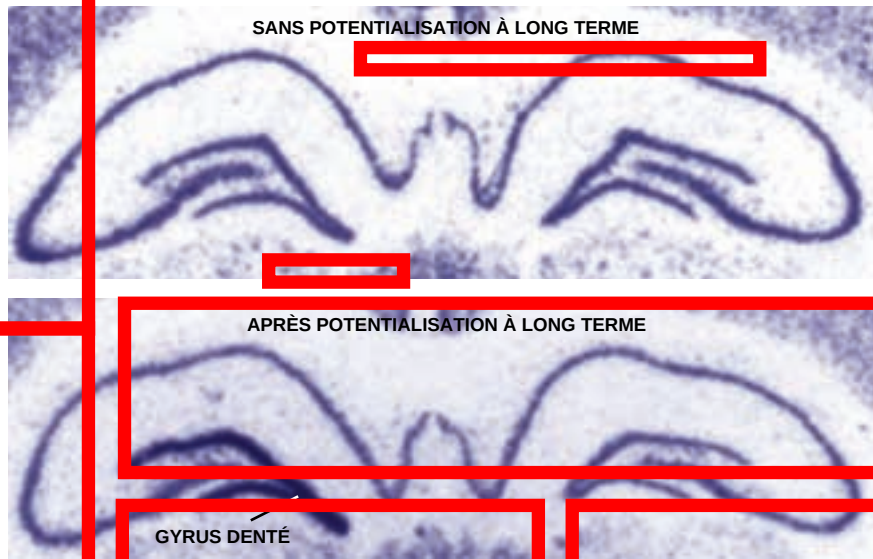


**6. PLUSIEURS GÈNES** sont activés après induction de la potentialisation à long terme dans le gyrus denté de l'hippocampe. Il s'agit de gènes immédiats (IEG), codant par exemple des facteurs de transcription, des gènes codant des kinases (CaMKII, PKC, ERK), les sous-unités R1 et R2 des récepteurs NMDA et une sous-unité (mGluR1C) des récepteurs métabotropiques du glutamate.

Quand on déclenche la potentialisation à long terme dans le gyrus denté, l'expression du gène de la syntaxine augmente pendant plusieurs heures dans les neurones postsynaptiques (voir la figure 7). Ensuite, la protéine est synthétisée et transportée vers les boutons terminaux des axones de ces neurones dans une autre région de l'hippocampe, l'aire CA<sub>3</sub>. Là, elle déclenche une augmentation de la libération de glutamate, un indice du déclenchement d'une plasticité transsynaptique. Ainsi, les mécanismes de plasticité, à l'entrée des circuits de l'hippocampe, produisent, grâce à un mécanisme moléculaire de régulation génique, des modifications plus loin dans le réseau, changements qui se propagent de relais en relais.

Récemment, nous avons montré que l'apprentissage lui-même entraîne une régulation de l'expression du gène codant la syntaxine. Dans une tâche de mémoire spatiale, l'expression de ce gène augmente dans les différents relais des circuits de l'hippocampe, au moment où les animaux commencent à maîtriser la tâche ; les performances mnésiques augmentent avec l'amplitude de cette régulation génique. Dans d'autres tâches qui nécessitent une mémoire de référence spatiale, ce marqueur de la plasticité transsynaptique est exprimé dans des circuits plus larges comportant l'hippocampe et des aires corticales préfrontales. Ce mécanisme moléculaire pourrait participer à la construction d'un réseau neuronal interconnecté codant la trace mnésique.

On a longtemps pensé que les mécanismes fondamentaux des fonctions mentales supérieures, la mémoire par exemple, échapperaient à toute analyse biologique. Aujourd'hui, on commence à mieux comprendre comment les différentes formes de mémoire s'organisent et quels sont les circuits et les structures du cerveau qui y participent. L'analyse des mécanismes de la communication intra- et intercellulaire et de la plasticité neuronale qui interviennent dans la formation et dans la conservation des traces mnésiques a notablement progressé. Cette extraordinaire plasticité des cellules nerveuses qui assure le remodelage des circuits cérébraux est une composante essentielle de la formation et du stoc-



**7. DES COUPES DE CERVEAU DE RAT** révèlent qu'après déclenchement de la potentialisation à long terme l'expression du gène de la syntaxine a été stimulée de façon spécifique dans le gyrus denté, une structure de l'hippocampe qui participe à la mémorisation. En haut, le rat témoin : l'expression du gène de la syntaxine est identique du côté gauche et du côté droit du gyrus denté. En bas, l'expression est supérieure du côté où la potentialisation a été déclenchée. L'expression de la syntaxine est augmentée dans l'ensemble des réseaux de l'hippocampe, lors de la mémorisation.

kage des souvenirs. On découvre des mécanismes de régulation fine de la machinerie génétique et les protéines spécifiques couplées aux récepteurs de surface des neurones qui interviennent dans des cascades susceptibles de modifier la physiologie des réseaux neuronaux. En fonction de leur place dans une cascade et de leur degré d'activation, ces protéines peuvent interrompre ou stimuler la propagation d'un signal et déclencher un remodelage coordonné des synapses et des circuits neuronaux.

De temps en temps, nous avons la mémoire qui flanche. Au cours du vieillissement, la plasticité des synapses diminue, les changements sont plus éphémères. Dans les stades précoces

de la maladie d'Alzheimer, les circuits de l'hippocampe nécessaires à la mémorisation dégénèrent et certaines mutations identifiées dans des formes familiales de la maladie, aboutissent, quand on les reproduit chez l'animal, à des perturbations de la plasticité des synapses. Quand on connaîtra mieux les mécanismes, les circuits cérébraux où ils s'expriment et les rôles spécifiques de ces circuits dans les différentes formes de mémoire, on disposera de clés pour percer les causes des dysfonctionnements du cerveau. On pourra alors mettre au point des outils performants d'investigation et de traitement des troubles cognitifs liés au vieillissement et aux maladies neurodégénératives.

Serge LAROCHE dirige le Laboratoire de neurobiologie de l'apprentissage et de la mémoire, unité CNRS URA 1491, à l'Université Paris Sud, à Orsay.

T. BLISS et G. COLLINGRIDGE, *Synaptic Model of Memory : Long-term Potentiation in the Hippocampus*, in *Nature*, vol. 361, pp. 31-39, 1993.

S. LAROCHE et B. DEWEER, *La mémoire chez l'homme et chez l'animal*, in *Traité de psychologie expérimentale*, sous la direction de M. Richelle, J. Requin et M. Robert, pp. 473-521, Presses universitaires de France, 1994.

S. LAROCHE et al., *Neural Mechanisms of Associative Memory*, in *Brain and Memory*, sous la direction de J. McGaugh, N. Weinberger et G. Lynch, pp. 277-302, Oxford University Press, 1995.

S. DAVIS et al., *Brain Structure and Task-specific Increase in Expression of the Gene Encoding Syntaxin 1B during Learning in the Rat*, in *European Journal of Neuroscience*, vol. 8, pp. 2068-2074, 1996.

S. DAVIS et S. LAROCHE, *A Molecular Biological Approach to Synaptic Plasticity and Learning*, in *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, vol. 321, pp. 97-107, 1998.



# La localisation de la mémoire

JOAQUIN FUSTER

*Contrairement à ce que l'on croyait, aucune zone cérébrale n'est spécifiquement dédiée à un type particulier de mémoire, mais des réseaux interconnectés de neurones relient diverses régions pour construire «la» mémoire.*

Les recherches faites sur les primates ont montré que la mémoire est stockée en grande partie dans le néocortex, c'est-à-dire dans la région du cortex cérébral la plus récente dans l'histoire de l'évolution, et que les divers types de mémoire sont formés de réseaux de neurones du néocortex. La région postérieure du cortex cérébral et la région frontale sont des régions essentielles pour la mémoire.

La mémorisation des souvenirs s'accompagne d'une modification des synapses, des contacts entre les neurones (voir *Les mécanismes de la mémoire*, par Serge Larochette, page 94) ; l'activation des synapses modifiées entre neurones interconnectés fait ressurgir les souvenirs qui y sont imprimés. Ainsi, ce sont des relations spécifiques entre neurones qui façonnent les souvenirs, et non des molécules ou des neurones de la mémoire.

Donald Hebb a émis le premier l'hypothèse selon laquelle, lorsqu'un neurone, dit présynaptique, en active un autre, dit postsynaptique, de façon répétée, des changements métaboliques surviennent, et l'efficacité de la transmission des signaux du neurone présynaptique vers le neurone postsynaptique augmente. Dans l'encéphale des mammifères, le phénomène électrique nommé potentialisation à long terme active durablement la transmission des signaux électriques à travers les synapses.

En outre, lorsque deux neurones ou deux systèmes de neurones sont activés à plusieurs reprises en même temps, l'activation de l'un favorise l'activation de l'autre. Grâce à divers mécanismes associatifs, les neurones sont interconnectés en unités fonctionnelles de mémoire, ensembles de neurones activés simultanément à l'évocation d'un même souvenir. Ce mécanisme d'association synchrone joue un rôle

essentiel dans la construction de ces unités fonctionnelles et dans l'acquisition de la mémoire.

Les souvenirs et les perceptions reposent sur des réseaux de neurones interconnectés. Chaque nouvelle perception apporte des connexions à un réseau où sont déjà ancrées les perceptions précédentes. Chaque neurone ou groupe de neurones peut faire partie de plusieurs réseaux et, par conséquent, de plusieurs souvenirs. La conception de la mémoire a notablement évolué en quelques années, puisque l'on est passé de structures cérébrales limitées dédiées à des mémoires particulières à des systèmes de neurones tous doués de mémoire.

Dans le cortex, les réseaux de mémoire se construisent, des niveaux inférieurs, c'est-à-dire des zones corticales sensorielles ou motrices, jusqu'aux zones d'association. Sur le premier échelon de cette hiérarchie se trouvent les réseaux élémentaires de la mémoire sensorielle et motrice, qui sont les éléments constitutifs des réseaux sensoriels et moteurs complexes, à l'origine des réseaux plus élaborés dans le cortex associatif.

L'hippocampe, une structure profonde du lobe temporal, joue un rôle fondamental dans la formation des réseaux de mémoire dans le cortex associatif. Les personnes qui ont des lésions de l'hippocampe souffrent d'amnésie antérograde : elles ont beaucoup de difficultés à acquérir de nouveaux souvenirs et à les conserver. Les connexions réciproques entre l'hippocampe et les régions du néocortex où ont lieu les associations sont essentielles à l'acquisition de nouveaux souvenirs. On sait que certains mécanismes sont indispensables à la consolidation de la mémoire corticale, la conversion de la mémoire à court

terme en mémoire à long terme. Les noyaux amygdaliens sont d'autres structures du lobe temporal, indispensables à l'évaluation de la signification affective et émotionnelle des perceptions ; ils interviennent également dans la formation et dans la consolidation des souvenirs.

## Mémoire d'espèce

Toute expérience s'intègre, grâce à de nouvelles connexions, dans les réseaux qui existent déjà et qu'elle active ; elle survient sur un substrat de mémoire ancienne qui lui est associée et qu'elle active parce qu'elle lui ressemble ou qu'elle s'y oppose. Le nouveau évoque l'ancien et, par association et par consolidation, devient partie intégrante de l'ancien.

Pour mieux comprendre la topographie de la mémoire, nous devons considérer les zones corticales sensorielles et motrices primaires comme les dépositaires d'une classe de mémoire innée ou nous pourrions appeler «mémoire phylétique», c'est-à-dire mémoire de l'espèce. À la naissance, la structure synaptique de ces zones contient la somme des principales expériences acquises par l'espèce au cours de son interaction avec l'environnement. Il s'agit bien d'une mémoire, dans la mesure où, tout comme la mémoire personnelle, elle contient des informations qui peuvent être récupérées par de stimulations sensorielles ou d'actions. Résultat de l'évolution, elle représente l'accumulation des expériences adaptatives de l'espèce.

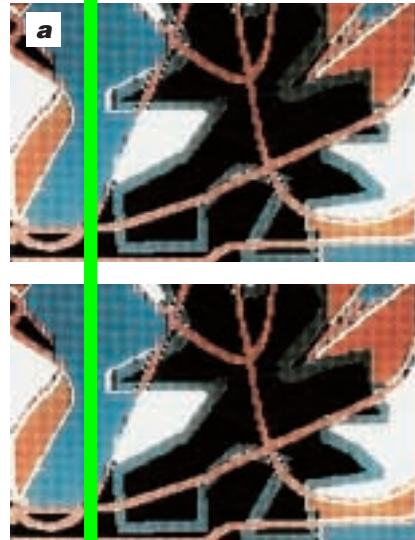
Pour être utile, la mémoire phylétique requiert une «répétition», au début de la vie. Les expériences post-natales, au cours desquelles les zones sensorielles primaires doivent être stimulées pour que leur fonction se déve-

loppe, correspondraient à des périodes de répétition. Ainsi, le chant des oiseaux ou le système moteur des mammifères ne se développent que pendant une période critique; ils représenteraient la mémoire phylétique motrice. En outre, comme les structures sensorielles et motrices primaires conservent leur plasticité chez l'adulte, la mémoire phylétique se modèle et se renforce chez l'adulte aussi.

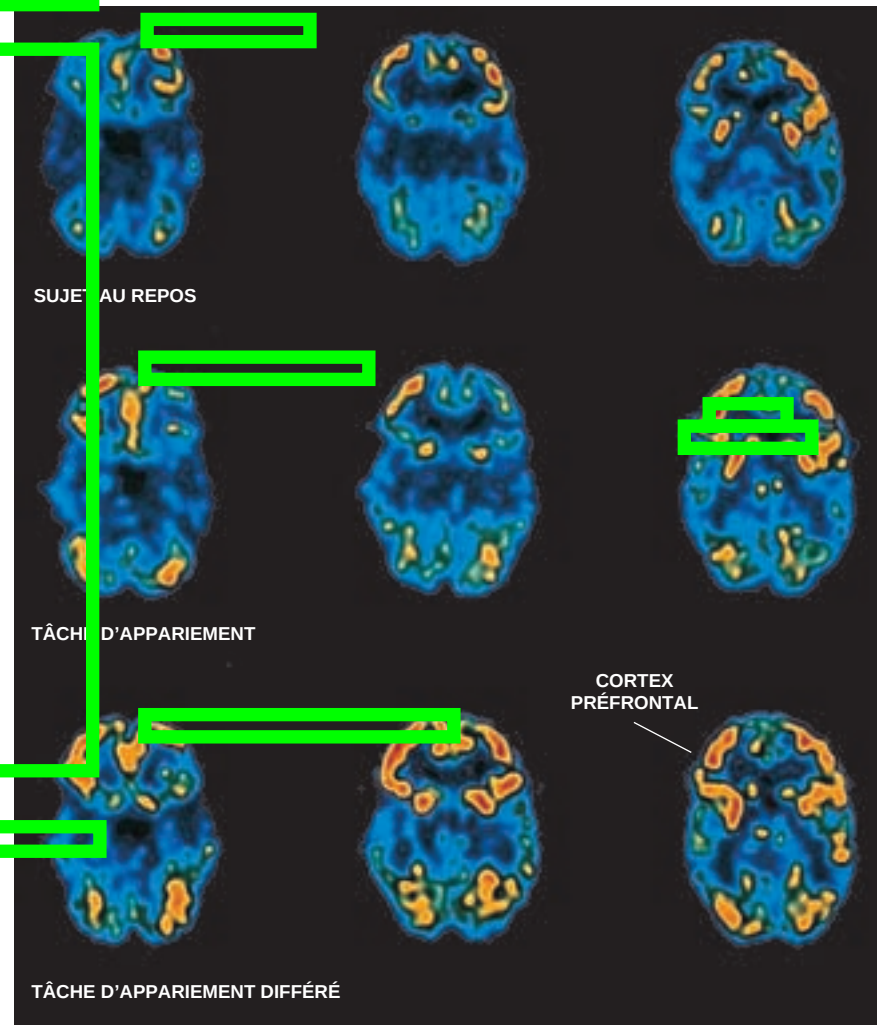
La mémoire individuelle, qui se développe sur l'assise de la mémoire phylétique, peut être considérée comme une extension de la mémoire phylétique dans le cortex associatif. Le cortex primaire fournit au cortex associatif les éléments de l'expérience qui, par association synchrone, créent des synapses ou les renforcent dans les réseaux de la mémoire individuelle.

La transition anatomique de la mémoire phylétique à la mémoire individuelle, c'est-à-dire du cortex primaire au cortex associatif, s'accompagne d'une complexité croissante des réseaux de connexion. Tout comme dans l'évolution animale, le cortex associatif a un développement plus tardif et plus important que le cortex sensoriel ou le cortex moteur primaire. Une preuve en est la formation de myéline, signe d'une maturation structurale (la myéline forme une gaine autour des prolongements neuronaux, indispen-

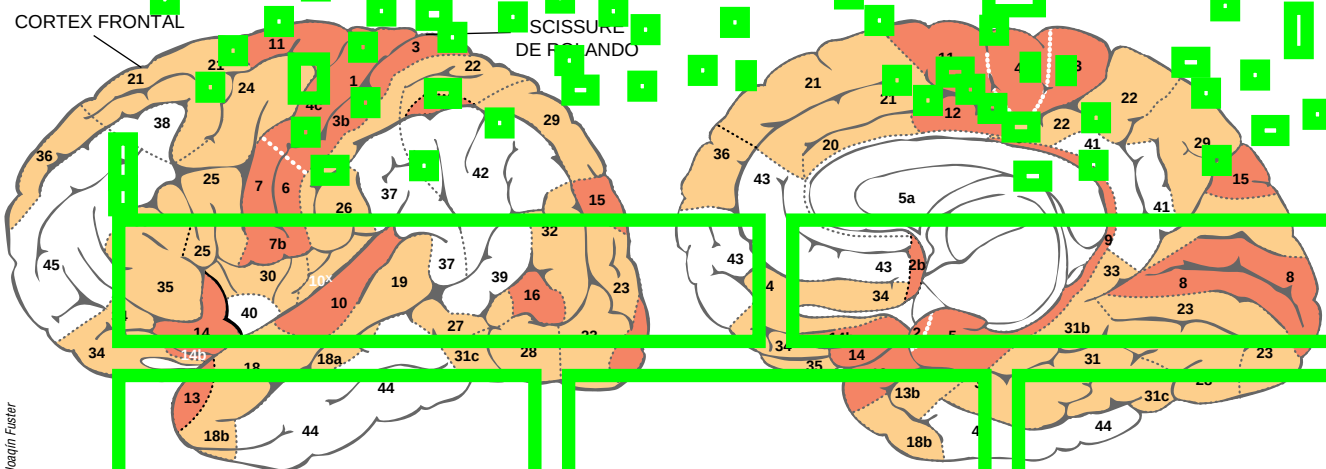
sable à la propagation de l'influx nerveux). Le néocortex associatif, qui est le substrat de la mémoire individuelle, continue à se développer pendant toute l'enfance et conserve probablement sa plasticité synaptique chez l'adulte.



**1. LA RÉGION DU CORTEX ACTIVÉE** varie en fonction de la tâche effectuée. Ces images, obtenues par tomographie par émission de positons, représentent la répartition du glucose dans le cerveau (selon trois «coupes» permises par la technique de tomographie), chez un sujet au repos (*rangée supérieure*) et lors de deux tâches où intervient le cortex visuel. Dans une première série de tests, on projette au sujet deux dessins abstraits simultanément : un des deux dessins est toujours le même, l'autre est soit identique (*en haut, a*), soit différent (*en haut, b*). Quand la deuxième image est identique à la première, le sujet doit appuyer sur une touche ; sinon, il appuie sur une autre. C'est une tâche d'appariement (*au centre*). Dans la deuxième série de tests, les deux images ne sont pas projetées en même temps : l'image de référence (toujours la même) est projetée seule, puis, huit secondes plus tard, on projette une deuxième image, qui est soit identique, soit différente. Au cours de cette tâche d'appariement différé (*en bas*), la mémoire à court terme intervient : on observe une intense activation du cortex préfrontal au cours de la tâche d'appariement différé (sur toutes ces images, le front est vers le haut ; une faible activité apparaît en bleu, une activité élevée en rouge).



Joachim Fuster



**2. LE CORTEX CÉRÉBRAL** humain a été représenté sur une face latérale (à gauche) et sur une coupe, au centre du cerveau (à droite). Les nombres indiquent l'ordre de myélinisation des divers zones (les neurones ne sont fonctionnels que si leurs prolongements sont entourés d'une gaine de myéline qui autorise la propagation

de l'influx nerveux). La scissure de Rolando, sur la surface latérale, sépare le cortex postérieur, dit perceptif (à droite de la scissure), du cortex frontal, dit moteur (à gauche). Les zones sensorielles et motrices primaires sont indiquées en rouge ; les zones d'association sont représentées en blanc et en ocre clair.

du cortex temporel et du cortex pariétal, et celle du cortex préfrontal (dans le lobe frontal), sont les dernières à se développer. La scissure de Rolando (voir la figure 2) sépare deux grands secteurs corticaux. L'un dédié à la perception, l'autre à l'action. Dans chaque secteur, la complexité augmente du cortex primaire au cortex associatif, qui abrite notamment des réseaux de la mémoire.

## La hiérarchie de la mémoire

Ces gradients de complexité correspondent assez bien au nombre de connexions entre zones. Dans le cortex postérieur, les fibres partent des zones sensorielles primaires et se projettent vers les zones du cortex associatif. Dans le cortex frontal, inversement, les fibres se projettent du cortex associatif (préfrontal) vers le cortex postérieur (moteur). Toutefois, dans le cortex antérieur comme dans le cortex postérieur, toutes les connexions sont réciproques : toute action projective est accompagnée d'une rétroaction. En outre, les directions des connexions reflètent le degré d'élaboration du traitement de l'information au cours de la formation des souvenirs et de leur évocation.

Les zones sensorielles primaires de la mémoire phylétique envoient des informations vers les zones associatives postérieures, où les associations synchrones forment les réseaux de la mémoire perceptive. Au cours de mécanismes similaires, les rétroactions motrices tissent des réseaux de

mémoire motrice dans le cortex frontal. Ces réseaux regissent les actes élémentaires, innés, qui se manifestent dans le cortex moteur primaire et dans les structures motrices sous-corticales. Ainsi, la mémoire perceptive et la mémoire motrice dérivent de la mémoire phylétique. Les deux sont associatives, gravées dans le cortex et organisées de façon hiérarchique.

La mémoire perceptive est celle des sens. C'est la mémoire personnelle, qui confère la connaissance. Les diverses formes de la mémoire perceptive sont regroupées selon leur contenu sensoriel. Il existe une hiérarchie dans la mémoire perceptive, qui va du sensoriellement concret au conceptuellement général. À la base se trouvent les souvenirs des sensations élémentaires ; au sommet, les concepts abstraits.

La hiérarchie de la mémoire perceptive se fonde, à son tour, sur une hiérarchie des aires du cortex postérieur. Aux niveaux inférieurs, la mémoire perceptive correspond à l'analyse de l'information sensorielle. De fait, il existe une hiérarchie dans le traitement de toutes les informations sensorielles (de la vue, du toucher, de l'ouïe, du goût et de l'olfaction). Elles convergent toutes dans le cortex associatif sensoriel et dans des structures limbiques des lobes temporaux, notamment dans l'hippocampe.

Les zones d'association parasensorielles, proches du cortex sensoriel, stockent la mémoire sensorielle. Quand elles sont lésées, le malade souffre d'agnosie, c'est-à-dire d'un déficit dans

la reconnaissance du sens. Pour être active, la mémoire perceptive nécessiterait l'activation de divers neurones des zones sensorielles primaires, peut-être grâce à des projections issues du cortex associatif : on a effectivement montré, par les méthodes d'imagerie du fonctionnement cérébral, que les images visuelles mentales (on demande au sujet de penser à une image) activent le cortex visuel primaire.

Ainsi, les mêmes zones corticales servent à la fois au stockage de la mémoire perceptive et au traitement des informations sensorielles, ce qui offre un support neuronal aux relations entre la perception et la mémoire. Nous enregistrons ce que nous percevons, et nous percevons ce que nous enregistrons. Au cours d'une perception, nous projetons sur le monde nos attentes et nos « hypothèses », fondées sur l'expérience passée.

Quand on remonte dans la hiérarchie corticale de la mémoire (et de la perception), dans les aires qui se développent tardivement, on entre dans les réseaux complexes et étendus de la mémoire polysensorielle et déclarative (la mémoire des faits et des connaissances). Ici, la topographie est confuse, car les réseaux qui unissent divers domaines du cortex associatif et dont chacun représente des qualités différentes selon l'expérience, sont très imbriqués.

Chez l'homme, la stimulation électrique de certains points de la surface du cortex postérieur déclenche diverses sensations, qui ont parfois des caractéristiques

téristique de la mémoire épisodique (la mémoire autobiographique). Les réseaux de la mémoire épisodique sont très étendus, et l'on n'en connaît pas la topographie. De même, on ignore la localisation précise des réseaux de la mémoire sémantique, une forme élaborée de la mémoire déclarative. Toutefois, étant donné les troubles du langage que déclenchent certaines lésions du cortex postérieur associatif, on pense que les réseaux de la mémoire sémantique y sont localisés.

Il n'existe pas le moindre élément qui permettrait de localiser la topographie des réseaux de la connaissance intellectuelle, le niveau le plus élevé de la hiérarchie de la mémoire perceptive. Ce type de mémoire semble réparti dans tout le cortex, dans la mesure où il se fonde sur de multiples expériences et d'innombrables associations.

Jusqu'à présent, nous avons ébauché la hiérarchie des diverses catégories de la mémoire perceptive. Toutefois, tous les réseaux, quel que soit leur degré d'élaboration, sont interconnectés ce qui expliquerait que les amnésies totales sont rares. En outre, la majorité des souvenirs sont imbriqués : le souvenir visuel et sonore que j'ai du tramway de San Francisco (mémoire sensorielle) est associé au souvenir de ma dernière visite dans cette ville (mémoire épisodique), ainsi qu'à la signification du mot tramway (mémoire sémantique) et au concept de transports en commun (mémoire conceptuelle). Ces souvenirs et leurs réseaux de mémoire sont étroitement liés, de la mémoire inférieure à la mémoire supérieure, et sont connectés tant verticalement qu'horizontalement.

## La mémoire motrice

Chez les mammifères, les niveaux inférieurs de la hiérarchie motrice sont situés dans la moelle épinière et dans le cervelet. Ces structures stockent les formes élémentaires de la mémoire motrice, par exemple les actes réflexes qui régissent les réactions de défense. Certains de ces réflexes sont conditionnés et subissent l'influence des centres supérieurs (l'association critique s'effectue dans le cervelet).

Au-dessus du cervelet, dans la hiérarchie des structures motrices, se trouvent les noyaux du thalamus, les ganglions de la base et l'hypothalamus.

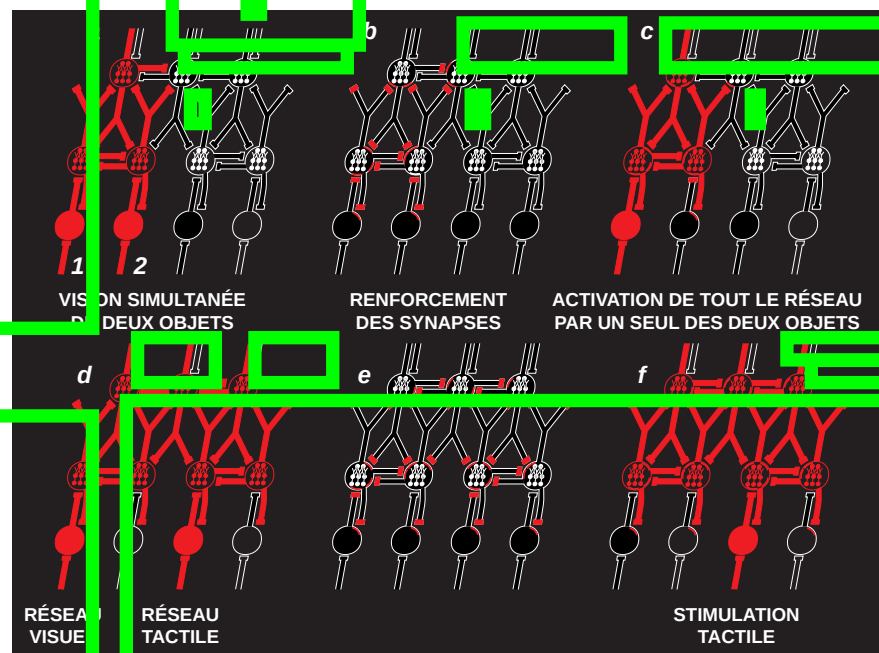
Comme dans les centres inférieurs, la mémoire motrice stockée dans ces structures est phylétique : c'est une mémoire innée, stéréotypée et associée à des conduites instinctives.

Le cortex du lobe frontal est la base des niveaux supérieurs de la hiérarchie de la mémoire motrice. Le cortex moteur primaire est le siège de la mémoire motrice phylétique, celle des actes moteurs élémentaires, notamment la contraction musculaire. Au-dessus du cortex moteur primaire, dans la hiérarchie motrice, se situe le cortex prémoteur. La représentation et le traitement du mouvement y sont plus complexes que dans le cortex moteur.

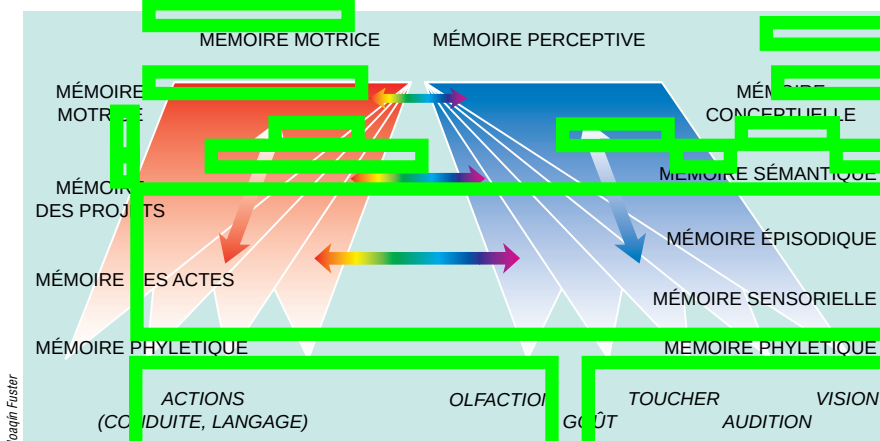
Le cortex préfrontal, cortex associatif du lobe frontal, constitue le niveau supérieur de la hiérarchie motrice. Il se développe tardivement ; il reçoit des fibres issues des structures sous-cor-

тикаles et limbiques, ainsi que du néocortex. De longues fibres unissent les réseaux de la mémoire perceptive, localisés dans le cortex postérieur, aux réseaux moteurs préfrontaux.

Les zones corticales préfrontales stockent des schémas d'actions séquentielles visant à atteindre un but. Ainsi, les singes subissant des lésions préfrontales apprennent difficilement des tâches dont l'exécution exige une succession de plusieurs actions. Toutefois, grâce à un entraînement intensif, les représentations frontales des actions semblent se réorganiser dans les structures motrices inférieures, notamment dans les ganglions de la base. Les personnes souffrant de lésions frontales ne parviennent plus à effectuer des séquences de mouvements complexes, mais continuent à exécuter des séquences automatiques. Chez le singe,



**3. LES SOUVENIRS** sont formés, stockés et activés par des mécanismes d'association. Nous avons supposé, arbitrairement, qu'un réseau de mémoire est constitué de onze neurones (schématisés par les cercles rouges). Tous les modèles connus de connexions corticales ont été représentés : la projection vers l'avant, la rétroaction, les connexions latérales parallèles, convergente et divergente. Les impulsions se propagent de bas en haut, des récepteurs sensoriels vers les étages les plus élevés du réseau, et les neurones actifs sont représentés en rouge. Les trois schémas supérieurs illustrent les changements dans le réseau à la suite de l'association entre deux stimulations visuelles : la coïncidence temporelle des stimulations (représentées par les neurones 1 et 2 activés) renforce les contacts synaptiques entre les ensembles de neurones qui représentent chacune des deux stimulations (a) ; la mémoire à long terme des deux stimulations associées reste enregistrée dans les synapses renforcées (b, en rouge) ; désormais, une seule des deux stimulations active tout le réseau de mémoire associative qui, en raison de l'activation préalable de ces synapses, inclut le réseau de la deuxième stimulation (c). Les schémas inférieurs montrent les mêmes processus d'association par coïncidence temporelle entre des stimulations dues à deux modalités sensorielles distinctes, l'une visuelle, l'autre tactile : les deux stimulations simultanées activent leur propre réseau (d) ; les synapses sont renforcées, et la mémoire à long terme y est gravée (e) ; la stimulation tactile réactive le réseau, ce qui évoque aussi le souvenir de l'image visuelle (f).



**4. LES DIVERS TYPES DE MÉMOIRE** sont organisés de façon hiérarchique, aussi bien en ce qui concerne la mémoire motrice ou exécutive (à gauche) que la mémoire perceptive (à droite). Les flèches symbolisent la multitude des connexions entre les différentes régions du cortex qui abritent les divers types de mémoire. Les deux hiérarchies, motrice et perceptive, reposent sur la mémoire phylétique constituée de zones sensorielles et motrices primaires ; les réseaux représentatifs des concepts généraux sont situés au sommet.

les lésions corticales bloquent tout nouvel apprentissage, mais n'empêchent pas l'exécution des actions mémorisées avant la lésion. La tomographie par émission de positons confirme le basculement de l'activation des réseaux de mémoire : lorsqu'on demande à quelqu'un de réaliser une tâche manuelle nouvelle, l'imagerie par tomographie indique que c'est le cortex préfrontal qui est activé. Puis, à mesure que la personne connaît bien la tâche demandée, l'activité du cerveau et des ganglions de la base augmente, tandis que celle du cortex préfrontal diminue.

En résumé, une hiérarchie des zones frontales implique une hiérarchie de souvenirs moteurs. Les souvenirs moteurs sont stockés dans des réseaux préfrontaux et prémoteurs, du moins aux tout premiers stades de l'apprentissage. Lorsqu'une séquence motrice est acquise et qu'elle devient automatique, sa représentation semble être reléguée dans des structures inférieures. Toutefois, certaines tâches continuent à dépendre du cortex frontal.

La plupart du temps, notre mémoire à long terme est en état de latence, c'est-à-dire que nous n'en avons pas conscience, les agrégats neuronaux de ses réseaux étant alors inactifs. Un réseau de mémoire se réveille lorsque le souvenir qu'il représente est réactivé par une évocation ; par association, le reste du réseau qui lui est connecté par des expériences antérieures est également réactivé. Ces activations ne nécessitent pas un état de conscience

complète : certains éléments du réseau peuvent être activés inconsciemment.

L'hippocampe semble jouer un rôle important dans la réactivation d'un réseau neuronal par un souvenir. Ainsi, les personnes qui ont des lésions de cette structure ne parviennent ni à mémoriser de nouveaux souvenirs, ni à se souvenir des anciens. Comme les réseaux de nouveaux souvenirs sont des prolongements des anciens, les mécanismes neuronaux de formation et de récupération des souvenirs sont étroitement liés, voire identiques, et l'hippocampe participe aux deux.

### La réactivation des souvenirs

L'évocation d'anciens souvenirs perceptifs est la même que la formation de nouveaux souvenirs, suppose l'activation associative de vastes réseaux neuronaux du cortex postérieur. Quand le souvenir évoqué est associé à une action, le réseau activé s'étend jusqu'au lobe frontal. La nécessité de retenir le souvenir pour le traiter active les réseaux préfrontaux qui envoient des impulsions au cortex postérieur et maintiennent en activité le réseau perceptif jusqu'au terme de l'action motrice ou mentale.

Chez l'homme et chez les primates non humains, la mémoire est stockée dans des réseaux de neurones du cortex, qui s'enchevêtrent. Puisque le nombre des associations potentielles est quasi infini, celui des réseaux potentiels l'est aussi.

Les réseaux de mémoire se forment et s'étendent grâce à l'activation simultanée d'ensembles de neurones qui représentent des informations et des relations internes et externes. Ces réseaux restent activables tout au long de la vie, sujets à des expansions et à des recombinaisons qui résultent de nouvelles expériences. Simultanément, les neurones et leurs connexions sont vulnérables et vieillissent : les souvenirs s'estompent.

Les réseaux de la mémoire perceptive et de la mémoire motrice s'organisent hiérarchiquement à partir des cortex primaires sensoriel et moteur, fondements de la mémoire phylétique. Toutefois, cette organisation ne nécessite pas que les souvenirs soient stockés de façon rigide dans des réseaux de neurones corticaux fins. Au contraire, les différents types de mémoire sont liés entre eux par des réseaux localisés dans diverses strates de la hiérarchie perceptive et de la hiérarchie motrice.

La mémoire à court terme et la mémoire à long terme reposent vraisemblablement sur les mêmes substrats corticaux. Les connexions entre les différents niveaux de la hiérarchie de la mémoire permettent la récupération des souvenirs par plusieurs voies d'accès. Ainsi la mémoire épisodique ou sémantique, qui est ancrée dans des associations étendues, résiste à certaines lésions corticales. Toutefois, certaines de ces associations spécifiques entre les liens de la mémoire, les visages, finissent par être perdues lorsque les connexions dans le cortex s'affaiblissent, notamment lors du vieillissement normal. L'exercice mental limite probablement cette usure en renforçant des connexions anciennes ou en créant de nouvelles.

Joaquin FUSTER travaille à l'Institut de recherches sur le cerveau, à l'Université de Los Angeles.

J. FUSTER, *Memory in the Cerebral Cortex: An Empirical Approach to Neural Networks in the Human and Nonhuman Primates* MIT Press, 1995.

Y.-D. ZHOU, J. FUSTER, *Mnemonic Cell Activity in Somatosensory Cortex*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 93, pp. 10533-10537, 1996.

J. FUSTER, *The Prefrontal Cortex*, Lipincott-Raven Press, 1997.



# Les pilules de l'intelligence

MARGUERITE HOLLOWAY

*Les nouveaux traitements de la maladie d'Alzheimer et d'autres maladies neurologiques amélioreront-ils également la mémoire des personnes jeunes et en bonne santé?*

Jadis les conteurs, les aèdes, les bardes mémorisaient d'interminables récits épiques sans s'aider de médicaments. La mémoire humaine n'a pas faibli, mais la quantité d'informations que la vie moderne nous force à mémoriser est si considérable que des pilules pour la mémoire seraient utiles. Tout comme nous aspirons à la beauté artificielle, conférée non pas par notre patrimoine génétique ou par la culture physique, mais par le bistouri du chirurgien ou par la silicone, certains sont tentés de stimuler leur cerveau avec des substances qui permettraient de penser plus vite et d'avoir plus de mémoire.

La quête de ces composés de l'intelligence a commencé au début des années 1990, quand certains botanistes ou pharmaciens ont vanté des régimes alimentaires ou des extraits végétaux, tels ceux du ginkgo biloba, pour améliorer les performances du cerveau.

Aujourd'hui, le chiffre d'affaires des sociétés qui vendent ces produits est énorme ; la vente par correspondance s'est étendue à l'Internet. Au Japon, par exemple, une vingtaine de ces produits sont disponibles, et les sommes en jeu sont supérieures à dix milliards de francs par an. Pourtant les médecins sont sceptiques : ces produits sont inefficaces, voire dangereux, car on ignore généralement leur mode d'action et leurs interactions potentielles avec d'autres substances.

De leur côté, les neurobiologistes recherchent des molécules qui amélioreraient la mémoire des personnes âgées ou qui soulageraient les troubles psychiatriques. Deux médicaments, la tacrine et le donepezil, combattent la maladie d'Alzheimer. D'autres médicaments sont en cours d'essais cliniques

et seront peut-être bientôt disponibles. Des centaines de molécules sont étudiées en laboratoire. Ces composés seront-ils un jour utilisables par tous ?

Les substances dont on étudie l'action sur la mémoire agissent de diverses façons : car les types de mémoire sont variés : mémoire à court terme (ou mémoire de travail), mémoire à long terme, mémoire émotionnelle ou mémoire réflexive. Les neurobiologistes étudient les réseaux moléculaires de la mémoire, les composantes génétiques ou encore le rôle des hormones. Par tomographie, ils observent les régions du cerveau dont l'activité s'accroît lorsqu'on active la mémoire des mots ou celle des sons, et déterminent ainsi les réseaux de la mémoire. Avec ces analyses est né l'espoir de savoir, un jour, réparer et stimuler la mémoire.

Malgré l'optimisme engendré par toutes ces découvertes, des doutes subsistent : la mémoire est si complexe, les réseaux de la mémoire tellement imbriqués avec les réseaux qui soutiennent d'autres activités mentales que les molécules risquent d'être insuffisamment spécifiques. Aucune pilule ne nous aidera jamais à retrouver nos lunettes ou à nous souvenir du nom des personnes que nous avons rencontrées lors d'une soirée. De surcroît, une molécule qui améliorerait les mécanismes mnésiques risquerait de détériorer d'autres fonctions cognitives.

Enfin, une molécule qui améliorerait la mémoire à court terme ou l'attention n'augmenterait pas nécessairement l'intelligence. La mémoire se construit par élimination de certaines informations qui ne sont plus pertinentes, de sorte qu'une accumulation systématique de tous les souvenirs serait sans doute aussi pénalisante qu'une mémoire déficiente.

## L'activation par les neuromédiateurs

La formation et l'activation des souvenirs reposent sur la libération et la recapture des neuromédiateurs, des molécules libérées par les neurones dans l'espace étroit, nommé fente synaptique, qui les sépare des neurones suivants, les neurones postsynaptiques. La face synaptique des neurones postsynaptiques est garnie de récepteurs spécifiques des neuromédiateurs. Après avoir traversé l'espace synaptique, les neuromédiateurs se lient à ces récepteurs et déclenchent des réactions qui permettent à l'information de se propager dans le neurone postsynaptique sous la forme d'un courant électrique. Quand ce courant atteint l'autre extrémité du neurone postsynaptique, il fait libérer des médiateurs chimiques et ainsi de suite. Trouver les circuits de la mémoire revient à identifier lesquels des 100 milliards de neurones du cerveau (chacun établissant en moyenne 10 000 connexions avec d'autres neurones) sont actifs au cours des activités mnésiques et lesquels des quelque 50 neuromédiateurs identifiés sont libérés aux diverses synapses.

Depuis les années 1950, on sait que l'hippocampe est une structure essentielle de la mémoire. L'hippocampe fait partie du système limbique, un réseau localisé sous le cortex cérébral, au-dessus du tronc cérébral, et qui commande les émotions. Depuis les années 1980, on sait que le glutamate (un neuromédiateur) et ses récepteurs NMDA participent dans l'hippocampe à une forme d'apprentissage, la potentialisation à long terme : une stimulation répétée renforce les communications entre certains neurones (un animal qui emprunte toujours la même trajectoire, dans une forêt, finit par créer une piste permanente).

Certains neurobiologistes qui recherchent des stimulants de la mémoire essaient d'augmenter l'activité des récepteurs NMDA pour favoriser la potentialisation à long terme. À l'Université d'Irvine, Gary Lynch étudie sur des molécules nommées AMPAkinés, qui interagissent avec un type particulier de récepteurs du glutamate, les récepteurs AMPA.

Les récepteurs NMDA réagissent peut-être aux neurotrophines, des com-

posés indispensables à la survie et à la différenciation des neurones. Il y a quelques années, on a découvert qu'un des facteurs de croissance des nerfs augmente l'efficacité des connexions synaptiques entre les neurones de l'hippocampe. Depuis, on a montré que l'hippocampe contient plusieurs neurotrophines, et que le facteur de croissance découvert agit sur les récepteurs NMDA, au moins sur des cultures de cellules et chez le rat.

## L'activation des gènes

Si l'on dispose un jour de substances efficaces contre les pertes de mémoire, comment les administrera-t-on ? Les grosses molécules traversent difficilement la barrière hématoencéphalique, qui protège le cerveau. C'est pourquoi plusieurs équipes tentent d'activer des gènes, dans le cerveau, pour qu'ils produisent des facteurs de croissance, au bon endroit. Par



1942, photographie de David Heald, © The Solomon R. Guggenheim Foundation, New York

exemple, James Simpkins, Edwin Meyer et leurs collègues de l'Université de Gainesville, en Floride, utilisent un virus modifié qui transporte le gène du facteur de croissance des nerfs dans le cerveau. Ils cherchent les neurones qui incorporent le gène et produisent le facteur de croissance, ceux qui l'incorporent sans l'exprimer, et ceux qui ne l'incorporent pas. L'objectif est naturellement une meilleure expression du gène dans les neurones.

Les gènes orchestrent toutes les activités physiologiques qui façonnent la mémoire (et toutes les autres fonctions), de la production du facteur de croissance du nerf à celle des récepteurs NMDA. Aussi les biologistes espèrent-ils que l'exploration des mécanismes moléculaires et génétiques de la **mémoire les conduira** à

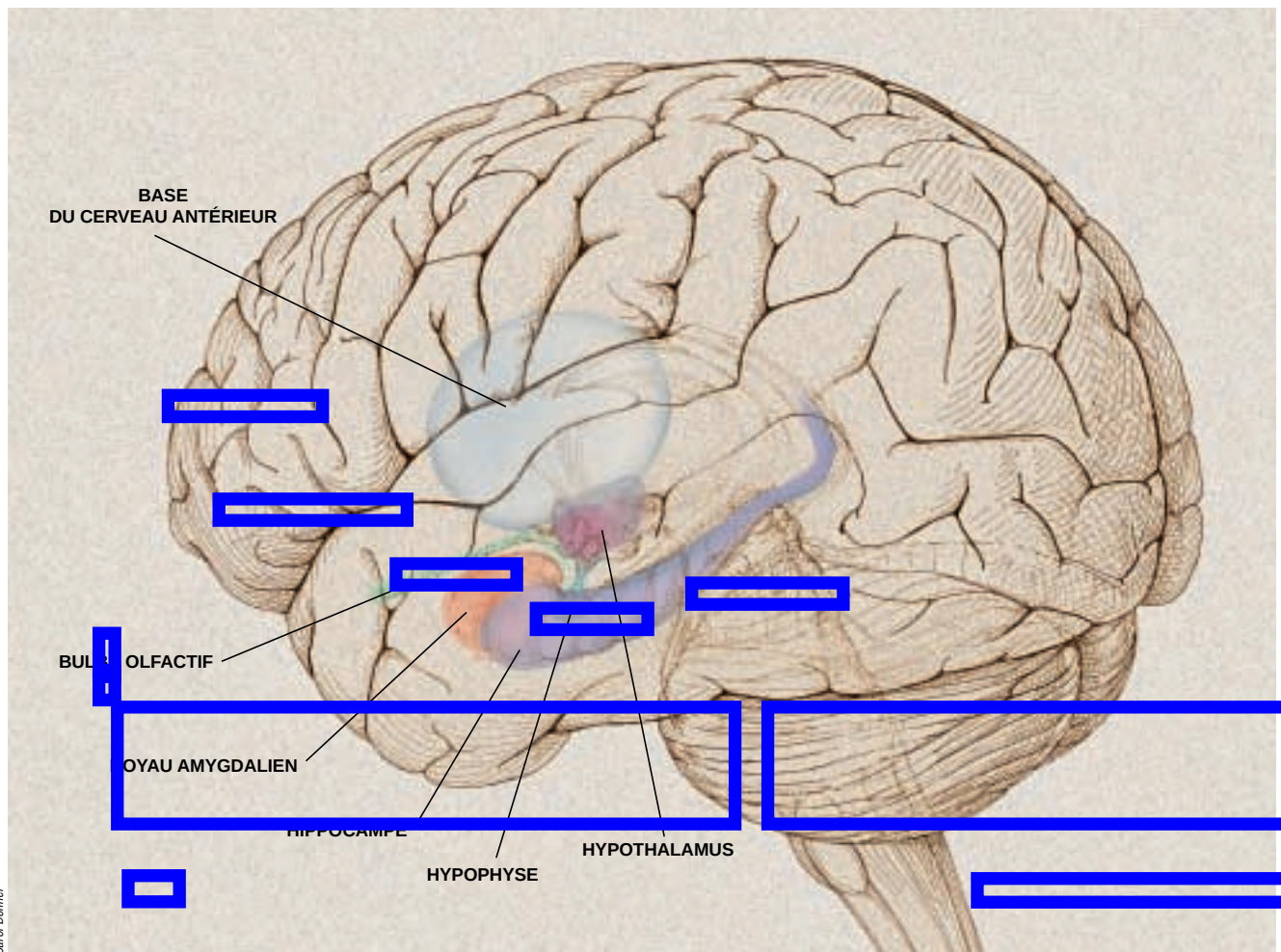
découvrir de nouveaux stimulants de la mémoire. Les études d'un mollusque par l'équipe d'Eric Kandel, à l'Université Columbia, et de la drosophile, par Timothy Tully et ses collègues de Cold Spring Harbor ont abouti à l'identification d'un gène, nommé *CREB*, qui semble jouer un rôle essentiel dans l'élaboration de certains souvenirs. Les animaux dépourvus de ce gène ne se souviennent de rien. Certains stimulants parviendront peut-être à activer les gènes *CREB* silencieux et, par conséquent, à améliorer la mémoire.

L'activation des gènes *CREB* pourrait n'être qu'une des façons d'améliorer la mémoire. Des biologistes de l'Université de Toronto ont récemment découvert que la potentialisation à long terme de l'hippocampe serait bloquée par une enzyme nommée Src,

qui commande l'efficacité des récepteurs NMDA ; un inhibiteur de cette enzyme améliorerait la potentialisation à long terme.

## L'influence des hormones

Cependant, tous les chemins ne mènent pas au récepteur NMDA. Les estrogènes, hormones féminines, agissent sur la mémoire de façon différente. Au début des années 1990, à l'Université Columbia, Dominique Toran-Allerand a découvert que de nombreux neurones de la base du cerveau antérieur, une aire proche du système limbique, dévastée par la maladie d'Alzheimer, portent des récepteurs des estrogènes et du facteur de croissance des nerfs. Des travaux antérieurs ayant montré que l'acétylcholine est un facteur clef de la mémoire (bien qu'on ignore encore ses méca-



**1. PLUSIEURS RÉGIONS DU CERVEAU** participent à l'élaboration de la mémoire. L'hippocampe joue un rôle essentiel. Localisé dans la partie la plus interne du cerveau, l'hippocampe, les noyaux amygdaliens et d'autres structures, forment le système limbique, qui commande les émotions. Les noyaux amygdaliens et l'hippocampe sont

à proximité du nerf olfactif, ce qui explique pourquoi les odeurs déclenchent des émotions et des souvenirs très précis. Les hormones de stress, libérées par l'hypothalamus, par l'hypophyse et par les glandes surrénales (situées au-dessus des reins), participent également à certaines formes de mémoire.

nismes d'action), D. Toran-Jaber a supposé que ces neurones cholinergiques (qui produisent un autre neurotransmetteur, l'acétylcholine) ont besoin d'estrogènes pour fonctionner correctement. L'étude des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer a corroboré cette

hypothèse : ces personnes présentent des lésions des neurones cholinergiques et ont des concentrations cérébrales en acétylcholine faibles (la tacrine et le donepezil inhibent les enzymes qui détruisent l'acétylcholine).

Par ailleurs, on constate que les femmes sont plus souvent atteintes

de la maladie d'Alzheimer que les hommes. Quelques études ont montré que l'administration d'estrogènes réduit le risque de maladie d'Alzheimer, et qu'elle améliore la mémoire à court terme chez les femmes déjà atteintes et chez les femmes ménopausées sans troubles particuliers. Les effets protecteurs des estrogènes ne seront correctement établis que par l'étude clinique de très nombreuses femmes. Ces essais viennent de commencer : 4 000 femmes ont été recrutées dans le cadre d'un vaste programme américain, dont les résultats sont attendus pour 2 005 ; une autre étude est réalisée à l'Université Johns Hopkins, en collaboration avec l'Université Columbia et la clinique Mayo, sur 900 femmes qui ont, dans leur famille, des personnes atteintes.

Chez les hommes, la testostérone, hormone masculine, est partiellement transformée en estrogènes dans le cerveau. La concentration hormonale est quasi constante chez les hommes tout au long de leur vie, alors que la concentration en estrogènes diminue brusquement chez les femmes à partir de la ménopause. Des expériences ont montré que les estrogènes augmentent la mémoire à court terme et la mémoire à long terme chez les animaux des deux sexes, et que ces hormones protègent le cerveau contre les lésions provoquées par la manque d'oxygène au cours des infarctus cérébraux. Par conséquent, J. Simpkins et ses collègues recherchent des substances de type estrogènes, non féminisantes, qui pourraient être utilisées chez l'homme et qui pourraient réduire le risque de cancer associé aux

## La madeleine de Proust

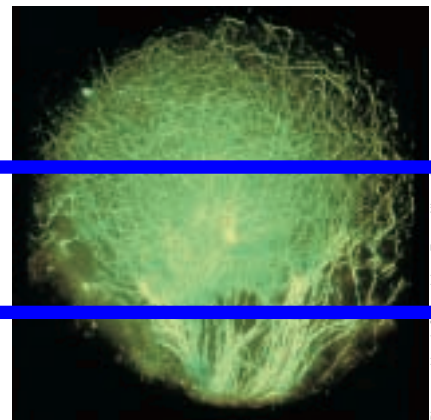
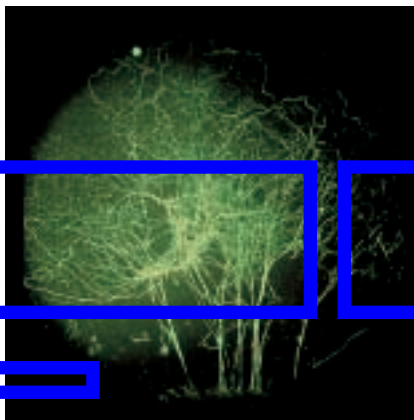
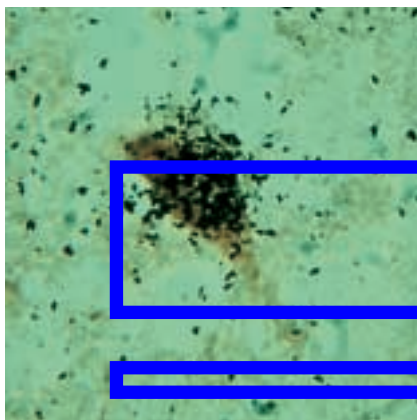
Il n'est guère surprenant que certaines odeurs déclenchent des souvenirs précis : le nerf olfactif est très proche du noyau amygdalien, le centre des émotions, et de l'hippocampe, le centre de certaines formes de mémoire.

Pour savoir quel est le rôle des odeurs dans des situations d'émotion intense, Rachel Herz, du Centre Monell, à Philadelphie, a testé des étudiants anxieux parce qu'ils s'apprêtaient à passer un examen. Elle a donné une liste de mots à mémoriser à un groupe de ces étudiants, dans une pièce où était diffusée une odeur ; elle a proposé la même liste à un autre groupe d'étudiants, placés dans une pièce sans odeur. Une semaine plus tard, ceux qui avaient été exposés à l'odeur se souvenaient deux fois mieux des mots de la liste que les autres étudiants.

Dans une autre expérience, R. Herz a essayé de déterminer si la mémoire évoquée par les odeurs était plus précise que la mémoire évoquée par d'autres signaux, par exemple des images. L'odeur n'augmente pas la précision, mais plutôt l'intensité émotionnelle du souvenir. Ainsi, si votre stimulant préféré est une épice ou un parfum particulier, dès que vous le sentirez, vos émotions l'emporteront sur votre réflexion.



LA MENTHE POIVRÉE fait partie des odeurs qui stimulent la mémoire des émotions.



Photographies de G. Toran-Jaber

**2. LES RÉCEPTEURS DES ESTROGÈNES et ceux du facteur de croissance des nerfs (les taches noires sur l'image de gauche) sont présents sur les mêmes neurones du cerveau basal, une région qui est endommagée chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Cette découverte montre que les estrogènes pourraient être indispensables au bon fonctionnement de cette région cérébrale (et**

**d'autres). En présence de faibles quantités d'estrogènes, les neurones se développent (au centre) ; des concentrations supérieures renforcent encore les arborescences neuronales (à droite). On évalue aujourd'hui l'intérêt des estrogènes dans la prévention de la maladie d'Alzheimer ou dans l'amélioration de la mémoire chez les femmes déjà atteintes par la maladie.**

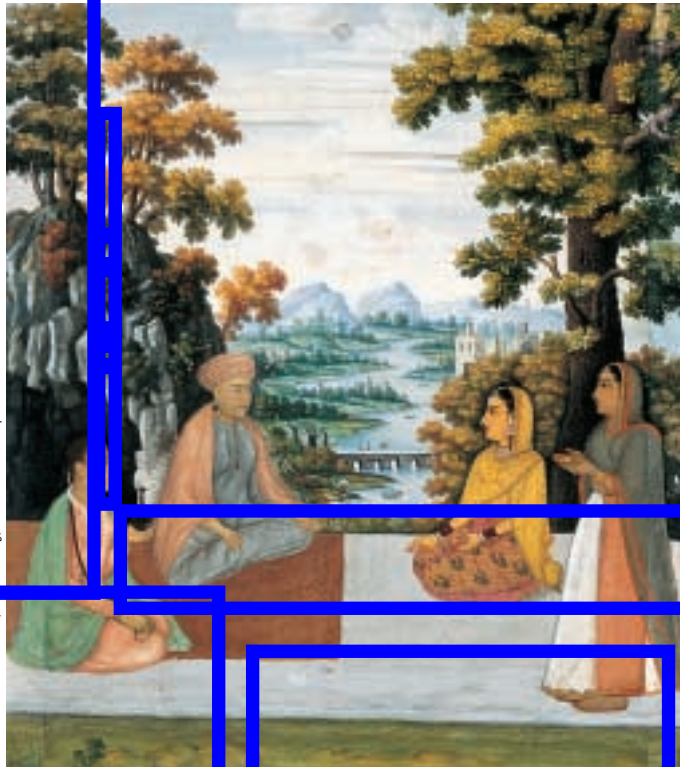
estrogène chez la femme. Ces composés amélioreraient les fonctions cognitives, en même temps qu'ils protégeraient le système nerveux.

D'autres hormones participent aux mécanismes de la mémoire. Ainsi les hormones de stress, telles que les corticostéroïdes, potentialisent la mémoire. Plusieurs équipes étudient l'effet de ce type de vigilance sur la mémoire; elles analysent le rôle spécifique des différentes hormones et cherchent comment appliquer les résultats de ces recherches à l'amélioration de la mémoire. Un essai clinique sur un bêtabloquant est en cours : cette substance semble atténuer les souvenirs déplaisants chez les personnes qui ont subi un traumatisme grave (les bêtabloquants sont utilisés dans le traitement de l'hypertension).

Les hormones de stress seraient bonnes pour la mémoire, mais dommageables pour l'organisme. C'est le cas pour d'autres substances, telle la caféine, qui améliore la vigilance, mais provoque parfois des troubles gastro-intestinaux. Les effets stimulants de la caféine seraient dus au blocage d'un des types de récepteurs de l'adénosine, un neuromédiateur dont l'une des actions serait de diminuer la vigilance.

## Les bienfaits du sucre

Une tasse de café sucré serait encore plus efficace. Bien qu'en excès, il soit nocif, le sucre serait le meilleur des stimulants de l'intelligence. Les études menées sur le stress ont révélé le rôle du sucre : l'adrénaline, l'une des hormones libérées par le stress, déclenche une augmentation de la concentration sanguine en glucose. De plus, l'ingestion de sucre améliore la mémoire chez les rongeurs et chez l'homme, quel que soit l'âge. De même, le glucose améliore certaines performances cognitives chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer ou de trisomie. Toutefois les quelques études menées n'ont concerné qu'un nombre



**3. LE CONTE** est une tradition ancienne. Les poètes qui récitaient les grandes épopées indiennes ou grecques n'avaient pas besoin de substances pour préserver la puissance de leur mémoire. On étudie néanmoins des composés qui agiraient sur des fonctions mnésiques spécifiques.

limité de personnes et elles restent à confirmer. On ignore encore si le glucose déclenche la production d'acétylcholine ou si c'est l'insuline (l'hormone pancréatique qui dégrade le glucose), plutôt que le sucre lui-même, qui favorise la mémorisation. Quoi qu'il en soit, quelques bonbons semblent recommandés.

De même, la nicotine améliore la mémoire à court terme. Comme d'autres substances du plaisir, c'est un analogue d'un neuromédiateur naturel : elle ressemble à l'acétylcholine et se lie à ses récepteurs, dits nicotiniques. En raison du rôle des neurones cholinergiques dans la maladie d'Alzheimer, certains biologistes se sont intéressés aux récepteurs nicotiniques. Après quinze ans de recherches, E. Meyer et ses collègues ont synthétisé une substance qui s'est révélée être un puissant stimulant cognitif chez les quelques hommes jeunes et en bonne santé qui ont participé à l'expérience. Ce résultat était surprenant, car, généralement, les molécules efficaces chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer n'ont aucun effet chez les personnes normales.

Les neurobiologistes trouveront-ils un jour des dopants pour le cerveau?

De telles molécules ne risquent-elles pas de nous rendre dépendants? Qui aura les moyens de les acheter? Que signifiera la mémoire – et peut-être l'intelligence – si nous avons les moyens de la dominer?

La perspective de soulager les personnes qui souffrent de déficits cognitifs est enthousiasmante. Celle d'augmenter de quelques points le quotient intellectuel d'une personne normale et en l'absence de santé qui aurait à accomplir certaines tâches semble envisageable. En revanche, si seules les personnes dont les revenus sont suffisants pouvaient se procurer des «pilules de l'intelligence», les inégalités sociales et économiques qui existent déjà seraient encore renforcées.

De telles molécules ne risqueraient-elles pas, en outre, de déclencher une lassitude intellectuelle? Nous risquons d'être moins intelligents encore plus que nous ne le faisons aujourd'hui, mais de nous en servir encore moins. Selon Albert Einstein, «Nous devons faire attention de ne pas faire de l'esprit notre dieu; il a des muscles puissants, mais il n'a aucune personnalité.»

Marguerite HOLLOWAY est journaliste à la revue *Scientific American*.

Floyd E. BLOOM et Arlyne LAZERSON, *Brain, Mind and Behavior*, deuxième édition, W. H. Freeman and Company, 1988.

George JOHNSON, *In the Palaces of Memory: How we Build the World inside our Heads*, Knopf, 1991.

Bruce S. MCEWEN et Harold M. SCHNECK, *The Hostage Brain*, Rockefeller University Press, 1994.

Peter J. WHITEHOUSE, Eric JUENGST, Maxwell MEHLMAN et Thomas H. MURRAY, *Enhancing Cognition in the Intellectually Intact*, in *Hastings Center Report*, vol. 27, n° 3, pp. 14-22, 1997.

**L'INTELLIGENCE**



**L'intelligence humaine**



# L'intelligence de l'enfant

BERNARD THIS

*Le QI mesure autant la motivation de l'enfant que sa capacité à y briller. De plus, il s'améliore par une mise en confiance psychothérapique de l'individu.*

**D**écouragé, un enfant de dix ans «traine» en classe ; des tests sont pratiqués : «QI-80». Une psychothérapie est entreprise. Repeutivement ce garçon dessine une auto... une auto sur une route... puis une auto qui arrive dans une station d'essence... une auto et une pompe à essence... une auto qui fait le plein d'essence, avec le tuyau qui entre dans le réservoir.

— Oui, mais l'essence, comment ça fait marcher l'auto ? demande l'enfant.

— Ah, bonne question !

Pendant plusieurs séances, je réponds à ses interrogations concernant le «moteur». Piston, compression du mélange gaz-essence, étincelle produite par la «bougie», explosion, décompression brutale, transformation du mouvement du piston par la «bielle», l'engrenage faisant tourner l'axe des roues : bref, un cours de «technique auto», et un questionnement sur le sens de mots : «D'où viennent-ils, qu'est-ce qu'ils veulent dire?»

Manifestement cet enfant n'est pas débile avec moi ; d'un air entendu, il me glisse : «Oui, tout ça, j'ai compris, mais le papa, ce qu'il met dans la maman, comment ça fait un bébé?»

— Ah, maintenant, voilà des questions de garçon intelligent !

Parler de l'amour, du désir, du plaisir, c'était interdit, impossible, mal, pas bien, pas poli, dégoûtant. La culpabilité (imaginaire) faisait tache d'huile sur toutes les acquisitions scolaires (symbolique), et le réel du sexe et de la mort ne pouvait être évoqué.

Mais le moteur d'une voiture, qui consomme «jusqu'aux 100» kilomètres et fait du bruit, des pétarades, des gaz sortant par un «pot» d'échappement, on peut en parler, de façon raisonnable, en posant une multitude de questions qui paraissent faire plaisir à cet homme en «blouse blanche» ; lequel relance parfois

les questions, interrogeant à son tour : «Qu'est-ce que tu en penses, toi ? Qu'est-ce que tu as entendu dire?»

Valorisé par cette écoute et mis en confiance, l'enfant pouvait soutenir son désir de comprendre, il osait interroger ce qu'il entend de la différence sexuelle. En classe, on lui avait répété qu'il n'était qu'un «bon à rien». Il avait redoublé sa classe, la maîtresse était découragée par sa passivité, et les tests de QI signifiaient qu'il était «débile léger».

Les résultats de nos entretiens ne se firent pas attendre : «Je sens que je deviens intelligent», me dit-il, souriant, après m'avoir demandé d'où venait le mot «parent».

«Je ne sais pas, mais je vais me renseigner, en consultant mes dictionnaires !» Il est important de ne pas «tout savoir» quand on travaille avec l'enfant venu pour «échec scolaire». Notre dernière séance, avant les vacances, se termina par ce «par-ens» latin, le «parent» étant celui que l'enfant traverse pour naître. «Oui, je crois que tu peux partir en vacances, tu as bien travaillé avec moi, cette année. Tu reviens mardi, après les vacances, si tu le veux !» À l'entrée, il n'avait plus envie de venir à ses séances, il était devenu un excellent élève, et son QI était passé à 115 : ainsi le quotient intellectuel peut changer, rien déplaît à ceux qui affirment qu'au-delà de cinq ou six ans il est définitivement fixé.

Comment mesurer l'intelligence des enfants ? Nous n'en sommes plus à l'époque d'Esquirol, psychiatre du XIX<sup>e</sup> siècle, qui classait les arriérations mentales, de l'idiotie («oligophrénie») jusqu'à la «faiblesse d'esprit». Ce psychiatre distinguait les degrés de gravité de l'imbécillité selon des «critères dysmorphiques» repérables aux traits du visage : les «stigmates de dégénérescence». L'insuffisance intellectuelle

**1. LA PHRÉNOLOGIE, où l'on évaluait les facultés cérébrales par les bosses du crâne, a été l'une des premières mesures de l'intelligence.**

se mesurait par l'état du langage, le déficit du jugement, l'incapacité de mémorisation, le manque de volonté. L'étude des déficiences mentales reflétait déjà des défauts pérennes : non pas que ces paramètres ne soient pas mesurables, mais aucun n'est justifié.

## L'école de Jules Ferry

Avec la création de notre école laïque et obligatoire, le concept de «débilité mentale» apparaît, et l'on cherche les causes organiques de ces «syndromes déficitaires» : atteintes lésionnelles du système nerveux, séquelles d'encéphalite, lésions cérébrales après un accouchement «dystocique», prématurité importante, ou bien maladies héréditaires liées à la transmission d'un potentiel génétique, trisomies, maladies métaboliques, les causes endogènes s'ajoutant aux causes exogènes.

Jules Ferry, au nom d'un idéal égalitaire qu'il voulait instaurer par l'école, souhaitait que le savoir soit accessible à tous. Il suffisait, pensait-il, de le prodiguer généreusement sur les bancs de l'école, et le contexte social changerait par une restructuration «au mérite républicain». Nous verrons plus loin dans quelle mesure cet idéal de justice fut atteint. Toutefois, dès ses débuts, l'école laïque obligatoire tenta de comprendre pourquoi il y avait des «bons» et des «mauvais» élèves, des génies et des «cancres». Elle s'intéressait d'ailleurs plus aux cancrs qu'aux génies.

La «cancrerie», apparue en 1885 pour désigner la «nullité» d'un élève, n'a pas été adoptée, même accompa-



gnée d'épithètes, telles qu'incurable, indécrottable, selon l'humeur des pédagogues. Alfred Binet, élève de Charcot, introduisit une mesure de la «débilité» : il voulait par là mesurer scientifiquement, par des tests, les déficiences intellectuelles. Avec Binet, nous entrons dans l'ère de la psychologie, et même de la psychométrie, pour évaluer l'efficacité intellectuelle.

Dans *L'année psychologique*, en 1904, Binet publia, avec Simon, un article intitulé *Sur la nécessité d'établir un diagnostic scientifique des états inférieurs de l'intelligence*. Il faut, selon ces auteurs, mesurer et chiffrer l'«âge mental», les performances et les insuffisances, au moyen d'échelles métriques d'intelligence : c'est le QI, «qui a fait et continue à faire tant de ravages, de par son utilisation abusive, le premier abus étant sa prétendue scientificité», écrit Anny Cordié, à qui j'emprunte cette page d'histoire (*Les cancre n'existent pas*, Le Seuil, 1993, p. 149).

Vingt ans après son instauration, «l'école laïque obligatoire» produit cette

horreur ségrégationniste qui substitue à l'étiquetage psychiatrique une classification en «bons» et «mauvais», dûment notés, objectivement et définitivement stigmatisés, au sein d'une «Éducation nationale» qui préside parfois au massacre des jeunes citoyens en ne jouant pas son rôle, qui devrait être : «Offrir un substitut à la famille et éveiller (ressusciter) l'intérêt pour la vie à l'extérieur, dans le monde», comme le précisait Freud, en 1910, dans une discussion sur le suicide. «Le lycée doit faire plus que de ne pas pousser les jeunes gens au suicide; il doit leur procurer le plaisir de vivre et leur offrir soutien et appui, à une époque de leur vie où ils sont obligés, par les conditions de leur développement, de desserrer leur rapport à la maison parentale et à la famille.» Et Freud ajoutait : «L'école a le droit de ne jamais oublier qu'elle doit s'occuper d'individus qui sont encore immatures, auxquels ne peut être contesté le droit à séjourner dans des stades sûrs, même non réjouissants, de leur développement.» Il concluait : «Elle a le droit

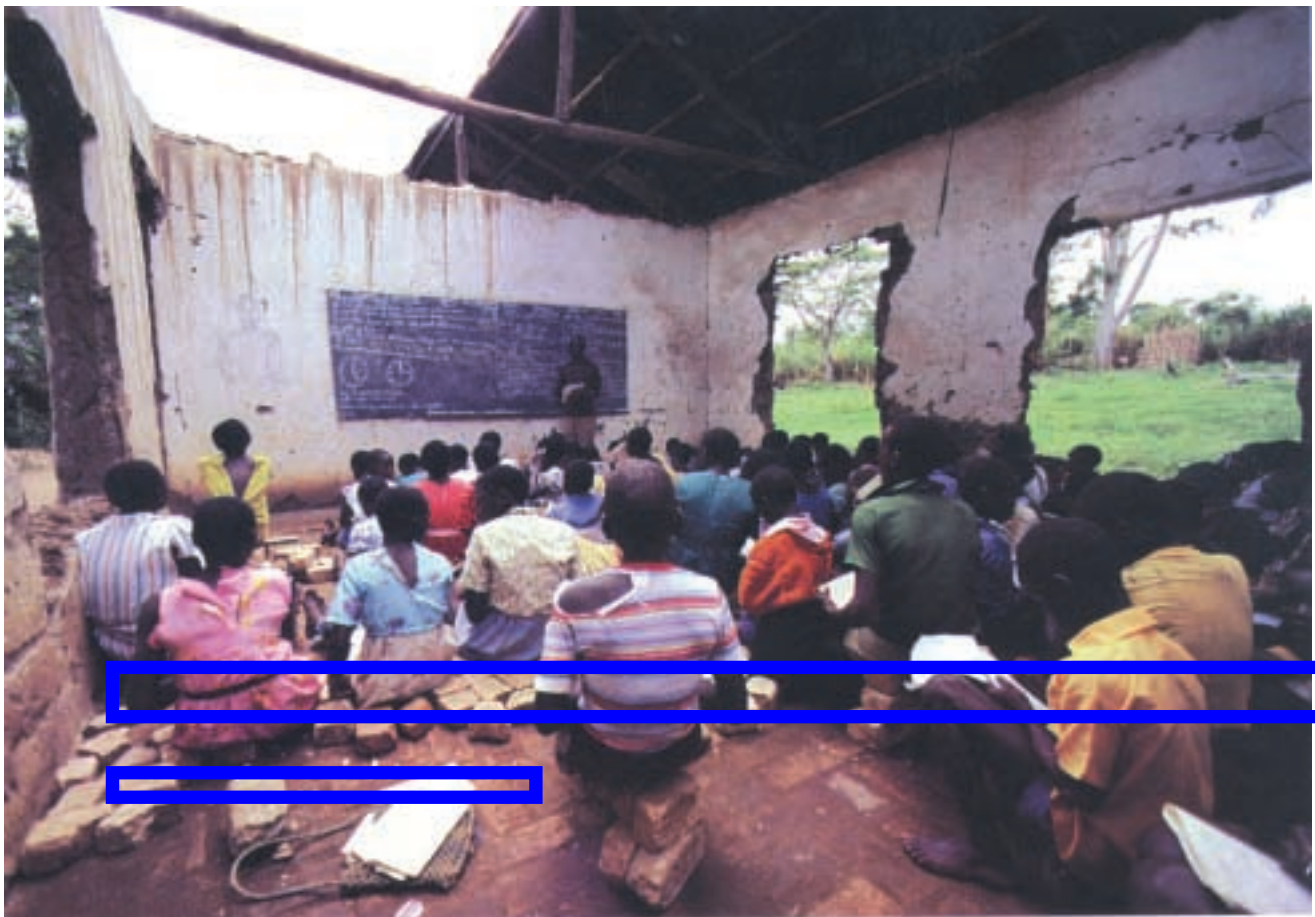
de ne pas s'occuper de l'inexorabilité de la vie, elle a le droit de ne pas vouloir être plus qu'un jeu de vie.» (Freud, *GW. VII*, p. 62-63).

### L'horreur d'une scolarité imposée

Après un accouchement hypermédicalisé, avec séparation brutale mère-enfant, sevrage trop rapide et mise en crèche trop précoce, vient le temps de la scolarité imposée, alors que l'enfant, traumatisé par ces séparations répétées et sans médiation sécurisante, ne peut que suer son pouce, regresser («s'escargotter», disait Françoise Dolto), pour tenter de retrouver sa «sécurité de base».

A deux ans, 30 enfants, terrorisés, introduits tous ensemble, le même jour, dans la classe, vous voyez ce qui peut se passer : «Ce dont on ne doit pas parler, si l'on espère quelque avancement!», me disait une enseignante.

Pour être «bon élève», il faut être obéissant, «sage comme une image» et répéter les paroles de la maîtresse. Le



Roberto Caputo Aurora

**2. LES ÉLÈVES DANS UNE ÉCOLE AFRICAINE** ont des conditions de vie si différentes de celles des élèves des pays occidentaux qu'on peut s'interroger sur la portée des tests d'intelligence, mal adaptés à leur culture et à leurs motivations.

«premier de la classe» sera celui qui répétera «la lettre» ce que ses maîtres lui ont appris. En gymnastique, même état d'esprit : il faut «batter» tous les autres, «éliminer» les concurrents.

«Ils tiennent des dieux le savoir qu'ils nous ont transmis», voilà, en lettres d'oprométhéennes, ce qui était inscrit dans un amphithéâtre universitaire. Le savoir est devenu roi, et le maître, «bon élève» devenu «bon enseignant», s'impose par sa «supériorité intellectuelle».

«Ôte-ti de là que je m'y mette», à cette place de premier ! Toute la politique pourrait se résumer par cette phrase, dans une civilisation où s'impose à l'enfant le devoir d'acquiescer du «savoir» pour «avoir plus tard une bonne situation». «Et quand on veut, on peut !», disent les pédagogues, il suffit de «vouloir». Une éducation honnête, responsable et republicaine ne devrait-elle pas enseigner aux enfants à unir leurs efforts pour réussir ensemble, les inciter à se mettre au service du «fruit de la rencontre», pour multiplier les énergies de chacun ? C'est cela, un groupe créatif, une famille humaine, ou une équipe de football efficace.

## Mesure-t-on l'intelligence ?

Armés d'une batterie de tests, les psychologues ne mesurent pas l'intelligence, puisque le QI n'est qu'une évaluation comparative, à un moment donné, des acquisitions et conduites adaptatives d'un enfant. Les tests concernent surtout les opérations scolaires : écriture, lecture, calcul, compréhension du langage, dans une culture précise, et à une époque déterminée. Mais n'y a-t-il que l'intelligence langagière ?

Les psychologues ont noté que le score moyen obtenu aux tests d'intelligence augmente régulièrement de trois points environ par décennie.

pour le raisonnement abstrait, de sept points par décennie. Augmentation de l'intelligence ou acquisition de l'aptitude à réussir les tests ?

Une meilleure alimentation pendant l'enfance assure la croissance de la taille et l'augmentation du volume de la tête, donc du poids du cerveau. Coïncidence ou rapport de cause à effet ? Si l'on veut trouver des causes à des différences, un facteur semble négliger : les modalités de vie prénatale, et postnatale. On sait que les enfants nourris au sein ont un développement intellectuel, affectif, moteur, plus satisfaisant ; mais curieusement, ce fait n'est pas souligné ni commenté. La richesse calorique, la teneur en calcium et en fer, l'apport vitaminique ne peuvent remplacer l'amour d'une mère, le rapprochement à son contact, «peau à peau», la multiplicité des stimulations affectivo-confirmantes, le fait d'être porté par des parents tendres, disponibles et sécurisants.

Une plus longue fréquentation scolaire, des changements dans l'éducation des enfants (on leur parle beaucoup plus tôt), l'apprentissage précoce des mathématiques, les programmes éducatifs audio-visuels, la mondialisation de nouveaux modes de pensée (la plus grande fréquence des sollicitations visuelles (affiches, jeux vidéo, ordinateurs, cinéma, télévision), tout cela nous permet de comprendre ce que l'on appelle l'«effet Flynn» (du nom de James Flynn, spécialiste de sciences politiques à l'Université d'Otago, en Nouvelle-Zélande) : les tests qui mesurent plus directement l'aptitude à l'analyse visuelle indiquent une progression des scores avec les années. Ce sont les tests les plus liés aux matières scolaires qui connaissent les plus faibles progressions.

Les tests qui mesurent l'aptitude à l'analyse visuelle ont un fort effet Flynn, mais les tests de connaissance,

qui ne mesurent pas cette aptitude visuelle, ne progressent que faiblement avec les années. James Flynn a montré que l'augmentation des scores en fonction des différents types de tests ne dépend pas de la durée de la fréquentation scolaire, donc de la familiarisation avec les matières scolaires. En revanche, les tests de vocabulaire, d'arithmétique, de culture générale progressent peu, ou sont en régression. Mais les tests saturés en facteur *g* (qui ont le plus de corrélation avec les autres tests et qui comprennent une part de raisonnement abstrait) indiquent une forte progression des scores au cours des ans.

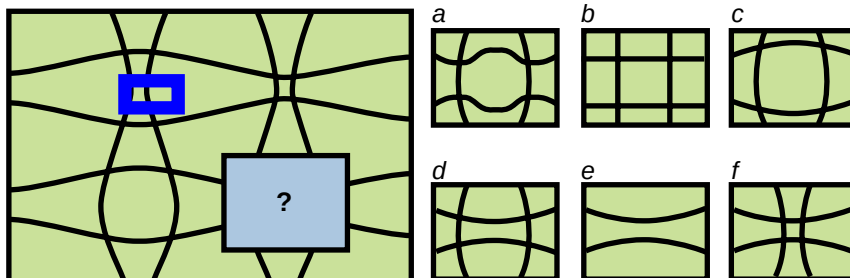
Cette hausse des scores est évidemment trop rapide pour correspondre à un changement génétique. Notre environnement influe beaucoup sur le facteur *g*, mais selon quelle modalité ? s'est interrogé Ulric Neisser, professeur de psychologie à l'Université Cornell.

Notre enfants sont-ils plus intelligents en 1998 que les petits-enfants géniaux ? En comparant les résultats acquis au test Stanford-Binet en 1932 et en 1998, on constate qu'un quart des individus atteignent les 30 points de la qualification «très supérieur», soit dix fois plus qu'en 1932. Inversement, si l'on juge les standards actuels en 1997, le QI moyen est de 100. Par quel miracle les Américains ont-ils autant progressé ? Serait-ce qu'ils étaient partis de très bas ?

Ces faits suggèrent, selon J. Flynn, que des dizaines de nations devraient à présent battre au cœur d'«une renaissance culturelle dont la portée nous dépasse», mais, comme cela ne semble pas être le cas, Flynn conclut que les tests ne mesurent pas l'intelligence, mais seulement l'un de ses aspects mineurs, «une capacité à résoudre des problèmes abstraits». De plus, l'intelligence du pisteur bochimán vivant dans le désert du Kalahari, qui doit suivre sa proie à la trace selon des indices inconnus du petit Parisien, serait mesurée, par son entourage, selon d'autres critères que le QI occidental. La débilité dépendrait-elle du milieu où l'on doit survivre ?

Les tests mesurent diverses formes d'intelligence, isolant surtout les capacités liées au succès scolaire, mais ils négligent certains aspects de l'activité cognitive : sens pratique, orientation et adresse dans l'espace, créativité, prudence, sociabilité, etc. Certains tests

### 3. MATRICES PROGRESSIVES DE RAVEN



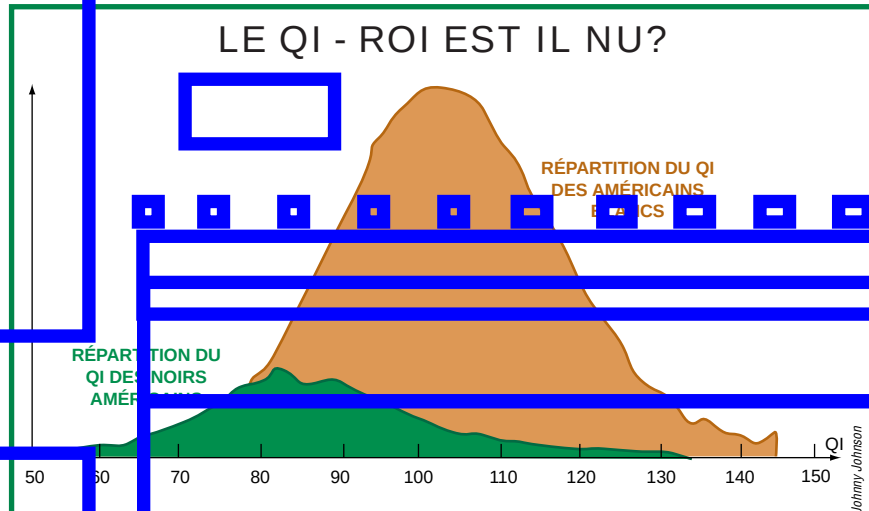
standardisés correspondent à des activités à support verbal, d'autres ont un support visuel, mais qu'en est-il de l'intelligence de la main, de sa finesse de perception et d'appréciation du poids des objets, de sa dextérité? La qualité de la voix «juste», de l'oreille plus ou moins «absolue» conditionne autant la réception que l'émission vocale, l'aptitude à émettre les sons entendus dans la petite enfance. Certains tests ne portent que sur la capacité au raisonnement abstrait, d'autres apprécient l'imagination dans l'espace, la richesse du vocabulaire, la maîtrise de la culture générale, l'aisance dans le calcul. Et l'on comprend qu'un enfant, né en France, mais qui n'entend pas parler le français à la maison, langague utilisée par le testeur, ait de médiocres résultats.

### De la mesure... après toutes choses

«La passation du test est un acte qui met à l'épreuve la subjectivité du testeur et celle du testé. Un ratage des tests peut être la conséquence d'un mauvais contact entre eux, maladresse de l'un, mauvaise humeur de l'autre par exemple» et Anny Cordié nous rappelle qu'elle a vu «une série d'enfants qualifiés de débiles, avec des QI on ne peut plus catastrophiques. Ces enfants me paraissaient aussi malins que d'autres. Enquête faite, ils avaient été testés par une jeune institutrice, [...] en série, en vue d'une orientation, cela sans préparation [...] J'ai pensé qu'ils avaient considéré cette épreuve, faite en classe, comme un devoir supplémentaire et avaient répondu n'importe quoi».

Faut-il se méfier des tests, de ceux qui les utilisent, de l'usage que l'on en fait? Pourquoi veut-on que le résultat du QI soit constant, invariable dans le temps, puisque ses résultats s'améliorent quand l'enfant est en psychothérapie, quand il trouve de meilleures conditions de vie, un pédagogue plus chaleureux, moins angoissé, plus valorisant?

Des enfants, lors d'un changement de classe, ont vu s'améliorer leurs résultats aux tests et leur niveau de QI. Désignés comme plus intelligents que les autres, ont-ils bénéficié d'un intérêt plus soutenu de la part des enseignants? Cette valorisation inattendue a-t-elle regonflé leur narcissisme, leur confiance en leurs possibilités, les



En 1994, la parution de *The Bell Curve. Intelligence and Class Structure in American Life* fait sensation : plus de 400 000 exemplaires sont vendus en quelques mois. Les auteurs, Richard Herrnstein et Charles Murray prétendent démontrer scientifiquement qu'il existe une base génétique aux différences d'intelligence entre les groupes sociaux et les ethnies.

Selon les auteurs, les tests de QI montrent l'infériorité des noirs américains. Si le fait est patent, en ce qui concerne les tests, son interprétation l'est moins : pour rendre compte de la disparité, les auteurs comparent les Afro-Américains aux Africains. Si les résultats inférieurs des Afro-Américains sont dus à la discrimination raciale aux États-Unis, raisonnent nos sociologues, alors les Africains devraient avoir un score supérieur. Tel n'est pas le cas, les Africains obtiennent une moyenne de 75, de 10 points inférieurs : donc seule la génétique explique la différence noirs-blancs, prétendent les auteurs de *The Bell Curve*!

À cela on peut légitimement objecter que les différences culturelles s'expriment par une plus ou moins grande motivation pour le QI et que cela se traduit par des scores différents. Que la discrimination raciale a perduré en Afrique sous le joug colonial et que les Africains l'ont subie autant que les noirs américains. Que l'échantillonnage des populations testées était peut-être biaisé. Et enfin que les conclusions de l'étude sont constamment faussées par la volonté de traduire une corrélation en causalité.

Est-il si étonnant que les bons résultats à des tests de QI soient associés à un statut social supérieur? Quelle est la cause, si cause il y a, et quel est l'effet? De plus, quelle est la part du milieu dans la réussite sociale et la part génétique? La belle découverte que de montrer que les enfants des parents «nantis» ont plus de chances de faire une bonne scolarité que les enfants des milieux défavorisés! Ne peut-on penser que les enfants des riches sont plus sollicités intellectuellement à travers des livres et des moyens de connaissance plus riches dans leur activité intellectuelle, que les enfants des pauvres? Faut-il être convaincu que les gènes ont été distribués une fois pour toutes et que la structuration sociale ne reflète que la variable génétique?

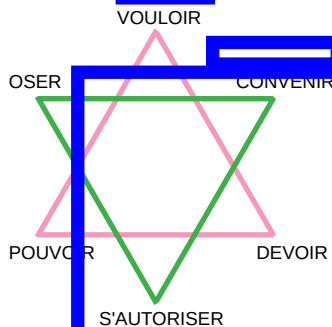
Les personnes au QI bas sont fréquemment des révoltés sociaux. Pourquoi s'interrogent nos auteurs de la courbe de Bell. Parce qu'ils ne sont pas assez intelligents pour prévoir le résultat de leur action, répondent-ils, ou bien parce qu'ils ne comprennent pas que le vol est antisocial, ou bien parce qu'ils ne connaissent pas les lois... D'autres hypothèses semblent plus plausibles et plus charitables.

Le livre n'a pas de valeur scientifique. L'ouvrage n'est qu'une manière polie de traiter les noirs de sales nègres. Après examen des arguments, le roi est nu. Peu importerait, s'il n'existait le danger d'agir, socialement et politiquement, en fonction d'un déterminisme biologique primaire.

Leon Kamin, professeur de psychologie à l'Université Northeastern.  
(Extrait de *Scientific American*, février. 1995, «Behind the Curve».)

encourageant à oser s'exprimer, à s'autoriser, à se permettre de travailler comme il convient pour réussir?

Frans Veldman oppose deux triangles vert et rouge pour comment l'effectivité objective s'oppose à l'affectivité subjective, le règne du «Tu dois», où le maître impose, et le royaume du «Tu peux te permettre, je t'y invite». Tout enfant, comme tout adulte, aime être invité, mais déteste être commandé.



Revenons à la situation scolaire ; on voit l'importance de l'évolution qui est en train de se produire : quand tous les enseignants auront développé leur présence et leur «sécurité de base», ils pourront inviter leurs élèves à s'instruire. La constance du QI avec l'âge sera reconnue comme une idée erronée, qui avait la vie dure parce qu'elle permettait de classer en bons et mauvais, pour dominer politiquement. L'inégalité des citoyens, qui se fondait sur la différence des classes sociales, n'est-elle pas en train de réapparaître sous la forme de l'inégalité des capacités intellectuelles? «La croyance à une intelligence mesurable, stable, innée, engendre vite l'idée d'individus génétiquement supérieurs à d'autres, ou inférieurs aux autres. Les uns commandent, les autres obéissent. Il y aurait donc des «classes» supérieures et inférieures? On sait à quelles aberrations cela nous a menés ; il n'empêche, le phénix renaît de ses cendres : la hiérarchie sociale est toujours justifiée par des mesures quantitatives.

## L'intelligence génétique?

L'intelligence serait-elle héréditaire? Certains tests sur les jumeaux semblent montrer qu'une partie de leur caractéristique serait semblable, donc héréditaire et indépendante de leur environnement. Mais il est aussi patent

que le père du grand mathématicien Gauss n'avait pas transmis ses inaptitudes à son fils. Et que s'il existe des lignées de mathématiciens (Bernoulli) et de musiciens (Bach), les caractéristiques des génies ne sont pas transmissibles telles quelles : Einstein n'a parlé que très tard et il ne s'est adapté que difficilement à l'école!

Cela justifie-t-il que certaines femmes demandent une insémination artificielle avec le sperme d'un donneur-prix Nobel? Des chercheurs européens ont identifié un nouveau gène impliqué dans une forme d'oligophrénie familiale, c'est-à-dire de retard mental héréditaire : une protéine synthétisée par ce gène, baptisée «oligophréline», semble jouer un rôle dans la régulation des mécanismes concernant le développement des axones et la migration des cellules neuronales. Mais cette découverte ne permet pas d'affirmer que les fonctions cognitives sont, elles aussi, transmises sur un mode héréditaire.

Axel Kahn pense très clairement que si l'altération d'un gène entraîne un retard mental, un désordre particulier du comportement, on ne peut en inférer que l'intelligence et le comportement considéré sont liés à ce gène. Simplement l'activité de ce dernier est nécessaire à ces fonctions complexes. La section d'une «durite» aboutit à l'immobilisation de la voiture, qu'il s'agisse d'une vieille 2CV ou d'une voiture ultra-performante. Mais personne ne peut affirmer que cette «durite» est la pièce qui explique les performances de ces véhicules : elle est simplement indispensable à leur fonctionnement. Axel Kahn a raison d'interdire l'insertion de l'idéologie en biologie «pour enfermer l'homme dans une rêverie où les gènes seraient les mots qui décrivent notre destin de prisonnier, et les barreaux d'une prison»!

Rien ne justifie l'idée d'une continuité entre les arriérations mentales organiques et la débilité légère rencontrées dans l'échec scolaire. On ne trouvera jamais, je pense, le gène de l'intelligence à l'état isolé, l'inné et l'acquis ne pouvant être totalement dissociés. Si le capital génétique réside bien dans les chromosomes, l'enfant *in utero* intègre une multitude de facteurs d'environnement : stress maternels ou paternels, alcoolisme, intoxications diverses, mauvaises conditions de

maternage pendant les premiers mois de la vie, qui peuvent laisser des séquelles peu réversibles, faisant croire à une arriération endogène.

«Il existe[...] un certain consensus pour faire de l'établissement des innombrables connexions des cellules cérébrales[...] la base du fonctionnement cérébral, et notamment des formations supérieures que sont les opérations mentales. La découverte de gènes de retards mentaux dit peu de choses sur d'éventuels déterminants génétiques des capacités cognitives. Si ceux-ci existent, ils sont manifestement multifactoriels, impliquant peut-être la combinaison d'un très grand nombre de gènes, agissant de toute façon en interaction étroite et constante avec le milieu socio-éducatif et culturel, et soumis au chaos de la vie!», poursuit Axel Kahn. La biologie génétique identifie la structure de l'instrument, mais la musique dépend de l'interprète.

Ce concept d'intelligence mesurable ne peut que nous interroger. À quoi sert-il? Qui s'en sert et dans quel but? Pour quelle réassurance narcissique, au service du maintien de quelle organisation sociale et politique? Que se passerait-il si tous les enfants étaient accueillis effectivement avant leur naissance... et, après, bien entendu, s'ils fréquentaient, avec leurs parents, des lieux de vie, d'accueil et de socialisation précocement sécurisants. À ce point de vue, l'école de Jules Ferry a échoué, et certaines pédagogies seraient préférables. Chaque enfant a besoin d'un accompagnement affectivo-confirmant pour se développer selon ses propres dispositions, selon son rythme.

Bernard THUIS est cofondateur, avec Françoise Folto, de *La Maison verte*, qui accueille les jeunes enfants et leurs parents.

Bernard THUIS, *Neuf mois dans la vie d'un homme*, Interéditions, 1996.

Bernard THUIS, *Le père, acte de naissance*, Seuil, 1980.

J.R. FLYNN, *Massive IQ gains...*, in *Psychological Bulletin*, 101, 271, 1987.

Ulric NEISSER, *Rising Scores on Intelligence Tests*, in *American Scientist*, septembre-octobre 1997.

Frans VELDMAN, *Haptonomie, science de l'affectivité : redécouvrir l'humain*, PUF, 1998.



# Génétique et intelligence

ROBERT PLOMIN • JOHN DEFRIES

*En analysant les disparités cognitives par des tests quantitatifs, les généticiens et les psychologues cherchent comment les gènes déterminent les aspects variés de l'intelligence.*

Les diverses manifestations de ce que l'on nomme couramment intelligence varient selon les individus. Les différences entre individus, pour une même tâche, apparaissent en milieu scolaire, mais aussi dans les circonstances les plus variées de la vie quotidienne : dans l'utilisation du langage, dans la lecture d'une carte routière ou dans la mémorisation des numéros de téléphone. Ces disparités cognitives sont si évidentes qu'on oublie de s'interroger sur leur origine : pourquoi les individus sont-ils intellectuellement si différents ?

L'environnement semble souvent être à l'origine de ces écarts : nous serions ce que nous apprenons. Par exemple, puisque nous apprenons à parler après la naissance, certains ont soutenu que l'apprentissage serait responsable des différences de vocabulaire entre les individus. À son tour, l'apprentissage varierait selon l'environnement : il dépendrait des encouragements et des modèles parentaux, de la qualité de l'enseignement de la langue dispensé à l'école, etc.

Au début du siècle, les psychologues pensaient ainsi que l'environnement expliquait toutes les disparités cognitives. Aujourd'hui, ils ont une position plus nuancée : ils reconnaissent des interactions possibles entre l'inné et l'acquis dans le développement cognitif. Au cours des dernières décennies, des études génétiques ont précisé le rôle important de l'hérédité, sans diminuer l'influence des facteurs environnementaux, dans le façonnement des composantes de l'intellect. Les deux aspects sont intimement liés : des différences génétiques détermineraient la facilité avec laquelle les individus apprennent. Des neurobiologistes traquent donc les gènes qui participeraient aux fonctions cognitives.

Quels sont les rôles respectifs des gènes et de l'environnement sur des capacités cognitives telles que la maîtrise du langage ? Pour répondre à cette question, nous avons utilisé la génétique quantitative, une démarche statistique qui explore l'origine des variations entre les caractères individuels. Les données que nous avons utilisées sont les résultats aux tests cognitifs qui avaient été proposés pendant des décennies à des jumeaux ou à des enfants adoptés. Les analyses ont révélé les contributions relatives de l'inné et de l'acquis dans l'apprentissage. Nous avons ainsi exploré les relations entre, d'une part, des facettes de l'intelligence, telle le raisonnement verbal ou spatial et, d'autre part, les fonctions cognitives normales et les dysfonctionnements, telle la dyslexie. La génétique moléculaire, qui identifie les gènes associés aux diverses capacités, révèlera probablement, dans les prochaines années, les mécanismes biochimiques à la base de l'intelligence humaine. Les neurobiologistes espèrent que ces études génétiques permettront, à terme, de diminuer ou de prévenir les conséquences des troubles cognitifs.

## Les capacités verbales et spatiales

L'idée d'une contribution génétique à l'intelligence inquiète parfois. Aussi doit-on d'abord examiner ce que serait exactement une influence génétique. Quand les généticiens parlent d'« hérédité », ils pensent à une mesure statistique de l'influence des gènes sur les différences cognitives entre les individus.

Les statisticiens utilisent la variance pour mesurer les différences entre les individus d'une population. L'hérédité correspond à la proportion de cette variance attribuable aux gènes.

Par exemple, quand un caractère est héréditaire à 50 pour cent, la moitié de la variance pour ce caractère est associée à l'hérédité. Ainsi l'hérédité décrit uniquement des différences entre les personnes ; elle ne dit rien de l'intelligence d'un individu donné. Toutefois, une hérédité élevée d'un caractère marque une forte influence des gènes sur ce caractère.

Les premières mesures d'hérédité, pour les capacités cognitives spécifiques, ont été effectuées dans les années 1940. La plus importante étude a été effectuée à Hawaï par des chercheurs des Universités de Hawaï et de Boulder, qui ont suivi plus de 1 000 familles, avec une attention particulière aux paires de frères et sœurs. Ces études ont révélé les corrélations (une mesure statistique de la ressemblance, comprise entre zéro et un) entre les membres d'une même famille, pour les tests d'aptitude verbale et spatiale.

Une corrélation nulle aurait indiqué que les résultats n'auraient pas été plus semblables que ceux de deux personnes sans lien de parenté. Au contraire, la corrélation aurait été égale à un si tous les membres des familles étudiées avaient eu les mêmes résultats. Toutefois, puisque les enfants ont en moyenne la moitié de leurs gènes en commun avec chacun de leurs parents et avec leurs frères et sœurs, la corrélation maximale entre leurs résultats aurait été seulement égale à 0,5 si l'aptitude aux tests avait été strictement déterminée par les gènes.

Les résultats ont montré que les capacités cognitives des membres d'une même famille sont plus corrélées que celles d'individus sans lien de parenté. Quelles sont les parts respectives des gènes et de l'environnement ? Les généticiens ont essayé de répondre à cette question en étudiant

des jumeaux et des enfants adoptés.

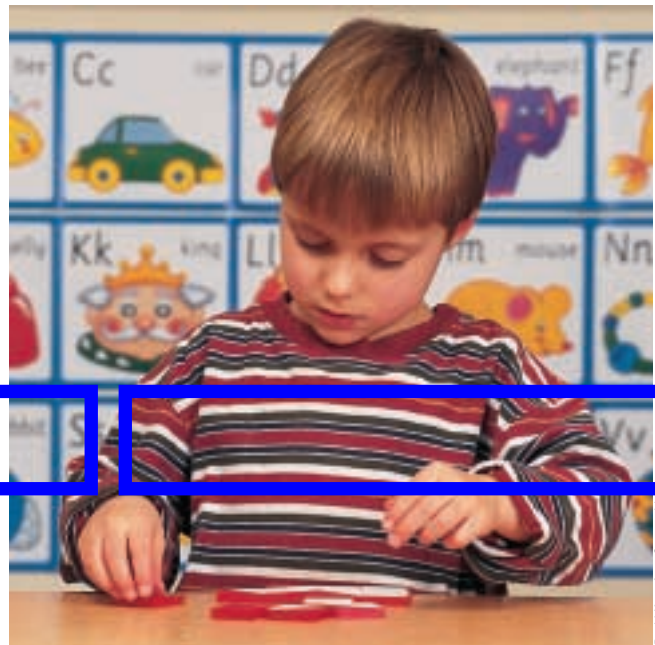
Très appréciées des généticiens du comportement, les études de jumeaux comparent les résultats aux tests cognitifs de vrais jumeaux (qui ont les mêmes gènes) à ceux de faux jumeaux (qui n'ont en commun que la moitié de leurs gènes environ). Si les gènes déterminent les capacités cognitives, les performances des vrais jumeaux devraient être plus semblables que celles des faux jumeaux. Les généticiens calculent l'héritabilité dans la population générale en doublant la dif-

férence des corrélations entre vrais et faux jumeaux.

L'adoption, d'autre part, regroupe dans un même environnement des individus qui ne sont pas génétiquement apparentés ou bien, à l'inverse, elle disperse dans des environnements familiaux différents des paires d'individus apparentés. Les corrélations entre ces paires indiquent les parts respectives de l'inné et de l'acquis dans la ressemblance familiale.

Les résultats des performances cognitives mesurées au cours des 30

dernières années de jumeaux étudiés dans quatre pays différents sont remarquablement concordants (voir la figure 3). De l'enfance à l'âge adulte, les corrélations entre vrais jumeaux sont bien supérieures à celles des faux jumeaux, pour les tests de capacité verbale et spatiale. En 1997, les équipes de Gerald McClearn, aux États-Unis, et de Stig Berg, en Suède, ont découvert que les ressemblances entre les vrais et les faux jumeaux persistent au cours du vieillissement. Contrairement à ce que supposaient les gérontologues, les



**1. LES JUMEAUX** sont fréquemment étudiés par les psychologues qui explorent les aptitudes cognitives. Des vrais jumeaux (*en haut*) et des faux (*en bas*) participent ici à un test d'aptitude spatiale : ils tentent de reconstruire un modèle à l'aide de pièces de puzzle. Dans ces

tests, les performances des vrais jumeaux (qui ont exactement les mêmes gènes) sont plus semblables que celles des faux (qui partagent environ la moitié de leurs gènes). Cette ressemblance indique une influence du patrimoine génétique sur les aptitudes spatiales.

différences génétiques ne s'amenuisent ni avec l'âge ni avec l'expérience. De surcroît, ces études indiquent que, dans la population générale, la génétique est responsable d'environ 60 pour cent de la variance pour les capacités verbales et d'environ 50 pour cent de la variance pour les capacités spatiales.

Les équipes de Thomas Bouchard, aux États-Unis, et de Nancy Pedersen, en Suède, ont montré que, chez les jumeaux séparés par l'adoption, l'héritabilité est aussi d'environ 50 pour cent pour les aptitudes verbales et spatiales.

Les études des jumeaux adoptés caractérisent remarquablement bien, d'une part, le rôle des gènes et de l'environnement dans le développement des aptitudes cognitives et, d'autre part, les liens possibles entre les diverses capacités cognitives. Depuis 1975, nous comparons les corrélations calculées entre plus de 200 enfants adoptés et leurs parents biologiques ou adoptifs, d'une part, et les corrélations pour un groupe de contrôle, composé d'enfants élevés par leurs parents biologiques, d'autre part (voir la figure 4).

Les conclusions sont surprenantes. Par exemple, pour les aptitudes verbales et spatiales, les corrélations entre les femmes et les enfants qu'elles ont abandonnés sont identiques à celles que l'on mesure chez les enfants élevés normalement. En revanche, les performances des enfants adoptés diffèrent de celles

de leurs parents adoptifs. Corroborée par un nombre grandissant de données, cette étude indique que les similarités entre les membres d'une famille ont essentiellement des bases génétiques, tandis que les disparités sont dues à l'environnement.

Notre étude révèle aussi l'augmentation de l'influence de la génétique au cours de l'enfance : vers l'âge de 16 ans, l'héritabilité devient égale à celle que l'on mesure chez l'adulte. Aux tests d'aptitude verbale et spatiale, la corrélation entre les parents biologiques et leurs enfants adoptés par d'autres avoisine 0,1 à l'âge de 3 ans ; elle triple à l'âge de 16 ans. Certaines transformations des fonctions cognitives sous contrôle génétique se déroulent au début de la scolarité, vers l'âge de 7 ans. À l'âge de 16 ans, les facteurs génétiques rendent compte de 50 pour cent de la variance pour l'aptitude verbale, et de 40 pour cent pour l'aptitude spatiale. Ces valeurs correspondent à celles qu'ont données des études des aptitudes cognitives spécifiques chez les jumeaux.

## De l'aptitude à la réussite

Aujourd'hui, les neurosciences cognitives supposent que les divers processus cognitifs sont assurés par des «modules» spécialisés. Selon ce «modèle modulaire», les diverses aptitudes cognitives devraient également avoir des causes génétiques indépen-

dantes. Par exemple, les gènes déterminant des aptitudes verbales ne devraient pas intervenir de manière importante dans les aptitudes spatiales.

Cependant, les psychologues ont trouvé une corrélation modérée entre certaines capacités cognitives, telles les aptitudes verbale et spatiale. De bonnes performances à des tests d'un type sont assorties de bons scores aux tests d'autres types.

Ainsi, les études génétiques des aptitudes cognitives ne confirment pas le modèle modulaire et montrent qu'au contraire les gènes sont responsables de la plupart des associations entre habiletés cognitives. Notre étude et celle de jumeaux à différents âges indiquent que la génétique détermine 70 pour cent de la corrélation entre aptitude verbale et spatiale. Des gènes qui déterminent une aptitude cognitive particulière seront probablement associés à d'autres aptitudes cognitives.

Les recherches indiquent, de surcroît, que la réussite scolaire semble dépendre de ces gènes. Dans les années 1970, les psychologues américains John Loehlin et Robert Nichols ont fait passer des tests, dans les quatre domaines de sélection pour une bourse anglaise, mathématiques, sciences sociales et sciences naturelles, à plus de 2 000 paires de jumeaux scolarisés dans l'enseignement secondaire. Ils ont alors montré que les performances des vrais jumeaux étaient régulièrement (et de manière importante) plus similaires que

## Aptitudes cognitives et intelligence générale

Depuis la naissance de la psychologie, la nature fondamentale de l'intelligence est controversée. Certains affirment que l'intelligence est une faculté intrinsèque, héréditaire ; d'autres insistent sur les effets de l'éducation. Pour certains, l'intelligence est une qualité globale, qui recouvre toutes les facettes de la cognition ; d'autres pensent que l'intelligence résulte d'aptitudes distinctes, spécialisées – telles que le talent artistique ou le sens des mathématiques –, sans aucun principe en commun.

Les études génétiques des dernières décennies ont convaincu la plupart des psychologues que l'hérédité exerce une influence considérable sur l'intelligence : jusqu'à la moitié des variations de l'intelligence entre individus semble due à des facteurs génétiques.

La plupart des psychologues acceptent aujourd'hui une définition globale de l'intelligence : l'aptitude cognitive générale, ou «g». Des capacités cognitives spécifiques dépendantes les unes des autres confirment cette idée de qualité globale. R. Plomin et J. DeFries ont remarqué que les personnes qui obtiennent de bonnes performances à certains tests cognitifs réussissent également bien d'autres tests cognitifs. Cette correspondance a confirmé le bien-fondé des tests

de QI (quotient intellectuel), qui décrivent par un seul nombre tout un ensemble de capacités cognitives.

Les résultats obtenus pour des aptitudes spécifiques confirment ce que l'on sait déjà de l'aptitude générale. Les héritabilités trouvées dans les études d'aptitudes cognitives spécifiques sont comparables à l'héritabilité rapportée pour g. L'influence génétique sur des aptitudes cognitives spécifiques augmente au cours de l'enfance et se stabilise vers l'âge de 16 ans. Les psychologues qui analysent l'aptitude cognitive générale observent la même évolution.

Les corrélations entre aptitudes verbales et spatiales sont utilisées dans les mesures de g : les gènes associés à l'une de ces deux aptitudes semblent également associés à l'aptitude cognitive générale. La relation inverse s'observe aussi. R. Plomin et ses collègues ont récemment rapporté la découverte du premier gène associé à l'aptitude cognitive générale. Cette découverte, qui améliore notre compréhension de la nature de la cognition, réactivera aussi certainement le débat. En effet, la recherche sur l'intelligence est un domaine où l'avancée des connaissances résout rarement les désaccords.

celles des faux jumeaux ; les facteurs génétiques sont responsables d'environ 40 pour cent de la variation dans la réussite à ce type de tests.

Ces études ont démontré une influence génétique sur les résultats scolaires. Ces résultats surprenants contredisent l'idée répandue que la réussite dépend plus des efforts fournis que des aptitudes et montrent des effets de la génétique pour plusieurs types d'indicateurs de réussite.

Ces données soutiennent une conception de l'intelligence comme qualité globale de l'esprit, non modulaire, et soulignent l'importance des aptitudes cognitives pour des performances dans la réalité. Elles indiquent aussi que les gènes responsables des aptitudes cognitives sont probablement les mêmes que ceux qui sont impliqués dans la réussite scolaire.

À l'inverse, les déficiences cognitives et l'échec scolaire ont-ils également des causes génétiques ? Les biologistes pensent que les gènes responsables des troubles cognitifs sont différents de ceux qui influencent les fonctions cognitives normales. Ainsi l'amaurose mentale légère est-elle en grande partie héréditaire, mais les cas plus graves sont dans une large proportion déterminés par des facteurs environnementaux (des complications périnatales ou des atteintes cérébrales) qui n'interviennent pas dans le développement de l'intelligence naturelle.

## La génétique et la déficience

Cependant, les relations génétiques entre le normal et l'anormal restent à préciser. De nombreux psychologues ont exploré ce problème en étudiant les troubles de la lecture, ou dyslexie, dont souffrent 80 pour cent des enfants qui présentent des troubles de l'apprentissage. Les enfants dyslexiques lisent lentement, comprennent mal et ont des difficultés à lire à haute voix (voir *La dyslexie*, par Sally Shaywitz, *Pour la Science*, janvier 1997). L'un d'entre nous (J. DeFries) a montré que la dyslexie est héréditaire. La probabilité que le vrai jumeau d'une personne dyslexique soit également dyslexique est de 68 pour cent ; elle n'est que de 38 pour cent pour un faux jumeau.

Les gènes sont responsables des variations normales des aptitudes à la lecture. Une nouvelle technique génétique, mise au point au cours des dix dernières années, quantifie les troubles : Pour répondre à cette question, on collecte des informations quantitatives sur les proches des sujets déficients. Cette méthode est appelée

## Tests d'aptitude verbale

1. VOCABULAIRE : dans chaque liste, entourez le synonyme du mot souligné. Il n'y a qu'une réponse correcte pour chaque ligne.

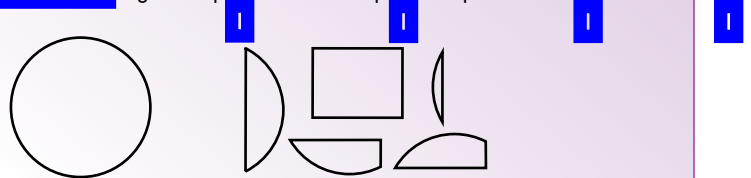
- a) aride, grossier, malin, modeste, sec.  
b) piquant, fruité, relève, vanilleux, aigre.

2. RICHESSE VERBALE : en trois minutes, faites le maximum de mots commençant par F.

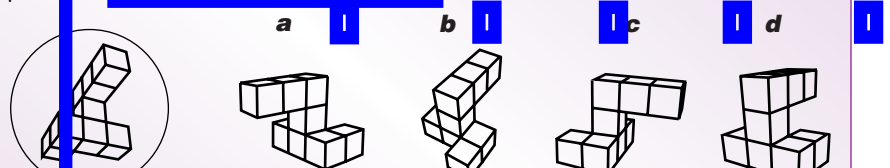
3. CATÉGORIES : en trois minutes, faites la liste de tous les objets PLATS auxquels vous pouvez penser.

## Tests d'aptitude spatiale

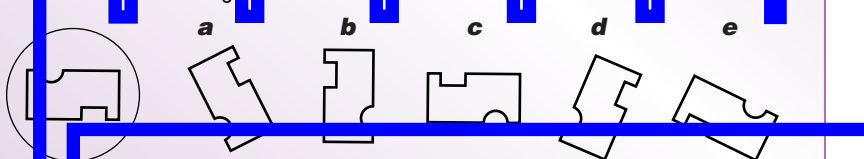
1. DÉCOUPE IMAGINAIRE : tracez une ou plusieurs lignes montrant comment on peut découper la figure de gauche pour obtenir les pièces représentées à droite.



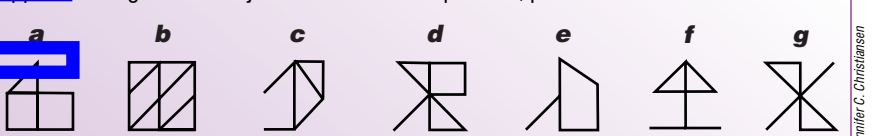
2. ROTATIONS MENTALES : identifiez les deux objets qui sont identiques à celui qui est entouré.



3. ROTATIONS DE CARTES : entourez les figures de droite qui correspondent après rotation à celle de gauche.



4. CONFIGURATIONS CACHÉES : entourez chacun des schémas ci-dessous où la figure 1 apparaît. La figure 1 est la figure ci-dessus.



2. DES TESTS D'APTITUDES SPÉCIFIQUES (ci-dessus) sont effectués par des adolescents et des adultes. Chaque aptitude cognitive est évaluée de plusieurs manières, et des combinaisons de tests évaluent avec fiabilité chaque capacité (les réponses sont données à la page 126).

## L'héritabilité

On interprète souvent mal les données sur l'héritabilité. L'héritabilité est une mesure statistique, exprimée sous la forme d'un pourcentage, qui décrit comment des facteurs génétiques contribuent à la variation d'un caractère entre les individus.

Cependant, une influence génétique sur un caractère ne signifie pas que « la biologie détermine complètement l'individu ». En effet, la recherche en génétique montre que les facteurs environnementaux ont la même importance que les gènes. Si l'intelligence est héritable à 50 pour cent, les facteurs environnementaux sont tout aussi importants que les gènes dans les différences entre les individus.

En outre, lorsque les gènes sont particulièrement importants, comme dans le cas de certains handicaps mentaux, le milieu peut compenser leurs effets. Par exemple, les effets des astéteurs de la phénylalanine (une maladie génétique) peuvent être combattus par l'alimentation.

Ainsi, l'héritabilité d'un caractère n'est pas immuable : l'influence relative des gènes et de l'environnement peut changer.

analyse des extrêmes de DF. Dans le cas de la dyslexie, on a mesuré les performances de lecture de vrais et de faux jumeaux de sujets atteints (voir la figure 5). Si les gènes qui déterminent les variations normales des performances de lecture influencent aussi la dyslexie, les scores des vrais jumeaux des enfants dyslexiques doivent être plus proches des scores des enfants atteints que les scores des faux jumeaux. En effet, deux enfants issus des mêmes parents peuvent hériter de versions légèrement différentes d'un même gène ; les effets de ces gènes se sont alors différents. Les gènes qui codent la couleur des yeux et la taille ont des exemples de gènes variables de ce type.

Or, on observe que les vrais jumeaux de sujets dyslexiques obtiennent des performances presque aussi mauvaises que les sujets dyslexiques sur ces tests quantitatifs. Les performances des faux jumeaux sont bien meilleures, mais elles restent plus mauvaises que celles du reste de la population. Par conséquent, les gènes impliqués dans la dyslexie semblent identiques à ceux qui contribuent

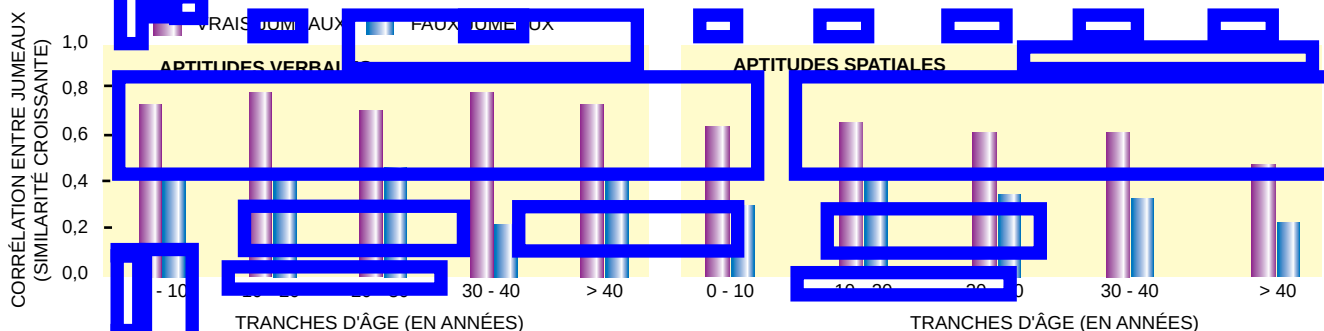
aux caractères quantitatifs des aptitudes de lecture mesurées dans cette étude. Les analyses des extrêmes de DF indiquent que la moitié des différences observées dans les scores de lecture entre les dyslexiques et la moyenne de la population ont des causes génétiques.

Cette explication n'est pas valable pour toutes les autres déficiences. Apparemment la dyslexie ne représente pas un trouble distinct, mais se trouve à l'extrême d'un continuum d'aptitudes à la lecture : elle serait la forme minimale de cette aptitude (voir la figure 6). Si on trouve un jour un gène d'aptitude à la lecture, il sera probablement associé aux variations normales de l'aptitude à la lecture.

## La chasse aux gènes

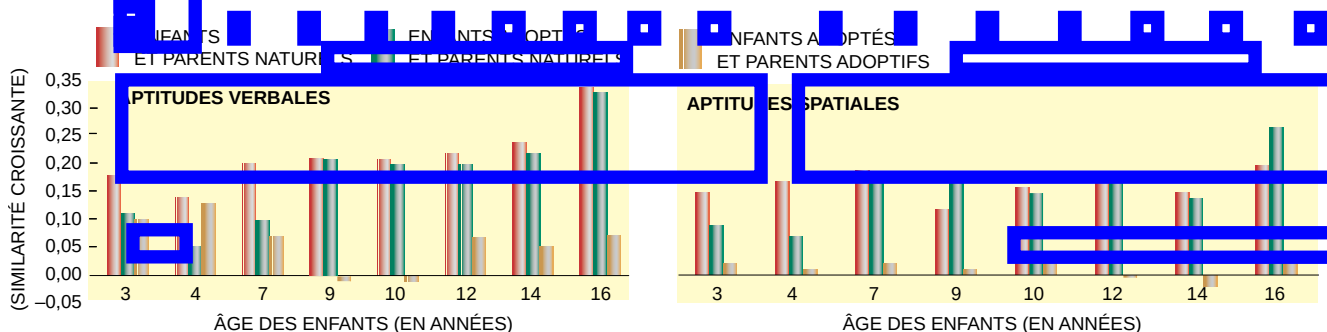
La génétique moléculaire est aujourd'hui utilisée pour l'exploration des gènes qui déterminent le comportement, ainsi que pour la recherche des protéines codées par ces gènes.

Des gènes responsables de capacités d'apprentissage ou de perception spatiale ont été identifiés chez la sou-



3. ON RECHERCHE dans les paires de vrais et de faux jumeaux les corrélations entre les habiletés verbales (à gauche) et spatiales (à droite). Les résultats de différentes études démontrent une influence génétique importante sur des aptitudes cognitives

spécifiques à tous les âges. Les performances des vrais jumeaux restent plus constantes dans la durée que celles des faux jumeaux. Ces données montrent que l'influence des gènes ne diminue pas avec le temps.

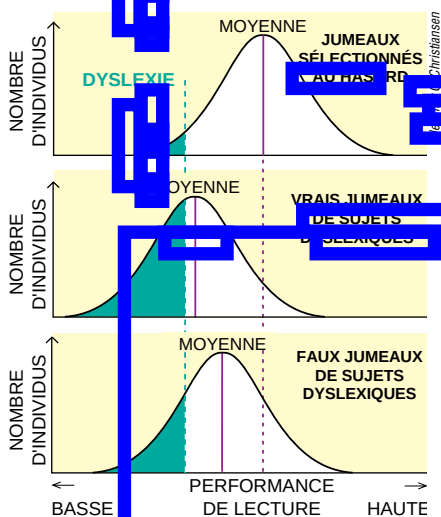


4. DES ENFANTS ADOPTÉS ont été suivis de l'âge de trois ans à l'âge de 16 ans. Les corrélations des aptitudes verbales (à gauche) et spatiales (à droite) entre les enfants et leurs parents biologiques se ressemblent de plus en plus au fil des années, que les enfants soient adoptés

(barres vertes) ou non (barres rouges). Au contraire, les enfants adoptés diffèrent de leurs parents adoptifs (barres marron). Ainsi la majeure partie des ressemblances familiales pour les habiletés cognitives semble liée à des facteurs génétiques, et non à l'environnement.

ris et chez la drosophile (la mouche du vinaigre). L'analyse des variations présentes naturellement dans les populations humaines a mis en évidence des mutations de gènes isolés qui provoquent un retard mental global : les gènes de la phénylcétonurie et du syndrome de l'X fragile provoquent tous deux des retards mentaux. De plus, les anomalies génétiques responsables de la myopathie de Duchenne, du syndrome de Lesch-Nyhan, de la neurofibromatose de type 1 et du syndrome de Williams sont probablement la cause des déficiences cognitives associées à ces pathologies (voir *Le syndrome de Williams*, par Howard Lenhoff, Paul Wang, Frank Greenberg et Ursula Bellugi, *Pour la Science*, février 1998).

Aujourd'hui, on connaît plus de 100 mutations qui perturbent le développement cognitif. En revanche, le fonctionnement cognitif normal est certainement déterminé par les effets de nombreux gènes agissant de concert. Ces groupes de gènes, nommés locus de caractères quantitatifs (LCQ), modifieraient la cognition de manière probabiliste plutôt que déterministe. Cette appellation qui s'applique aux gènes



**5. LES PERFORMANCES DE LECTURE** de jumeaux indiquent un lien génétique possible entre des capacités de lecture normales et anormales. Dans un groupe d'enfants ayant un jumeau, sélectionnés au hasard (*en haut*), un petit nombre de sujets sont dyslexiques (*en vert*). Dans un groupe d'enfants ayant un jumeau dyslexique, les capacités de lecture sont plus faibles que dans le groupe sélectionné au hasard. Les capacités des vrais jumeaux (*au milieu*) sont plus faibles que celles des faux (*en bas*). On en déduit que des facteurs génétiques sont impliqués dans ce trouble de la lecture. Les gènes impliqués dans les faibles capacités de lecture pourraient également intervenir dans l'aptitude normale à la lecture.

déterminants des caractères complexes, telle la cognition, souligne la nature quantitative de certains caractères physiques et comportementaux. On connaît des locus de caractères quantitatifs qui participent au déclenchement de maladies telles que le diabète, l'obésité, l'hypertension, à l'origine de problèmes comportementaux tels que la dépendance aux drogues.

Cependant, des mutations de locus responsables d'un trouble cognitif sont plus difficiles à identifier que des mutations de gènes isolés. Face à cette dif-

ficulté D. Fulker a mis au point une méthode, comparable à l'analyse des extrêmes de DF, qui consiste à rechercher chez les frères et sœurs des corrélations entre des mutations déjà répertoriées de l'ADN et des différences dans des caractères quantitatifs. Une valeur extrême d'un caractère chez au moins un membre d'une paire de frère et sœur facilitera la détection des causes génétiques. Par cette technique, des collègues ont localisé un locus associé à la dyslexie.

En pratique, la méthode est une analyse de marqueurs génétiques, c'est-à-dire de séquences d'ADN dont on sait qu'elles occupent des sites particuliers sur un chromosome et qu'elles varient légèrement selon les personnes. Les différentes versions des marqueurs, de même que les différentes versions des gènes, sont des allèles. Chaque cellule contient deux exemplaires de chaque chromosome (sauf pour les chromosomes sexuels X et Y chez l'homme), de sorte qu'elle a deux allèles de chacun de ces marqueurs. Pour chaque marqueur, les frères et sœurs sont soit semblables (pour les vrais jumeaux (ils ont les deux mêmes allèles), soit analogues à des faux jumeaux (ils ont un allèle commun), soit équivalents à des frères et sœurs adoptifs (ils n'ont aucun allèle commun).

Les généticiens qui ont découvert le locus de la dyslexie ont identifié des sujets dyslexiques parmi des jumeaux et ont ensuite évalué les performances de lecture de l'autre jumeau – le «cojumeau». Ils ont recherché les cojumeaux qui possèdent un même marqueur et qui avaient des scores de lecture également faibles ; ils ont déduit que le marqueur était probablement proche d'un locus responsable de la dyslexie, sur le même chromosome. Les généticiens ont trouvé un marqueur de ce type sur le bras court du chromosome 6 pour deux échantillons : une paire de frères et sœurs non jumeaux et une paire de frère et sœur faux jumeaux. Ces résultats ont été vérifiés par d'autres équipes.

Ces études ont permis la localisation des gènes associés à la dyslexie, mais la caractérisation de ces gènes reste à faire. L'identification des gènes qui déterminent des aptitudes cognitives spécifiques bouleversera la neurobiologie. La génétique moléculaire devrait éclairer l'étude des comportements humains. L'analyse des liens

génétiques existant entre des caractères, et entre des comportements et des mécanismes biologiques différents, sera sans doute bientôt possible. Les généticiens étudieront le développement des effets génétiques, et définiront plus précisément les interactions entre gènes et environnement.

Un jour les gènes responsables de troubles et de déficiences découverts, les cliniciens chercheront des thérapies plus efficaces et identifieront les personnes à risque longtemps avant l'apparition des symptômes. C'est déjà possible pour un allèle nommé Apo 4, associé à la démence et au déclin cognitif des personnes âgées. Lors des débats éthiques que susciteront les découvertes, on devra se souvenir qu'une influence génétique ne signifie pas un déterminisme génétique indépendant des interactions environnementales. Certains lecteurs trouveront sans doute notre position discutable, mais nous croyons que l'identification des gènes déterminants des caractères cognitifs est bénéfique.

### Reponses des tests

Aptitude verbale : **1a** : sec ; **1b** : relevé

Aptitude spatiale : **1** : 

**2** : b et c ; **3** : a, c et d ; **4** : a, b et f.

Robert PLOMIN est professeur à l'Institut de psychiatrie de Londres. John DEFRIES est directeur de l'Institut de génétique comportementale à l'Université du Colorado.

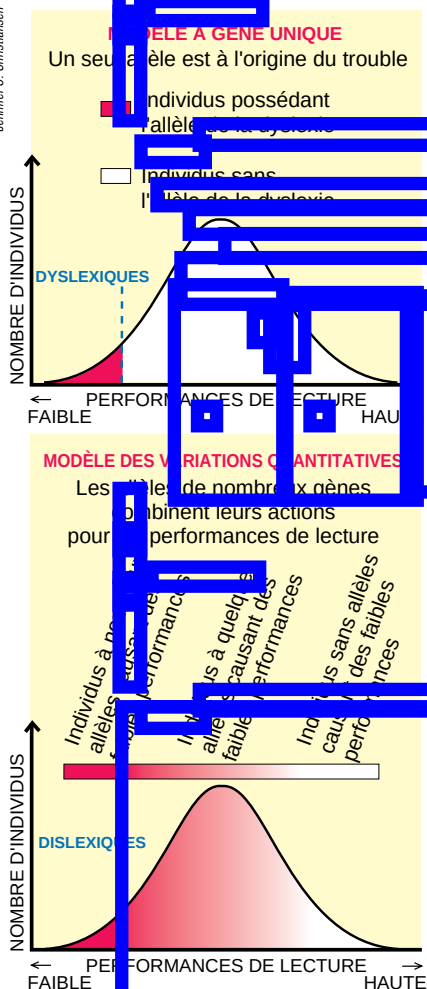
*Nature, Nurture and Psychology*, sous la direction de Robert Plomin et Gerald E. McClelland, American Psychological Association, Washington, D.C., 1993.

J.C. DEFRIES et Maricela ALARCÓN, *Genetics of Specific Reading Disability*, in *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, vol. 2, pp. 39-47, 1996.

Robert PLOMIN, John C. DEFRIES, Gerald E. McClelland et Michael KOTTER, *Behavioral Genetics*, 3<sup>e</sup> édition, W.H. Freeman, 1997.

E.L. GRUBBS, E.R. WOOD, M.S. MEYER, L.A. HART, W.C. SPEED, A. SCHUSTER et D.L. PAULS, *Susceptibility Loci for Distinct Components of Developmental Dyslexia on Chromosomes 6 and 15*, in *American Journal of Human Genetics*, vol. 60, pp. 27-39, 1997.

Jennifer C. Christiansen



**6. DEUX MODÈLES** illustrent la manière dont la génétique influence les difficultés de lecture. Dans le modèle classique (en haut), une variante, ou allèle, unique d'un gène provoque le trouble ; tous les porteurs de cet allèle deviennent dyslexiques (graphique). Cependant, les résultats de nombreuses études sont à l'origine d'un modèle différent (en bas), dans lequel un allèle unique est incapable de produire le déficit par lui-même. Les actions d'allèles de gènes multiples, dont l'action individuelle est subtile, se combinent, induisent des scores plus faibles et augmentent le risque de déficience.



# Les surdoués

ELLEN WINNER

*Les capacités exceptionnelles des enfants surdoués suscitent l'admiration. Cependant, ces enfants se sentent souvent isolés et incompris.*

Il y a quelques années, alors que j'assistais à un concert, un jeune garçon de l'assistance attira mon attention : pendant que l'orchestre jouait un concerto de Mozart, il tenait, ouverte sur les genoux, une volumineuse partition d'orchestre. Tout en lisant, il fredonnait la musique avec justesse. À l'entracte, j'abordai son père, qui me confirma que Stephen, âgé de neuf ans, ne se contentait pas de regarder la partition, mais qu'il savait réellement la déchiffrer et que la lecture de partitions et de manuels de programmation informatique était son activité préférée. À l'âge où la plupart des enfants apprennent à multiplier ou à diviser, et qu'ils occupent leur temps libre à courir dans les cours de récréation, Stephen avait déjà gagné un prix de théorie musicale auquel participaient les adultes.

Les enfants surdoués comme Stephen sont à la fois fascinants et déroutants. Ils sont à la fois craints et raillés. On reproche souvent à leurs parents de les pousser au lieu de leur laisser vivre une enfance normale et équilibrée. Ces enfants sont si particuliers que les écoles ne savent pas quel enseignement leur dispenser tandis que la société attend d'eux qu'ils deviennent, une fois adultes, des intellectuels ou des artistes créatifs et qu'elle considère comme un échec les promesses non tenues.

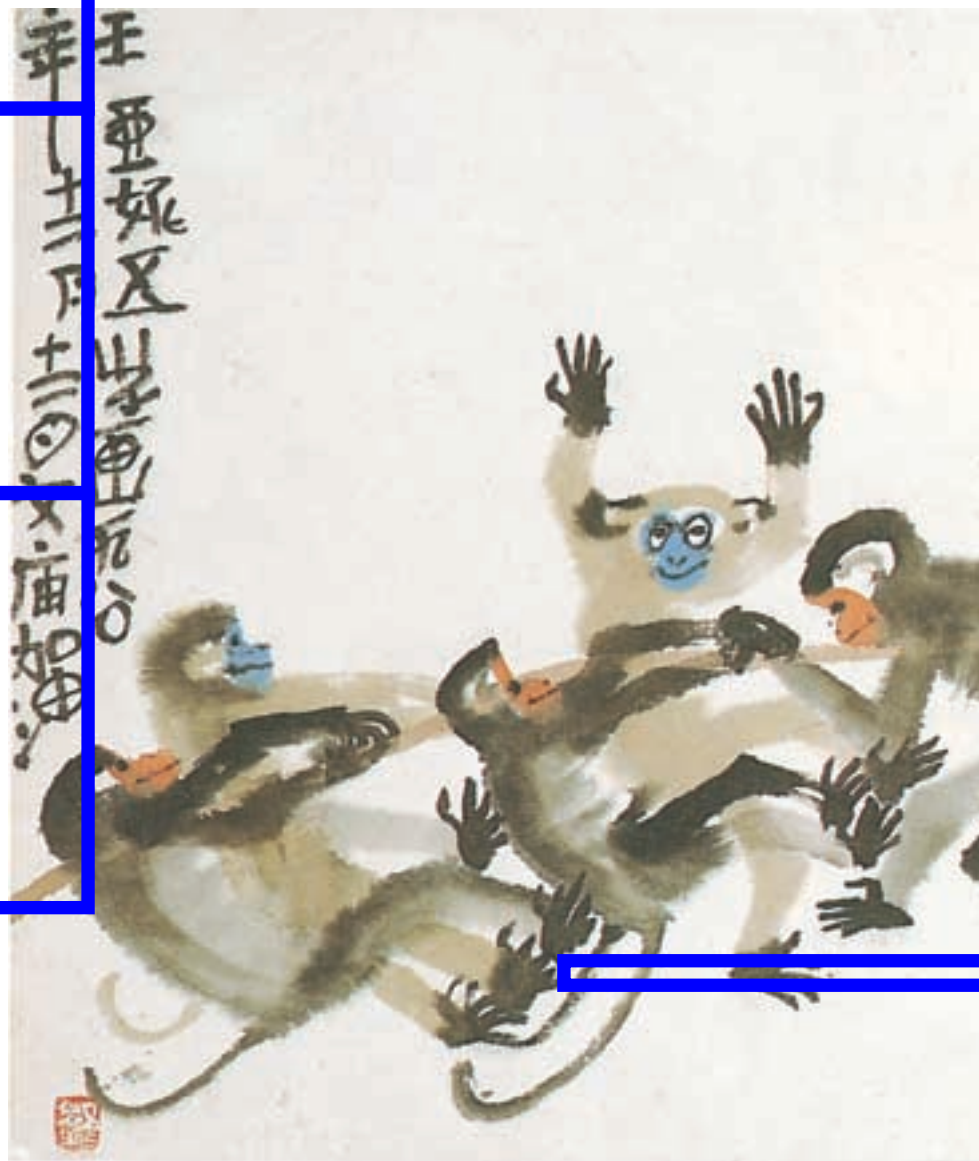
Les psychologues s'intéressent à ceux qui sont hors norme, mais, de même qu'ils connaissent mieux les psychopathologies que le bien-être ou le courage, ils en savent bien plus sur les déficients mentaux que sur les surdoués. L'étude de ces derniers aidera à leur trouver une scolarisation adaptée et éclairera les mécanismes de fonctionnement du cerveau humain.

Chacun de nous connaît des enfants intelligents, qui travaillent beaucoup et qui réussissent. Ces jeunes, toujours parmi les premiers, représentent 10 à

15 pour cent de l'ensemble des élèves ou des étudiants, mais seulement deux à cinq pour cent des étudiants sont surdoués. La plupart des enfants surdoués sont précoces : ils maîtrisent des sujets plus tôt et apprennent plus vite que la moyenne des enfants. Les surdoués (ou les prodiges, qui sont les plus sur-

doués des surdoués) diffèrent des enfants brillants par trois caractéristiques au moins.

Premièrement, les surdoués sont précoces ; ils maîtrisent des sujets plus tôt et ils apprennent plus vite que la moyenne des enfants. Deuxièmement, ils apprennent seuls : ils explorent leur



champ de prédilection de façon autonome et trouvent souvent la solution des problèmes intuitivement, sans passer par une suite d'étapes logiques. Troisièmement, ils ont une rage d'apprendre un sujet. Ils veulent connaître à fond le domaine où ils excellent, tels les mathématiques ou l'art ; ils se concentrent parfois sur leur travail, au point d'oublier le monde extérieur.

Les surdoués semblent apprendre à lire tout seuls, à l'âge où ils commencent à marcher ; puis, à l'école et au collège, ils assimilent les mathématiques de niveau supérieur avec aisance ou dessinent bien mieux que la plupart des adultes. L'heureuse combinaison de leur intérêt exclusif pour certains domaines et de leurs facilités d'apprentissage les conduisent à des exploits dans leur

domaine de prédilection. Les enfants surdoués sont toutefois plus sensibles aux traverses sociales et affectives et qu'on le pensait.

### Surdoués et QI

La première grande étude des surdoués dura plus de 70 ans ; elle fut entreprise à l'Université Stanford, au début du siècle, par Lewis Terman. Ce psychologue suivit plus de 1 500 personnes sélectionnées dès l'enfance par leurs professeurs ; elles avaient un résultat supérieur à 135 au test de QI de Stanford-Binet (le score moyen est de 100). Tous ces enfants étaient précoces : en général, ils avaient parlé et marché très tôt et ils savaient lire avant d'aller à l'école. La plupart étaient extrêmement curieux.

Selon Terman, ils étaient également supérieurs aux autres enfants par leur bonne santé, par leur adaptation sociale et par leurs attitudes morales. Ainsi naquit le mythe du surdoué heureux et bien intégré, n'exigeant guère d'attention particulière. L'éducation actuelle des surdoués reste fondée sur cette idée fausse.

Toutefois, l'étude de Terman avait un défaut majeur : tous les enfants étudiés avaient été sélectionnés parmi les plus brillants ; les enfants surdoués qui étaient inadaptés à l'enseignement scolaire, ceux qui étaient solitaires ou ceux qui avaient des difficultés à assimiler l'enseignement classique ne figuraient pas dans la population étudiée. De surcroît, les évaluations de l'adaptation sociale et de la personnalité



1. L'ARTISTE WANG YANI a réalisé cette peinture intitulée *Tire plus fort*, en 1980, alors qu'elle n'était âgée que de cinq ans. Lorsqu'elle était encore enfant, elle a fait plus de 4 000 peintures en l'espace de trois ans.

Wang Shiqiang

des surdoués étaient réalisées par ces mêmes professeurs admiratifs qui avaient sélectionné les sujets de l'étude.

L'idée fausse du surdoué adapté, dont l'éducation ne pose aucun problème, persiste malgré les travaux plus récents qui l'ont réfutée. Ainsi, Mihaly Csikszentmihalyi, de l'Université de Chicago, a observé que les enfants aux capacités exceptionnelles dans un domaine ont plus de difficultés à se faire des amis ou à trouver des pairs partageant les mêmes intérêts. Ces enfants semblent constamment sous pression, très indépendants et introvertis. Ils passent plus de temps seuls que la moyenne des enfants et, même s'ils apprécient leur vie mentale solitaire, ils expriment également un sentiment

de solitude. Plus leurs capacités sont extrêmes, plus ils se sentent isolés.

Selon certains psychologues, 20 à 25 pour cent des enfants les plus doués auraient des problèmes sociaux et affectifs ; cette proportion est près de deux fois supérieure à celle des enfants normaux. Les surdoués essaient souvent de cacher leurs capacités, dans l'espoir d'améliorer leur image. Les filles semblent plus gênées que les garçons : elles souffrent davantage de dépressions, d'une moindre estime de soi et de troubles psychosomatiques que les garçons.

Les professeurs qui ont dans leurs classes des surdoués en même temps que des élèves normaux ont des difficultés parce que les surdoués, qui connaissent déjà les matières ensei-

gnées, s'ennuient et s'isolent. La situation est pire encore pour les surdoués qui ont suivi des classes en raison de leurs capacités dans certaines matières : ils peuvent se retrouver en difficulté dans les matières qu'ils n'ont pas étudiées.

## Des aptitudes inégales

Terma défendait l'idée que les surdoués avaient des aptitudes équivalentes dans toutes les matières scolaires. Certains ont en effet des facilités exceptionnelles pour s'exprimer oralement, voir dans l'espace et résoudre les problèmes numériques et logiques. Les enfants qui terminent leurs études universitaires au début de leur adolescence, ou même avant, sont probablement surdoués dans toutes les matières enseignées. Toutefois, beaucoup d'enfants surdoués ne sont exceptionnels que dans une seule matière ; dans les autres matières, ils n'ont pas de facilités particulières et, parfois même, ils ont des difficultés d'apprentissage. Des enfants créatifs qui ont des difficultés scolaires ne sont pas immédiatement reconnus comme des surdoués.

Chez les surdoués, la disparité des aptitudes est grande. Une étude récente portant sur plus de 1 000 adolescents extrêmement doués pour les matières scolaires a révélé que les compétences en mathématiques et en expression orale de 95 pour cent d'entre eux sont très inégales. Des aptitudes exceptionnelles en mathématiques et dans la capacité à se mouvoir dans l'espace (danse, sport) s'accompagnent souvent de capacités moyennes, voire insuffisantes, en expression orale. À l'Université Johns Hopkins, Julian Stanley a découvert que les compétences de nombreux surdoués sélectionnés pour des stages d'été en mathématiques différaient beaucoup. L'un d'entre eux, âgé de huit ans, a obtenu une note de 760 sur 800 en mathématiques sur un test d'évaluation, mais seulement 29 sur 800 en expression orale du même test.

Le psychologue américain Benjamin Bloom, qui a étudié 20 mathématiciens de renommée mondiale, a observé qu'aucun d'entre eux n'avait appris à lire avant d'aller à l'école (pourtant la plupart des surdoués savent lire avant d'entrer au cours préparatoire) et que six avaient eu des pro-



© 1977 Harcourt Brace and Company

**2. NADIA, UNE «IDIOTE SAVANTE» EN DESSIN,** était une enfant autiste, avec un âge mental de trois ans quand elle en avait six. Le croquis représenté ici, qu'elle réalisa en 1973, à l'âge de cinq ans et demi, témoigne d'une maîtrise du trait qui rappelle les grands maîtres de la Renaissance.

blèmes d'apprentissage de la lecture. De même, une étude portant sur des inventeurs (aux aptitudes mécaniques et spatiales supposées élevées) a montré qu'ils avaient lu et écrit difficilement quand ils étaient enfants.

Ainsi, de nombreux enfants ayant des difficultés de langage peuvent avoir des capacités d'organisation spatiale développées. À l'Université Stanford, l'économiste Thomas Sowell a étudié des enfants présentant un retard de langage, après avoir eu un fils qui n'a pas parlé avant l'âge de quatre ans. En général, ces enfants percevaient bien l'espace (par exemple, ils excellaient dans la réalisation de puzzles) et la plupart avaient des proches dont la profession nécessitait de bonnes capacités d'organisation spatiale. Le résultat le plus étonnant de cette étude était que 60 pour cent de ces enfants avaient des parents ou des proches qui étaient ingénieurs.

La corrélation entre les déficiences verbales et les capacités exceptionnelles d'organisation spatiale semble particulièrement forte chez les peintres et chez les sculpteurs. Avec Beth Casey, nous avons trouvé que les étudiants en art du Collège de Boston font plus de fautes d'orthographe que les étu-

dians qui suivent des cursus mathématiques ou littéraires. Non seulement les étudiants en art orthographiaient mal plus de la moitié d'une liste de 20 mots, mais ils faisaient des fautes généralement associées à de la dyslexie, adoptant une orthographe non phonétique : par exemple, «physicein»



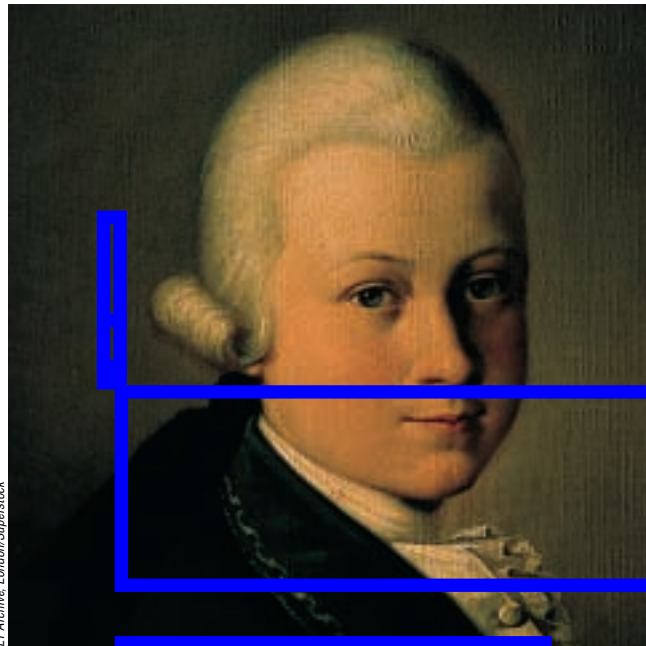
3. LE DESSIN CLASSIQUE d'un enfant de cinq ans ayant des capacités moyennes manque de détails et il est très schématique.

pour «physicien» (au lieu de la graphie phonétique «fisycien»).

Pourquoi de nombreux enfants doués pour une activité particulière ont-ils des difficultés dans d'autres domaines? Nous l'ignorons, mais si l'école leur dispense un enseignement très avancé dans toutes les matières, ces élèves seront constamment gênés dans les matières où ils sont faibles. Pis encore, si ces surdoués aux capacités inégales finissent par se sentir inadaptés et perturbent la classe, leurs dons risquent de passer inaperçus.

### Les idiots savants : inégaux à l'extrême

Ceux que les psychologues nomment les «idiots savants» présentent les plus grandes disparités d'apprentissage. Les idiots savants sont des personnes hyperspécialisées et qui, soit sont autistes, soit présentent des symptômes autistiques (leur QI est souvent compris entre 40 et 70). Les idiots savants dits «ordinaires» ont une capacité normale qui contraste avec leurs autres aptitudes gravement limitées. En revanche, certains, moins nombreux (on en connaît moins de 100), ont une ou plusieurs



4. WOLFGANG AMADEUS MOZART est un des enfants prodiges les plus connus. À trois ans, il reconnaissait les notes sur le piano ; à quatre ans, il savait dire si un violon était bien accordé au quart de ton près et, à huit ans, il déchiffrait des morceaux complexes. Mozart composa dès l'âge de cinq ans, écrivant deux menuets pour clavecin. Très jeune, il savait jouer des morceaux de mémoire après les avoir entendus une seule fois, et improviser sur un thème.



5. THOMAS EDISON est un exemple d'individu surdoué aux capacités inégales. Cet inventeur prolifique déposa 1 093 brevets, dont celui de la lampe à incandescence. Enfant, il était obsédé par la science et passait son temps à bricoler. Toutefois, Edison apprenait difficilement et il parlait mal ; il semble avoir présenté des symptômes de dyslexie. La coexistence d'aptitudes exceptionnelles d'organisation spatiale et de difficultés de langage se rencontre fréquemment chez les surdoués aux capacités inégales.

compétences prodigieuses. Au siècle dernier, ils étaient exhibés comme des phénomènes de foire.

Les idiots savants sont habituellement dotés en dessin ou en sculpture, en musique ou en calcul mental. Dans leur domaine de spécialité, ils ressemblent aux enfants prodiges : ils ont des capacités précoces, de bonnes facultés d'auto-apprentissage, et ils font preuve d'une soif inextinguible de connaissances. Nadia, par exemple, phénomène en dessin, réalisait dès l'âge de trois ou quatre ans des croquis plus réalistes que ceux de n'importe quel enfant prodige du même âge. En outre, les idiots savants surpassent souvent les surdoués pour ce qui concerne la précision des souvenirs.

Ces personnes sont en quelque sorte des versions extrêmes de surdoués aux capacités disparates. Tout comme les enfants surdoués sont souvent dotés d'un génie mathématique ou artistique associé à des difficultés d'apprentissage du langage, les idiots savants combinent une capacité d'organisation spatiale très développée et de graves déficiences dans le domaine du langage. L'une des explications biologiques les

plus intéressantes de cette particularité suppose une organisation atypique du cerveau, avec des déficits dans l'hémisphère cérébral gauche (qui commande habituellement le langage), compensés par un développement plus poussé de l'hémisphère droit (qui commande les aptitudes spatiales et visuelles).

Selon le psychiatre Darold Treffert, le fait que de nombreux idiots savants furent des prématurés corrobore l'hypothèse selon laquelle ils auraient des lésions dans l'hémisphère gauche du cerveau et un développement accru de l'hémisphère droit. À la fin de la grossesse, le cerveau du fœtus subit un «élagage» au cours duquel les neurones en surnombre meurent (voir *La maturation du cerveau*, par Carla Shatz, *Pour la Science*, novembre 1992). Les cerveaux des prématurés n'ont peut-être pas subi cette transformation ; dans ce cas, si l'hémisphère gauche subit un traumatisme peu avant la naissance, de nombreux neurones non utilisés restent disponibles, ce qui peut conduire à un développement accru de certaines aptitudes de l'hémisphère droit.

Les causes possibles de ces lésions cérébrales chez les prématurés sont

nombreuses : anomalies au cours de la grossesse, hypoxogénation insuffisante durant l'accouchement, suroxygénation néonatale donnée aux enfants prématurés. En plus de lésions cérébrales, la suroxygénation peut déclencher une cécité chez les prématurés. Maints musiciens phénomènes ont cette triple caractéristique : naissance prématurée, cécité et renforcement des fonctions de l'hémisphère droit.

Les enfants surdoués posséderaient aussi une organisation cérébrale atypique. Chez la plupart des étudiants, l'aptitude verbale est commandée par le seul hémisphère gauche. En revanche, chez les enfants talentueux en mathématiques, les deux hémisphères participent à la production du langage, l'hémisphère droit organisant des tâches assurées d'ordinaire par l'hémisphère gauche. Ces enfants sont fréquemment gauchers, ce qui indique que leur hémisphère gauche n'est pas nettement dominant (l'hémisphère gauche du cerveau commande les membres droits du corps).

Le neurologue Norman Geschwind, de la Faculté de médecine de Harvard, s'est étonné que certains



Bill Eppridge. Life Magazine © Time, Inc.

**6. LES JUMEAUX GEORGE ET CHARLES** sont des idiots savants, surdoués en calcul mental. Tous deux sont capables de trouver très rapidement le jour de la semaine de n'importe quelle date passée ou future. Ces jumeaux sont nés en 1939, prématurés de trois mois et retardés mentaux. Leur QI se situe entre 40 et 70.

Une capacité de calcul extraordinaire chez des enfants atteints par ailleurs d'un retard mental important illustre la disparité des dons observés à un degré moindre chez des enfants talentueux en mathématiques, mais ayant des difficultés d'apprentissage du langage.

## Les surdoués, une population hétérogène

La synthèse d'E. Winner montre comment des travaux qui associent biologie, sociologie, psychologie et pédagogie, mettent en évidence une typologie des surdoués et des critères de différenciation.

De nombreux psychologues s'en sont tenus à l'utilisation de tests sur le QI pour détecter ces individus, mais l'étude de grandes populations de surdoués révèle des profils d'aptitudes si différents que le critère unidimensionnel du QI est insuffisant. Les domaines d'aptitudes sont très variés : aptitude artistique, gymnique, affectif, expressif (aptitude verbale qui s'oppose à l'aptitude mathématique), apprentissage qui s'oppose à l'aptitude de créateur ou encore l'autonomie qui s'oppose à l'aptitude d'exécutant.

Si les profils psychiques diffèrent, c'est que le développement des aptitudes des individus n'est égal, ni chez un même individu, ni entre eux. Le degré d'inégalité des aptitudes diverses est indépendante du niveau global ou partiel des individus, lui-même indépendant de la vitesse de développement. Ces variables jouent donc indépendamment, pour le meilleur et pour le pire.

Ainsi, le décalage entre l'intellect et l'affectif ou la motricité peut devenir une inégalité de développement profitable à celle qui donne son caractère au talent individuel, et donc, celle qui permet l'existence d'une division du travail dans des sociétés de plus en plus différenciées. L'inégalité de développement psychique des aptitudes, accessible à l'exploration empirique, permet la spécialisation ultérieure des compétences. Elle peut se traduire par la complémentarité des talents de tous niveaux. Lorsqu'elle apparaît précocement, l'inégalité de développement donne des jeunes prodiges avec un ou plusieurs talents remarquables dans des domaines variés. Aussi précoce, mais poussée à l'extrême, l'inégalité de développement aboutit à ces « idiots savants », phénomènes qui avaient frappé très tôt Alfred Binet.

D'où proviennent ces inégalités ? Peut-on renforcer les aptitudes et pal-

lier les déficiences ? Ces questions animent la recherche actuelle. Des résultats récents montrent que l'insertion de l'appareil psychique dans le restant du système physiologique rend l'intellect sensible à des facteurs apparemment extrinsèques. De même que les troubles de la mécanique respiratoire lors du sommeil (apnée), réduisent l'acuité de la vigilance, les conditions du sommeil paradoxal sont associées, d'une part au « surdouement » intellectuel et, d'autre part, au développement de la volonté, sans laquelle les autres aptitudes sont sans usage et sans avenir.

Non seulement la formation de l'œuf humain est un jeu de dés qui donne parfois des bases de l'inégalité des aptitudes, mais les hasards de la gestation et de ses conditions, ceux de l'accouchement, les variations accidentelles d'oxygénation ou d'imprégnation hormonale des tissus sont des hypothèses pertinentes de nombreuse inégalité du développement.

Ainsi, l'immense brassage des hasards cumulatifs est peut-être ce qui rend compte d'une stabilité vraisemblablement forte du génome humain : la preuve, la contribution à l'émergence de surdoués dans les couches défavorisées des pays industrialisés ou dans les populations humaines longtemps défavorisées par la géographie ou par l'histoire.

L'écart des profils scolaires contribue indiscutablement au dépistage des surdoués et à l'organisation de pédagogies qui leur sont adaptées. Toutefois, un développement systématique des tests psychométriques et d'exercices propres à entraîner les aptitudes de base – et non seulement les compétences pragmatiques – sont nécessaires : ces dispositifs devraient être associés également à des orientations sociales prospectives, en vue d'animer et de solidariser les élans des jeunes. Faute de quoi, tout épanouissement promis et jalousement cultivé manquerait à l'appel.

Robert PAGÈS et Jean BRUNAULT,  
*Eurotalent, Paris*

individus aux dons liés à des zones de l'hémisphère droit (musique et art) soient plus fréquemment gauchers ou ambidextres que les autres. De surcroît, ces surdoués ont plus de déficiences de l'hémisphère gauche, telles que retard d'apprentissage du langage, bégaiement ou dyslexie. N. Geschwind et son collègue Albert Galaburda supposent que cette association de dons et de déficits, nommée «pathologie de la supériorité», résulte de l'effet de la testostérone (l'hormone mâle) sur le développement du cerveau du fœtus.

Les neurologues savent que des concentrations élevées en testostérone peuvent retarder le développement de l'hémisphère gauche du cerveau fœtal, ce qui déclencherait, en compensation, le développement accru de l'hémisphère droit. Cette «toxicité» de la testostérone expliquerait également que plus de garçons que de filles ont des aptitudes particulières en mathématiques et en organisation spatiale, sont gauchers ou ambidextres et présentent des troubles du langage. Les neurologues ont également noté que les enfants surdoués souffrent plus fréquemment que les autres d'affections immunitaires, comme les allergies et l'asthme. Or, un excès de testostérone perturbe la maturation du thymus, qui intervient dans le développement du système immunitaire.

Cette explication de la disparité des dons liée à la testostérone reste toutefois controversée et, à ce jour, la théorie des déficiences et de leur compensation chez les idiots savants n'est pas étayée par l'étude du tissu cérébral. Néanmoins, de nombreux psychologues pensent que les dons sont profondément ancrés dans le cerveau du nourrisson, car les idiots savants et les surdoués présentent des capacités exceptionnelles dès leur plus jeune âge, bien avant qu'ils ne passent des heures à développer leurs dons.

## Favoriser l'expression des dons

Quel enseignement devrait-on dispenser aux surdoués dont les aptitudes sont disparates, afin d'éviter leur ennui à l'école et leur isolement social? La plupart des programmes pour surdoués s'adressent à des enfants au QI supérieur à 130; ces enfants reçoivent



**7. UNE INTELLIGENCE BRILLANTE ne suffit pas à rendre heureux. William James Sidis (1898-1944) fut un grand surdoué : il savait lire et écrire à l'âge de deux ans et parlait six langues vers dix ans ; à l'âge de onze ans, il donnait des cours de mathématiques à l'Université Harvard. Toutefois, son père l'avait impitoyablement nourri, lui refusant tous les plaisirs de l'enfance et laissant les médias le traquer sans répit. En grandissant, il devint amer et se désintéressa totalement des mathématiques après avoir brillamment obtenu sa maîtrise de mathématiques à l'âge de 15 ans. Ce jeune homme talentueux passa le reste de sa vie à effectuer d'ingrâtes tâches d'employé de bureau, et ses dons devinrent obsessionnels et autistiques. Il mourut, solitaire, d'une hémorragie cérébrale à l'âge de 46 ans.**

chaque semaine quelques heures d'un enseignement supplémentaire, mais ces programmes ne conviennent pas aux grands surdoués.

Les écoles normales ont la possibilité de s'occuper des enfants moyennement surdoués dans les diverses matières scolaires. Ces enfants constituent la majeure partie des élèves qui suivent des enseignements spéciaux : ce sont des élèves brillants, mais sans aptitudes extraordinaires, qui ne sont pas confrontés aux problèmes de la précocité et de l'isolement avec la même acuité que les grands surdoués. Comme la plupart des élèves, ces enfants gagneraient d'un relèvement du niveau général de l'enseignement.

D'autres pays, notamment le Japon et la Hongrie, ont un niveau scolaire bien supérieur à celui des États-Unis, et les enfants réussissent bien. On

pourrait répondre aux besoins des élèves moyennement surdoués en proposant tout simplement des programmes plus difficiles.

Lorsque l'on sélectionne les élèves pour les programmes destinés aux surdoués à l'aide de tests de QI, on choisit surtout des élèves qui présentent des dispositions particulières dans l'ensemble des matières scolaires. Cependant, les tests de QI ne révèlent pas toujours les enfants qui ont des aptitudes exceptionnelles, mais inégales. L'ombre de ces derniers réussissent très moyennement les tests de QI, car ils ont des talents en mathématiques ou de langage, mais pas dans les deux matières à la fois. Les élèves ayant des compétences particulières en musique, en art ou en sport sont, eux aussi, régulièrement ignorés. L'enseignement devrait plutôt détecter les surdoués en examinant leurs performances dans des domaines spécifiques, plutôt que de sélectionner les élèves à partir des tests de QI.

Les écoles devraient placer les grands surdoués dans des cours avancés seulement dans les matières où ils sont très forts. Celles où ils ne sont pas exceptionnels peuvent leur être enseignées dans leur classe habituelle. Les cours avancés peuvent être organisés avec des élèves plus âgés au sein de leur école ou dans des cours d'été accéléérés où on leur enseigne, en quelques semaines, le programme de toute une année.

Les grands surdoués ont un besoin impérieux de travailler dans leur domaine de compétence en compagnie d'individus de leur niveau. Une stimulation appropriée et les opportunités ainsi offertes permettront à ces enfants de s'épanouir pleinement.

Ellen WINNER est psychologue au Collège de Boston.

Rémy CHAUVIN, *Les surdoués*, Stock, 1975.

*Developing Talent in Young People*, sous la direction de Benjamin S. Bloom, Ballantine, 1985.

M. CSIKSZENTMIHALYI, K. RATHUNDE et S. WHALEN, *Talented Teenagers : The Roots of Success and Failure*, Cambridge University Press, 1993.

Ellen WINNER, *Les surdoués : mythes et réalités*, Aubier, 1997.



# Les formes d'intelligence

HOWARD GARDNER

*L'intelligence n'est pas une faculté homogène que noterait le QI : ce dernier ne considère ni l'intelligence musicale, ni l'intelligence spatiale, ni l'intelligence corporelle, par exemple.*

L'intelligence est-elle une faculté qui serait mesurée par le quotient intellectuel? Des décennies d'études et d'analyses m'ont convaincu du contraire: l'intelligence humaine englobe un ensemble de compétences bien plus variées que celles qui sont analysées de façon simpliste par les tests de QI. Je dénombre ordinairement huit formes d'intelligence, mais il y en a probablement davantage: à côté des formes d'intelligence «classiques», telles les aptitudes linguistiques et la logique mathématique, on doit faire figurer des formes d'intelligence moins habituelles, comme les talents musicaux ou spatiaux. Les systèmes éducatifs gagneraient beaucoup à tenir compte de ces formes d'intelligence, qui ne se révèlent généralement pas dans les tests de QI.

L'idée d'une intelligence qui serait bien décrite par le QI s'est imposée parce que quelques psychologues des années 1920 ont érigé en dogme les résultats de leurs travaux; on a également prétendu que les individus naissent avec une certaine intelligence, ou intelligence potentielle, qu'il est difficile de la modifier et que les psychologues peuvent établir le QI d'un individu grâce à des tests à réponses brèves, ainsi qu'à l'aide de mesures simples, telles que la détermination du temps de réaction à une série d'éclairs lumineux.

Cette «théorie orthodoxe» a été rapidement critiquée. Le journaliste américain Walter Dill Thompson, par exemple, a montré que les critères retenus pour l'évaluation de l'intelligence étaient douteux et a milité pour faire comprendre que cette évaluation est plus difficile que les psychométriciens ne le pensaient.

Les psychologues ont également poursuivi les études, et ils ont progressivement montré que l'intelligence est un ensemble de plusieurs capacités. Dans les années 1930, à l'Université de Chicago, Louis Thurstone soutint qu'il était plus réaliste d'envisager sept «vecteurs de l'esprit», en grande partie indépendants. Trente ans plus tard, le psychologue américain Joy Guilford énuméra 120 formes d'intelligence, portées par la suite à 150. Aujourd'hui, à l'Université Yale, Robert Sternberg propose une théorie de l'intelligence à trois composantes: une capacité de calcul, une capacité de prise en compte du contexte et une capacité de réaction aux situations nouvelles.

Les adversaires de la notion d'intelligence unique, de même que ses partisans, sont cependant tous persuadés que l'on pourra déterminer la nature de l'intelligence en analysant les résultats de tests. Les défenseurs de l'orthodoxie semblent croire que les batteries élargies de tests feront émerger un facteur global d'intelligence; ils en veulent pour preuve que les résultats obtenus par une même personne aux différents tests d'intelligence sont souvent homogènes. Au contraire, les «pluralistes» pensent que des tests suffisamment variés révéleront que l'intelligence se compose de capacités indépendantes.

Pourquoi, toutefois, des tests seraient-ils nécessaires à l'exploration de l'intelligence? Ne portait-on pas de jugements sur l'intelligence avant que Francis Galton et Alfred Binet n'échafaudent la première série de tests psychométriques, il y a un siècle? Si les dizaines de tests de QI utilisés dans le monde disparaissaient soudain, ne pourrions-nous plus évaluer l'intelligence?

Me référant à des études d'enfants doués pour une ou plusieurs disciplines artistiques et d'adultes ayant subi des attaques cérébrales qui avaient altéré certaines facultés et en avaient épargné d'autres, m'ont montré que la théorie d'une intelligence unique est douteuse. Chaque jour, je découvrais des individus aux capacités très variées et souvent indépendantes.

## Une brèche dans l'orthodoxie

Ayant ainsi compris que les êtres humains possèdent plusieurs aptitudes relativement indépendantes plutôt qu'une «puissance» intellectuelle mesurée par le QI, j'ai cherché à identifier différemment la notion d'intelligence humaine: c'est, me semblait-il, «un potentiel psychobiologique qui permet de résoudre des problèmes ou de créer des objets appréciés dans au moins un contexte culturel». En me concentrant sur les objets fabriqués et la valeur culturelle, je me suis écarté des approches psychométriques classiques.

Le passage d'une intuition à une définition correcte des formes d'intelligence humaine a nécessité l'apport de plusieurs disciplines (voir l'encadré de la page 39). La première est la psychologie: on l'utilise pour rechercher l'indépendance de l'évolution des divers aptitudes et l'existence (ou l'absence) de corrélations entre certaines aptitudes.

Ces études sont complétées par des enquêtes historiques: on analyse des personnes exceptionnelles, notamment des prodiges, des savants ou des personnes inaptes aux études. L'anthropologie montre comment diverses aptitudes sont développées,



## L'intelligence de l'entraîneur sportif

Lors de la coupe du monde de football, les choix tactiques effectués par Aimé Jacquet – entraîneur de l'équipe française – ont suscité de nombreuses controverses. Pourtant, A. Jacquet, ancien ouvrier, ancien joueur professionnel, a trouvé les ressources pour amener une équipe au plus haut niveau. Intelligent, A. Jacquet? Avant la coupe, certains doutaient de ses capacités et de sa personnalité, mais personne ne pensait à mesurer son quotient intellectuel.

La compétence professionnelle ne peut être réduite à une question d'intelligence abstraite au sens classique du terme, ni à son évaluation par des tests de QI. Comme souligné par H. Gardner, l'intelligence est une capacité très vaste : intelligence des situations, intelligence pratique ou concrète, intelligence émotionnelle, etc. Pour décrire – voire prédire – l'adaptation d'un individu aux multiples tâches professionnelles quotidiennes, un concept unidimensionnel ne suffit pas.

En sport, comment décrire un bon entraîneur? Par ses qualités propres (sa personnalité, son affectivité, etc.)? Par ses savoirs? L'expertise et l'efficacité de l'entraîneur sont difficiles à analyser et à définir. Cependant, les études de l'expertise dans divers domaines professionnels montrent que les individus adoptent un fonctionnement cognitif que l'on peut analyser à partir d'une distinction (caricaturale) entre deux conceptions de la pratique.

Une partie des savoirs professionnels découle sans doute de théories scientifiques relativement bien formalisées. En effet, pour certains, une théorie de l'entraînement n'est rien d'autre qu'un modèle formalisé de l'action, un ensemble systématique et cohérent de représentations que l'on s'efforce de justifier à l'aide de la pensée rationnelle ou scientifique. La fonction pratique des théories consiste alors à offrir aux entraîneurs des raisons d'agir comme ils le font, ou comme ils devraient le faire.

Ainsi, l'approche classique des sciences appliquées, qui domine aujourd'hui dans les sciences du sport, suppose qu'à partir de problèmes identifiés, les entraîneurs appliquent des règles selon le contexte pratique qu'ils rencontrent. Les entraîneurs préparent peu leur entraînement, mais ils s'adaptent en temps réel. Dans cette hypothèse, l'entraîneur doit avoir une intelligence conceptuelle, une capacité d'abstraction et de mémorisation pour trouver les meilleures solutions d'entraînement.

Cette description ne recouvre cependant pas complètement l'activité des entraîneurs. Si la recherche en sciences du sport a permis le développement de connaissances que l'on peut appliquer, la référence à une «rationalité technique», selon laquelle l'entraîneur applique des principes et des méthodes scientifiquement validés, est limitée. On devra analyser plus finement leur activité afin de mieux cerner les processus mentaux requis par ce métier, pour mieux détecter et mieux former des entraîneurs efficaces.

L'analyse de l'expertise montre, qu'en général, les professionnels développent des bases de connaissances spécifiques, consistant pour une part en des règles que l'on peut formaliser (de nature scientifique ou non) et, pour une autre part, en des connaissances plus implicites, plus personnelles, qui résultent principalement de l'expérience. Ainsi, le bon entraînement ne découle pas de la stricte application de connaissances rationnelles, mais d'une quête toujours renouvelée du meilleur compromis entre les objectifs divergents.

Examinons, dans quelques disciplines sportives, des exemples d'analyse de l'activité de l'entraîneur. Jacques Saury, de l'Ecole nationale de voile, et Marc Durand, de l'Université de Montpellier 1, ont montré que les entraîneurs de voile enseignent la technique aux athlètes tout en cultivant des relations amicales avec eux. L'entraînement est conçu et modifié de façon interactive, en coopération, et non dans un rapport concepteur-exécutant. De cette coopération naissent les conditions de l'entraînement, sans que celles-ci aient été intégralement prévues par l'entraîneur.

Meilleures collègues Fabienne d'Arripe Longueville et Jean Fournier ont montré que les entraîneurs-experts de tir à l'arc fondent leur entraînement sur le travail coopératif et sur l'accès de l'athlète à l'autonomie. L'entraîneur demande aux athlètes de s'investir mentalement (en terme de motivation et de concentration) sur la tâche de tir. Ce mode de relation se concrétise par une individualisation du processus d'entraînement et par la recherche d'une forte cohésion au sein de l'équipe.

Carole Sève, de la Fédération française de tennis de table, a montré que, dans ce sport, l'action des entraîneurs est toujours improvisée, même lorsque les entraîneurs anticipent mentalement le contenu de la séance d'entraînement : l'entraînement se construit pas à pas. Cela est possible, car la planification des séances d'entraînement reste finalement assez vague, ce qui ouvre des possibilités d'action en temps réel.

Les études sur le développement de l'expertise dans l'entraînement que j'ai réalisées à l'INSEP indiquent que les entraîneurs se forment par différents moyens. Les meilleurs entraîneurs, que l'on nomme entraîneurs-experts, ont un parcours professionnel long – de l'ordre de 20 ans – dans des fonctions variées d'enseignement et d'entraînement. Souvent, un entraîneur particulier (un mentor) a marqué leur début dans le métier et a influencé à la fois leur conception de l'entraînement et leurs attitudes d'entraîneur. La formation universitaire initiale ne semble pas expliquer l'expertise professionnelle. En revanche, l'expérience, liée à une volonté d'observation et d'expérimentation continue, est une source importante de savoirs. L'acquisition de l'expertise est liée à l'expérience.

Philippe FLEURANCE,  
Laboratoire de psychologie du sport, INSEP, Paris

ignorées ou appréciées dans différentes cultures. La sémiologie identifie les symboles qui codent certaines sortes d'expressions : verbales, arithmétiques et cartographiques, par exemple. La biologie prouve enfin que les diverses aptitudes ont des histoires évolutives distinctes et sont assurées par des structures neuronales particulières ; ainsi, diverses parties de l'hémisphère gauche sont actives lors des tâches motrices, lors des tâches linguistiques ou quand le cerveau calcule ; l'hémisphère droit est le siège d'aptitudes spatiales et musicales avec, notamment, le discernement de la fréquence des sons.

## Huit formes d'intelligence

J'ai ainsi étudié de nombreuses aptitudes, allant de celles fondées sur les sens à celles touchant à l'organisation, au caractère et, même, à la sexualité. Lorsqu'une aptitude présumée répond au moins partiellement aux critères établis, je la considère comme une forme d'intelligence.

En 1983, j'ai conclu que sept aptitudes répondaient assez bien aux critères précédents : l'intelligence linguistique (la logique mathématique, l'aptitude musicale, l'aptitude spatiale, l'aptitude du corps à se mouvoir (celle des athlètes, des danseurs), l'intelligence interpersonnelle (la capacité de déchiffrer les états d'âme des gens, leurs motivations et autres états mentaux), et l'intelligence intrapersonnelle (l'aptitude à analyser ses propres sentiments et à s'en inspirer pour guider son comportement). On réunit généralement les deux dernières formes en une «intelligence émotionnelle» (bien que, selon moi, le terme soit galvaudé : il s'agit plus de cognition que d'émotion). Les tests classiques d'intelligence sondent surtout l'intelligence linguistique et l'intelligence logique ; quelques-uns examinent l'intelligence spatiale. Les quatre autres formes d'intelligence sont quasi ignorées.

En 1995, mes analyses m'ont conduit à proposer une huitième forme d'intelligence : celle du naturaliste, la capacité d'identifier et de classer des objets naturels. Linné et Charles Darwin possédaient apparemment cette forme d'intelligence. Aujourd'hui, une neuvième forme d'intelligence semble s'imposer : une intelligence existentielle, qui

englobe la propension humaine à réfléchir aux questions fondamentales sur la vie, la mort ou l'infini. L'intelligence existentielle rejoindra la liste des élues si des preuves neuronales de son existence apparaissent.

La théorie des intelligences multiples reconnaît deux grands principes : d'une part, les êtres humains possèdent toutes ces formes d'intelligence ; d'autre part, de même que nous sommes tous différents, nous avons des profils d'intelligence. Deux individus, même des jumeaux ou des clones, n'ont jamais le même profil intellectuel, parce que leur histoire est particulière.

Cette théorie des intelligences multiples est vivement débattue. De nombreux psychologues n'admettent pas que l'on s'éloigne des tests classiques et qu'on propose d'adopter des catégories qui ne leur sont pas familières, et qui sont difficilement quantifiables. Beaucoup hésitent à utiliser le mot «intelligence» pour décrire des compétences qui ne sont pas celles qui avaient été reconnues par les fondateurs de la psychologie.

Par exemple, parler de talent musical plutôt que d'intelligence musicale est une définition aussi étroite dévalue pourtant ces aptitudes : des chefs d'orchestre ou des danseurs ne seraient pas intelligents mais seulement talentueux.

## Les critères à partir desquels on définit les formes d'intelligence

1. Une aptitude particulière a-t-elle été isolée à la suite d'une attaque cérébrale ? Par exemple, des aptitudes linguistiques peuvent être touchées ou épargnées par des attaques.
2. Existe-t-il des prodiges, des savants et d'autres êtres d'exception ? Ces individus permettent de bien repérer les diverses formes d'intelligence.
3. Existe-t-il un jeu d'opérations de base identifiable ? L'intelligence musicale, par exemple, est la sensibilité des individus à la mélodie, à l'harmonie, au rythme, au timbre et à la structure musicale.
4. Existe-t-il une histoire du développement spécifique chez un individu, associée à une définition possible de la performance pour cette compétence ? On examinera les talents d'un athlète de haut niveau, d'un vendeur ou d'un naturaliste, mais aussi les étapes d'une telle compétence.
5. Existe-t-il une histoire évolutionniste et une vraisemblance de cette évolution ? On examinera, par exemple, l'intelligence spatiale des mammifères ou l'intelligence musicale des oiseaux.
6. Existe-t-il des tests en psychologie expérimentale ? Les psychologues ont prévu des exercices qui indiquent spécifiquement quelles compétences sont reliées et lesquelles sont autonomes.
7. Existe-t-il des preuves psychométriques ? Des séries de tests montrent ceux des exercices qui révèlent, ou non, le même facteur sous-jacent.
8. Aptitude à être codé à l'aide d'un système symbolique. Des codes tels que le langage, l'arithmétique, les cartes et l'expression logique, entre autres, permettent de saisir des éléments essentiels de ces intelligences respectives.



## L'intelligence personnalisée

Certains individus présentent au plus haut point une forme particulière d'intelligence ; ils peuvent toutefois briller dans plusieurs catégories.

Les diverses cultures favorisent parfois le développement de certaines formes ; par exemple, les habitants de l'atoll Puluwat des

îles Caroline, dans le Pacifique Sud, développent une intelligence spatiale qui les rend excellents marins, tandis que les enfants Manus de Papouasie-Nouvelle-Guinée apprennent à canoter et à nager avec une habileté qui échappe à la plupart des enfants occidentaux amateurs de mer.

Georges Perec



Carl Friedrich Gauss



Pierre Boulez



Camille Claudel



### 1. INTELLIGENCE LINGUISTIQUE

Maîtrise et amour du langage et des mots, avec le désir d'en explorer les possibilités. Poètes, écrivains, linguistes : Charles Baudelaire, Noam Chomsky, Victor Hugo.

### 2. INTELLIGENCE MATHÉMATIQUE

Confrontation et évaluation d'objets et d'abstractions, et repérage de leurs relations et des principes sur lesquels ils reposent. Mathématiciens, savants, philosophes : Henri Poincaré, Albert Einstein, Marie Curie, Subrahmayan Chandrasekhar.

### 3. INTELLIGENCE MUSICALE

Compétence en matière de fréquence, de rythme et de timbre, non seulement dans la composition et l'exécution d'une œuvre, mais aussi dans l'écoute et le discernement. Peut être reliée à d'autres formes d'intelligence : linguistique ou spatiale. Compositeurs, chefs d'orchestre, musiciens : Ludwig van Beethoven, Leonard Bernstein, John Lennon.

### 4. INTELLIGENCE SPATIALE

Aptitude à percevoir avec précision le monde visible, à modifier et transformer les perceptions, et à recréer des expériences visuelles, même sans stimulus physiques. Architectes, sculpteurs, cartographes, navigateurs, joueurs d'échecs : Michel-Ange, Garry Kasparov, Gustave Eiffel.

Rudolf Nouriev



Françoise Dolto



Charles Darwin



Dalaï Lama



### 5. INTELLIGENCE EXPRESSION CORPORELLE

Contrôle et harmonisation des mouvements du corps et manipulation des objets. Danseurs, athlètes, acteurs : Marcel Marceau, Carolin Carlson, Michael Jordan.

### 6. et 7. INTELLIGENCES ÉMOTIONNELLES

Détermination précise de ses propres humeurs, sentiments et autres situations mentales (intrapersonnelle) et de ceux des autres (interpersonnelle), et utilisation de ces informations comme guide du comportement. Psychiatres, responsables religieux : Sigmund Freud, Mahatma Gandhi.

### 8. INTELLIGENCE NATURALISTE

Reconnaissance et classement des objets naturels. Biologistes, naturalistes : Linné, Jean Rostand, Jean-Henri Fabre, Georges Cuvier.

### 9. INTELLIGENCE EXISTENTIELLE

Comprendre les questions fondamentales de la vie et réfléchir sur elles. Son statut d'intelligence n'est pas complètement établi. Meneurs spirituels, philosophes : Aristote, Jean-Paul Sartre, Søren Kierkegaard.

Personnellement, je ne vois pas d'inconvénient à nommer talents de telles aptitudes, mais je réclame alors que le raisonnement logique et l'aisance linguistique soient nommés de même.

Certains ont critiqué le caractère empirique de la théorie des intelligences multiples, mais cette critique me semble paradoxale : l'expérience ne doit-elle pas être la base de la théorie scientifique ? Le nombre des formes d'intelligence, leur délimitation, leurs composantes doivent être analysés à la lumière des nouvelles découvertes. L'existence d'une intelligence naturaliste ne sera confirmée que si l'on prouve qu'une partie du lobe temporal se charge de reconnaître et de nommer les objets naturels, tandis qu'une autre partie est consacrée aux objets faits de main d'homme (l'intelligence naturaliste est aujourd'hui révélée par l'observation de personnes qui, à la suite de lésions cérébrales, restent capables de nommer des objets inanimés, alors qu'elles ont perdu la faculté d'identifier des objets vivants).

L'existence des formes d'intelligence émotionnelle résulte de recherches menées au cours des dix dernières années sur l'intelligence émotive et sur le développement, chez les enfants, d'une « théorie de l'esprit » : les enfants apprennent que les êtres humains ont des objectifs et agissent en fonction d'eux. Par ailleurs, Frances Rauscher et ses collègues de l'Université du Wisconsin ont exploré l'« effet Mozart », selon lequel des expériences musicales précoces renforcent les aptitudes spatiales ; ainsi les intelligences musicale et spatiale correspondraient à des aptitudes communes.

La théorie des intelligences multiples est corroborée par des études dans plusieurs disciplines. En neurosciences, on reconnaît la nature modulaire du cerveau ; la psychologie évolutionniste reconnaît que des aptitudes différentes ont évolué dans des environnements spécifiques, adaptant l'individu à son milieu. Les partisans du QI classique et de l'intelligence globale sont de plus en plus isolés.

Ainsi, si quelques psychologues doutent encore de la théorie des intelligences multiples, des éducateurs du monde entier l'ont adoptée. Ils observent en effet que la théorie des intelligences multiples décrit bien la diversité



## ONDES ET ONDELETTES

Barbara Burke Hubbard

PRÉFACÉ DE JEAN-PIERRE LÉVY

L'élaboration des ondelettes est une œuvre moderne. Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écluse une idée, et comment ils coopèrent. Voir bon de commande p. 194

POUR LA  
**SCIENCE**  
DIFFUSION BELIN

des formes d'intelligence des enfants, et qu'elle aide à imaginer des méthodes pour motiver les élèves et les étudiants. Aujourd'hui, des écoles, des classes, des programmes, des textes, des logiciels sont adaptés aux différentes formes d'intelligence. Dans l'ensemble, cette initiative a prouvé son succès : des étudiants ont retrouvé une vie intellectuelle motivante. Malheureusement, l'idée initiale a parfois été détournée : j'ai vu des matières enseignées de huit façons différentes, et j'ai vu des écoles qui recherchaient les formes de l'intelligence par des batteries de nouveaux tests.

La théorie des intelligences multiples est plutôt un outil qu'un objectif en soi. C'est seulement quand l'éducation s'est fixé des objectifs que la théorie aide à les atteindre. Je crois que des écoles devraient s'efforcer de développer des individus d'un certain type : ayant le sens civique, sensibilisés aux arts. Elles devraient aussi approfondir les matières essentielles pour que les étudiants terminent leurs études avec un bagage suffisant. Les premiers essais de programme et d'évaluation fondés sur la théorie des intelligences multiples, comme le *Projet Spectrum* de l'Université Tufts, se sont révélés très prometteurs. (Dans ce projet, une quinzaine d'activités sont proposées aux enfants, chacune orientée vers une forme d'intelligence particulière ou vers un ensemble de formes d'intelligence.)

## Le futur de l'intelligence multiple

Le débat lancinant sur l'existence d'une ou de plusieurs intelligences n'est pas près d'être clos ; il ne s'éclairera qu'à trois conditions. Tout d'abord, les psychologues devraient élargir leur vue de l'intelligence aux aptitudes humaines quantifiables, sans confondre l'intelligence avec d'autres qualités comme la créativité, la sagesse ou la moralité. L'élargissement de l'intelligence doit toutefois rester descriptif. J'admets la notion d'intelligence émotionnelle lorsqu'elle correspond à la capacité d'évaluer une information relative à sa propre vie émotionnelle ou à celle d'un autre. Ainsi, je suis d'accord avec Daniel Goleman, psychologue et reporter au *New York Times*, quand il signale l'importance

de l'empathie (la faculté de percevoir ce que ressent autrui) comme composant de l'intelligence émotionnelle, mais je ne le suis pas quand il met l'altruisme dans cette même catégorie : l'aptitude à déceler la souffrance d'autrui n'est pas équivalente à celle qui consiste à décider de lui venir en aide ; un individu sadique pourrait utiliser sa compréhension d'autrui pour faire souffrir.

Deuxièmement, la psychologie devra abandonner les tests classiques, où il s'agit de répondre rapidement à des questions, et revenir aux manifestations de la vie réelle, exploitables par des simulations. Au début du siècle, la psychologie a progressé en proposant des tests composés de questions simples (par exemple, répéter des nombres à l'envers), afin d'explorer les aptitudes ou des habitudes importantes. Aujourd'hui, les systèmes informatiques permettent de tester les individus dans des situations complexes, de voir comment ils raisonnent, discutent, analysent des données, critiquent des expériences, exécutent des travaux d'art, etc. Autant que possible, nous devrions entraîner les étudiants à ces activités valorisantes, et nous devrions estimer la qualité de leur exécution en conditions réelles.

Troisièmement, la notion d'intelligence multiple pourrait servir de base à une pédagogie et à une évaluation plus efficaces. J'apprécie peu les systèmes éducatifs qui consistent simplement à «entraîner» les intelligences ou à les utiliser de façon superficielle (par exemple, comme chanter les tables de multiplication ou écouter une cantate de Bach durant un travail de géométrie). Le pouvoir éducatif des intelligences multiples n'est réellement mis à profit que si les diverses aptitudes sont directement utilisées lors de l'apprentissage.

En pratique, comment s'y prendre ? Examinons trois exemples : la théorie de l'évolution (exemple de vérité scientifique), la musique de Mozart (exemple de beauté artistique) et l'holocauste (exemple d'immoralité dans l'histoire récente). Pour chaque exemple, on pourrait présenter le sujet aux étudiants de plusieurs façons, qui feraient appel à différentes formes d'intelligence ; on peut notamment rendre les thèmes enseignés plus fami-

liers à l'aide d'analogies et de métaphores tirées de domaines variés. Ainsi, les idées directrices du sujet peuvent être appréhendées non seulement à travers le langage symbolique classique, mais aussi à travers des représentations complémentaires.

La théorie de l'évolution, par exemple, peut faire l'objet d'une narration historique, d'une analyse logique, d'une analyse quantitative de la taille et de la dispersion de populations (biométrie), de regroupement des espèces ou, au sens dramatique, d'une lutte entre individus (ou de gènes, ou de populations), etc. Celui qui n'envisage l'évolution que d'une seule manière, en n'utilisant qu'une seule représentation, a une idée bien mince des concepts principaux de la théorie.

Pendant trop longtemps, la société a laissé l'intelligence aux mains des psychométriciens. Ces «fabricants de tests» ont souvent une vue trop étroite de l'intelligence. Ils se fient à une série d'instruments destinés à valoriser certaines aptitudes, tout en ignorant celles qui ne se prêtent pas aux évaluations formelles et quantitatives. Ceux d'entre eux qui ont un programme politique détournent souvent leurs résultats.

La théorie des intelligences multiples s'efforce d'avoir une meilleure idée de l'intelligence en se fondant sur une base scientifique plus large, qui offre aux éducateurs une palette d'outils permettant au plus grand nombre de maîtriser des disciplines autonomes de façon efficace. Bien appliquée, cette théorie aidera chaque individu à l'accomplissement de son potentiel humain, pour le service du plus grand nombre de personnes.

Howard GARDNER enseigne les sciences de l'éducation à l'Université Harvard.

Howard GARDNER, *Les intelligences multiples*, Metz, 1996.

Howard GARDNER, *L'intelligence et l'école*, Metz, 1996.

Howard GARDNER, M.L. KORNHABER et W.K. WAKE, *Intelligence : Multiple Perspectives*, Harcourt Brace College Publishers, 1996.

*The Rising Curve : Long-Term Gains in IQ and Related Measures*, sous la direction d'Ulric Neisser, American Psychological Association, 1998.



# Le facteur global d'intelligence

LINDA GOTTFREDSON

*Les tenants d'une possible mesure de l'intelligence sont voués aux gémonies. Pourtant, un facteur d'intelligence, appelé *g*, peut être mesuré et correspond au succès professionnel dans les sociétés industrialisées.*

Peu de sujets ont provoqué autant de débats que l'étude de l'intelligence humaine : le sujet est devenu tabou et il est politiquement correct de ne pas l'aborder, sinon pour affirmer que la mesure de l'intelligence est impossible. Dès leurs premiers balbutiements, les recherches sur le comment et le pourquoi des différences individuelles de capacité intellectuelle ont été interprétées, par les politiques et les sociologues, à contre-courant des acquis scientifiques. Aussi le public, préoccupé de la question de l'intelligence, n'a-t-il pas connaissance des résultats des recherches et voit avec étonnement les experts de la mesure du QI se faire laider.

Est-il possible et, si oui, utile, d'évaluer l'intelligence des individus ? Existe-t-il une capacité intellectuelle globale, que nous appelons communément « intelligence », et joue-t-elle un rôle dans la conduite de notre vie ? Nous affirmons sans ambages, après des dizaines d'années de recherches sur l'intelligence que la réponse est oui. Les tests d'aptitude intellectuelle montrent l'existence d'un facteur global qui infiltre tous les domaines de la connaissance et semble avoir un grand effet sur la destinée d'une personne. L'intelligence telle que la déterminent les tests de *Q*, est un élément prédictif fiable des performances individuelles scolaires ou professionnelles dans la société actuelle.

Si, pour la grande majorité des chercheurs, ces résultats sont acquis, ils sont dépréciés ou ignorés par l'intelligentsia. Ce rejet reflète une incompatibilité entre un idéal d'équité et une réalité injuste. L'idéalisme sous-tend la plupart des critiques des recherches sur l'intelligence : à leur point de vue, tous les individus naissent égaux, l'inégalité sociale

n'étant que la conséquence de privilèges induits. La réalité, c'est que l'humanité n'est pas équitable. Les individus ne sont pas égaux quant à leur potentiel intellectuel : ils sont nés ainsi, avec d'inégales qualités quant à la beauté physique, la sensibilité artistique, les possibilités sportives, et bien d'autres caractéristiques. L'expérience et l'éducation peuvent moduler ces potentialités, mais il n'existe aucune ingénierie sociale qui puisse niveler les différences de capacités intellectuelles entre individus.

Toutes sortes de talents et d'aptitudes intellectuelles, nombre d'aspects de la personnalité et du caractère modifient les chances de bonheur et de succès de l'individu dans la société telle qu'elle est. Sauf si l'on diminuait de façon autoritaire la liberté individuelle, il est avéré que des différences d'aptitude intellectuelle amènent des inégalités sociales. Dans les listes de préférences, les gens mettent l'intelligence en seconde position, juste derrière la santé. Aussi pensons-nous qu'il ne faut pas se cacher derrière son petit doigt et que seule une approche plus réaliste des différences intellectuelles entre individus permettrait à la société de mieux tenir compte de ces différences et de réduire, si cela est possible, les inégalités qu'elles engendrent.

## La détermination de *g*

Les études sur l'intelligence, qui datent d'un siècle, ont montré que tous les tests de capacité intellectuelle classaient les individus de la même manière. Bien que ces tests intellectuels soient souvent spécifiques et visent à mesurer, par exemple, l'aisance oratoire, l'habileté mathématique, la visualisation spatiale, la mémoire, les personnes qui réussissent bien dans une catégorie

de tests ont tendance à faire de même dans les autres, et celles qui réussissent mal échouent presque partout. Ce recouvrement, ou corrélation croisée, incite à penser que tous ces tests mesurent quelque élément global de capacité intellectuelle. Au cours des dernières décennies, les psychologues ont consacré beaucoup d'efforts à isoler ce facteur global, que nous désignons par la lettre *g*.

Ce facteur *g* est extrait à l'aide d'une technique d'analyse des données, dénommée analyse factorielle. Introduite à l'orée du siècle par le psychologue anglais Charles Spearman, l'analyse factorielle détermine le nombre minimal de paramètres nécessaires pour expliquer un ensemble de corrélations. Que ce paramètre, ou ce facteur soit unique n'est pas, comme d'aucuns le prétendent, le résultat obligé de l'analyse factorielle. Ainsi aucun facteur global ne ressort des tests de personnalité : l'analyse détermine au moins cinq facteurs (névrose, extraversion, conscience, amabilité et ouverture d'esprit), chacun se rapportant à différentes sous-catégories de tests. En revanche, comme Spearman l'a noté, un facteur global se dégage de l'analyse des tests de capacité intellectuelle ; ce résultat a été confirmé depuis, et la plupart des spécialistes utilisent aujourd'hui le facteur *g* pour mesurer l'intelligence.

Ce facteur global explique la plupart des différences entre les performances des individus lors des divers tests intellectuels, et cela quelle que soit l'aptitude spécifique qu'un test est censé mesurer, quelque soit l'objet du test (mots, nombres ou dessins) et quelle que soit la manière dont le test est effectué (oralement ou par écrit, individuellement ou en groupe). Les tests de capacité intellectuelle spécifique

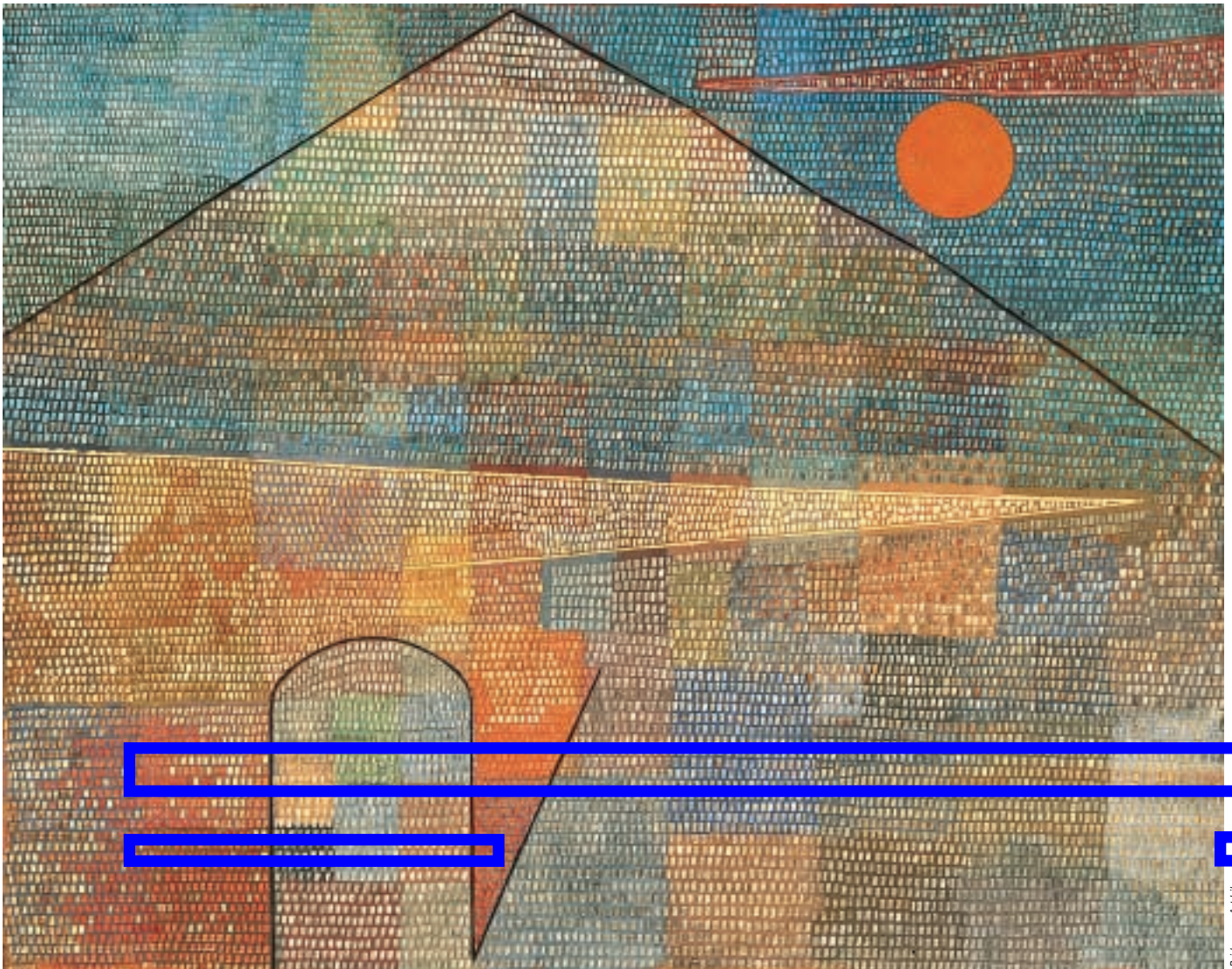
mesurent effectivement de telles aptitudes, mais tous, à des degrés variables, livrent une indication sur  $g$ . Aussi le facteur  $g$  peut-il être déterminé à partir d'un ensemble de tests.

Réciproquement, comme chaque test intellectuel est biaisé par des aptitudes intellectuelles spécifiques, aucun test ne permet à lui seul de mesurer  $g$ . Les résultats des mesures de  $QI$  – qui combinent en général une douzaine de séries de tests ayant trait à des compétences variées – sont entachés de biais qui reflètent le caractère limité des aptitudes testées. Toutefois, dans la plupart des cas, ces « impuretés » ne sont pas significatives :  $g$  et le  $QI$  peuvent être utilisés de façon interchangeable et les chercheurs peuvent, par des moyens statistiques, extraire  $g$  du  $QI$ .

Les tests d'aptitudes intellectuelles permettent non seulement de quantifier les différences entre individus, mais de mesurer les conséquences de l'intelligence dans la vie quotidienne. Certains tests mesurent  $g$  mieux que d'autres, car les résultats sont mieux corrélés avec les valeurs de  $g$  ; il semblerait qu'il « ingrédient actif » de ces tests qui implique la mise en œuvre de  $g$  et donc qui en permet la mesure, soit la complexité de la tâche à accomplir. Des tâches complexes requièrent une gymnastique mentale poussée, et ce traitement des informations – où l'individu distingue des similitudes ou des contradictions, tire des conclusions, manie de nouveaux concepts, etc. – traduit l'action de l'intelligence. L'intelligence serait une aptitude à affronter la complexité.

Cette description coïncide avec les perceptions de l'intelligence. Le facteur  $g$  est particulièrement important dans les comportements que l'on associe aux possibilités intellectuelles telles que raisonner, résoudre un problème, manipuler des abstractions, apprendre rapidement ;  $g$  décrit une aptitude intellectuelle plutôt qu'un savoir accumulé. Toutefois, l'assimilation d'informations nouvelles dépend de  $q$  : le facteur  $q$  est l'élément qui permet le mieux de distinguer les qualités intellectuelles.

Plusieurs décennies de recherche portant sur l'analyse factorielle des tests intellectuels ont montré l'existence d'une hiérarchie des capacités intellectuelles ;  $g$  serait au sommet de ce modèle, des aptitudes plus spécifiques occupant les niveaux inférieurs : la faci-



**1. LE MODÈLE HIÉRARCHIQUE DE L'INTELLIGENCE** ressemble à une pyramide où  $g$  serait au sommet, les autres aptitudes étant disposées aux niveaux inférieurs successifs selon leur spécificité. Le tableau évoquant cette hiérarchie est *AD PARNASSUM* de Paul Klee.

lité d'expression orale, le raisonnement mathématique, la visualisation spatiale, la mémoire sont situés juste au-dessous de *g*, puis, sous eux, se situent des aptitudes qui dépendent davantage des connaissances ou de l'expérience, par exemple les principes et les pratiques liés à une fonction ou à une profession particulières.

Quelques chercheurs utilisent le terme d'« intelligences multiples » pour désigner ces ensembles d'aptitudes plus spécialisés. Le psychologue Howard Gardner pense que huit formes d'intelligence relativement autonomes se manifestent dans différents domaines d'expertise. Il ne remet pas en cause l'existence de *g*, mais le considère comme un facteur spécifique de la réussite scolaire et académique. Paradoxalement, H. Gardner ne pense pas que des tests puissent mesurer les classes d'intelligence qu'il avance. Or, en l'absence de tests, personne ne peut savoir si ces intelligences sont vraiment indépendantes de *g* (ou les unes des autres). En outre, il se pourrait que les « intelligences » de Gardner évaluent les traits de la personnalité ou les aptitudes motrices plutôt que les capacités intellectuelles.

D'autres formes d'intelligence ont été proposées : parmi elles, la « sensibilité émotionnelle » et l'« intelligence pratique » sont peut-être les plus connues. Elles sont à notre avis, pour la première, un mélange d'intelligence et de personnalité et, pour la seconde, un mélange d'intelligence et d'expérience spécifique d'un métier ou d'un contexte social. L'intelligence pratique, par exemple l'« intelligence de la rue », semble être une connaissance bien délimitée et un savoir-faire développé lors de dures expériences personnelles et quotidiennes, l'école des coups durs, pourrait-on dire. Au contraire, l'intelligence globale n'est pas une forme de réussite, spécifique et rebaptisée ; le facteur *g* régule la vitesse d'assimilation des expériences et des connaissances sans s'identifier ni à l'une ni à l'autre.

Les détracteurs de la recherche sur l'intelligence viennent qu'on ne peut définir une « intelligence globale », qu'une telle capacité intellectuelle globale est une illusion et que cette intelligence apparente n'est qu'une conséquence des possibilités, plus ou moins grandes, qu'a pour un individu d'ac-

querir les compétences et des informations. Il est vrai que le concept d'intelligence et la manière dont les individus sont classés sur la base de ce critère pourraient être des artefacts sociaux ; toutefois, le fait que *g* ne soit pas spécifique d'un domaine de connaissances ou d'aptitude intellectuelle laisse entendre que *g* est indépendant du contexte culturel, y compris des opinions que l'on a sur la nature de l'intelligence. D'autre part, des tests effectués dans différents groupes sociaux mettent en évidence le même continuum d'intelligence globale. Cette observation conduit à affirmer, soit que les cultures ne construisent pas *g*, soit qu'elles construisent le même *g*. Ces deux conclusions annihilent l'une comme l'autre la théorie qui ferait de l'intelligence un artefact social.

## La biologie de *g*

Les recherches menées sur la physiologie et la génétique de *g* ont montré des correspondances biologiques du phénomène psychologique. Au cours des dix dernières années, des équipes de chercheurs ont établi une corrélation entre plusieurs caractéristiques du cerveau et l'intelligence globale. Le sexe et la taille de l'individu étant pris en compte, les dimensions du cerveau telles qu'elles sont déterminées par le procédé d'imagerie par résonance magnétique présentent une corrélation modérée avec le *QI* (d'environ 0,4 sur l'échelle allant de 0 à 1). La vitesse de propagation nerveuse présente la même corrélation. Le cerveau des personnes douées utilise également moins d'énergie lors de la résolution de problèmes que ne le fait celui de personnes moins brillantes. Et diverses qualités d'ondes cérébrales sont en corrélation forte (de 0,5 à 0,7 environ) avec le *QI* : les ondes cérébrales d'individus au *QI* élevé, par exemple, répondent plus rapidement et de façon plus pertinente à des stimulus sensoriels simples tels que des clics sonores. Ces observations ont conduit quelques chercheurs à postuler que les différences de *g* résulteraient de différences dans la vitesse et l'efficacité du traitement neuronal. Si cette hypothèse est exacte, les conditions de l'environnement pourraient alors avoir un effet sur *g* par l'intermédiaire d'une modification de la physiologie du cerveau.

Des études de tâches dites cognitives élémentaires, menées par Jensen et quelques autres, établissent le lien entre les aspects physiologiques et psychologiques de *g*. Ces opérations mentales ne sont pas de contenu intellectuel évident et sont tellement simples que les adultes et la plupart des enfants peuvent les exécuter correctement en moins d'une seconde. Par exemple, dans les tests de temps de réaction les plus élémentaires, le sujet doit réagir, lorsqu'une lumière s'allume, en soulevant son index d'un bouton d'« attente » et appuyer immédiatement sur un bouton « réponse ». Deux mesures sont effectuées : celle du nombre de millisecondes entre l'apparition de la lumière et le relâchement du bouton d'attente, qui est dénommé temps de décision, et celle du nombre de millisecondes entre le relâchement du bouton d'attente et l'enfoncement du bouton réponse, qui est appelé temps de réaction.

Le temps de réaction semble être indépendant de l'intelligence ; en revanche, les temps de décision de sujets au *QI* élevé sont légèrement plus courts que ceux d'individus au *QI* plus faible. Lorsque les tâches deviennent de plus en plus complexes, la corrélation entre les temps de décision moyens et le *QI* augmente. Ces résultats renforcent la thèse selon laquelle les individus sont dotés d'une intelligence pour faire face à la complexité, l'effet de cette intelligence étant alors plus important lorsque les tâches sont complexes que lorsqu'elles sont simples.

Les corrélations entre ces temps de décision et le *QI* sont comparables quels que soient les niveaux de *QI*, l'âge, le sexe ou le groupe ethnique. Des travaux dus à Philip Vernon, de l'Université de l'Ontario, et à d'autres chercheurs ont montré que ces corrélations sont, dans les deux mesures, presque entièrement dues au facteur *g* commun. Les temps de réaction ne reflètent pas des différences de motivation, de stratégie ou de tendance de certains individus à se précipiter sur des tests et des tâches journalières, se penchant est un trait de la personnalité. Les temps de réaction semblent plutôt mesurer la rapidité avec laquelle le cerveau prélève une information, l'intègre et l'évalue. Ces travaux n'ont pas encore permis d'identifier les facteurs biolo-

giques déterminant cette vitesse de traitement, mais sous-entendent cependant que *g* serait au niveau neuronal, un phénomène aussi sûr et aussi global qu'il l'est au niveau du traitement d'information complexe requis par les tests de *QI* et par la vie quotidienne.

L'existence d'éléments biologiques corrélés à l'intelligence ne signifie pas nécessairement que celle-ci est commandée par les gènes. Des décennies de recherche en génétique ont cependant montré que les individus naissent avec des patrimoines génétiques différents, ce qui explique la plupart des différences de capacité intellectuelle entre individus. Au printemps dernier, une équipe internationale de scientifiques dirigée par Robert Plomin, de l'Institut de psychiatrie de Londres, annonçait la découverte du premier gène lié à l'intelligence. Les effets liés à des gènes ne se produisent bien entendu qu'en combinaison avec des facteurs liés à l'environnement, notamment en renforçant la réceptivité d'une personne à des expériences formatrices. Qu'elles soient mesurées par le *QI* ou plus précisément par *g*, les différences d'intelligence globale ont une origine à la fois génétique et environnementale, comme tous les caractères et les comportements psychologiques, notamment la personnalité, les goûts professionnels et les attitudes sociales. Pour les spécialistes, il ne s'agit pas là de données nouvelles, mais ils ont été étonnés par des découvertes plus récentes.

L'une d'elles est l'accroissement de l'origine génétique du *QI* avec l'âge : les différences de *QI* entre individus sont plus marquées par l'hérédité quand les tests sont appliqués plus tard. Au cours des dix dernières années, des études comparatives entre vrais jumeaux, effectuées par une équipe dirigée par Thomas Bouchard, de l'Université du Minnesota, montrent qu'environ 40 pour cent des différences de *QI* entre jeunes écoliers proviennent de différences génétiques, mais que cette corrélation est de 60 pour cent pour des adolescents, et de 80 pour cent pour des adultes. Paradoxalement l'âge venant, les différences de développement de l'intelligence entre individus expriment de plus en plus leurs différences génétiques. Ce fait reste étonnant : les effets de l'environnement sur l'intelligence, au lieu d'augmenter avec le temps, s'atténuent.

Avec le recul de l'analyse, ce résultat ne constitue peut-être pas une surprise. Les circonstances de la vie des jeunes enfants leur sont imposées par leurs parents, leurs écoles et d'autres facteurs liés à la société, mais, en prenant de l'âge, les individus deviennent plus indépendants et ont tendance à rechercher les activités qui sont mieux accordées à leurs penchants génétiques.

Une autre surprise de taille est le constat selon lequel l'environnement, partagé par les enfants de mêmes parents, a peu de rapport avec leur *QI*. Beaucoup de gens croient encore que des différences sociales, psychologiques et économiques entre familles entraînent des différences de *QI* marquées et durables. Les généticiens du comportement qualifient de « partagés » de tels effets de l'environnement, parce qu'ils sont communs à des fratries où les enfants sont élevés ensemble. Les recherches ont montré qu'un environnement commun avait un effet modéré sur le *QI* pendant l'enfance, et que l'effet de cet environnement se dissipait lors de l'adolescence. Le *QI* d'enfants adoptés, par exemple, perd toute ressemblance avec celui des membres de leur famille adoptive et devient proche de celui de leurs parents biologiques, qu'ils n'ont jamais connus. Ces résultats suggèrent que des frères et sœurs, soit ne partagent pas les effets de leur environnement, soit ne le ressentent pas de la même manière, soit qu'ils s'opposent pour se différencier.

### Le facteur *g* au travail

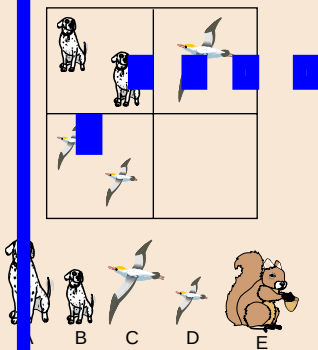
Bien que la preuve de corrélations génétiques et psychologiques plaide en faveur de l'existence d'une intelligence globale, elle n'a pas apaisé les critiques formulées à l'encontre des tests d'intelligence. Les sceptiques prétendent que, même si une telle entité globale existait, elle n'a pas de valeur fonctionnelle intrinsèque et ne devient importante que dans la mesure où les gens s'en servent comme telle, par exemple lorsqu'on tient compte du *QI* pour distinguer, sélectionner et affecter des étudiants ou des employés.

Des inquiétudes sur l'usage adéquat des tests d'intelligence ont inspiré nombre de controverses au cours des dernières décennies. Elles ont montré que, si les tests de *QI* peuvent être utilisés à mauvais escient pour affecter la fonction sociale, ils n'en mesurent pas moins une aptitude qui détermine la réussite sociale et professionnelle.

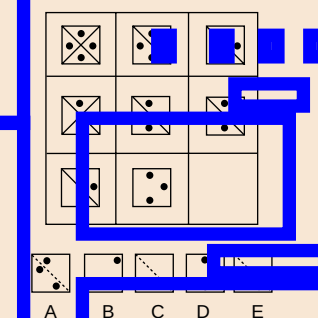
L'intelligence permettant de mieux affronter des situations complexes, elle a une grande importance fonctionnelle ou pratique. Par exemple, les enfants sont confrontés à des tâches complexes dès qu'ils vont à l'école. La scolarisation impose à tous les étu-

**RAISONNEMENTS MATRICIELS**

1



2



**SÉRIES**

3. 2, 4, 6, 8, ...

4. 3, 6, 12, 24, ...

5. 1, 4, 9, 16, 25, ...

6. 2, 3, 9, 18, ...

**ANALOGIES**

7. FRÈRE : SŒUR → PÈRE : ...

A. ENFANT B. MÈRE

C. COUSIN D. AMI

8. BLAQUE : HUMOUR → LOI : ...

A. AVOCAT B. CLÉMENCE

C. TRIBUNAUX D. JUSTICE

**Réponses :**

1. B 2. D 3. 10 4. 48 5. 36 6. 27 7. D 8. B

**2. CES ÉCHANTILLONS DE TESTS DE *QI*, ressemblant à ceux des tests habituels, impliquent que le candidat remplisse les espaces libres en se fondant sur le modèle fourni par les images, les nombres ou les mots. Comme ces tests peuvent être de complexité variable, des tâches de ce type sont utiles pour évaluer le niveau de *g*.**

dians d'apprendre, de résoudre des problèmes et de manipuler des concepts abstraits. Ce n'est donc pas une surprise que le QI soit un bon élément prédictif de la réussite scolaire. Lorsqu'on mesure, sur des sujets différents et sur plusieurs années, la moyenne des tests de QI et qu'on les compare à des critères de réussite, les deux moyennes sont aussi fortement corrélées que différents tests de QI effectués par le même individu. Des étudiants à fort QI maîtrisent plus vite les concepts que leurs congénères moins doués. Ainsi une étude menée en 1969 par l'armée américaine a montré que les recrues qui, dans le classement par ordre de capacité intellectuelle, sont dans le dernier cinquième ont besoin de deux à six fois plus d'essais et de conseils que leurs camarades de capacité intellectuelle plus élevée, pour atteindre une compétence minimale dans les

tâches militaires courantes. Dans les tâches scolaires, les lycéens « rapides » apprennent cinq fois plus vite que les « lents ».

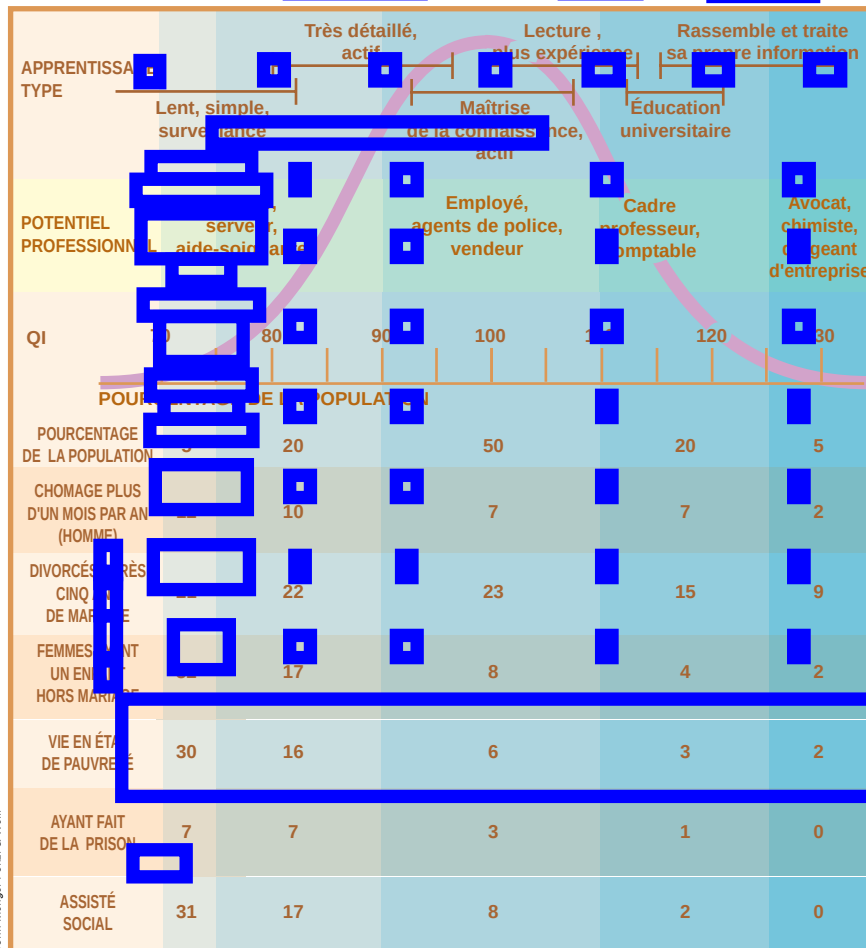
La très forte corrélation du QI avec le succès scolaire peut donner l'impression que *g* n'exprime qu'une capacité de type scolaire. Toutefois, cette capacité intellectuelle globale permet de prédire la performance professionnelle, et, lorsqu'il s'agit de fonctions professionnelles complexes, elle le fait mieux que n'importe quel autre trait de personnalité isolé, tel que l'éducation et l'expérience. Une étude a été menée par l'armée américaine pendant sept ans, vers les années 1980, dans le but d'améliorer l'entraînement et les méthodes d'apprentissage : elle a permis de constater que la capacité intellectuelle globale était fortement corrélée à la fois avec l'efficacité technique et avec la compétence militaire. Les études civiles concourent de même.

La corrélation entre tests intellectuels et réussite professionnelle est remarquable. Un demi-siècle de recherches ont donné un tableau des potentialités individuelles en fonction du QI (voir la figure 3). Les cinq pour cent d'individus adultes qui occupent la tranche supérieure (ceux qui ont un QI supérieur à 125) sont capables d'apprendre par eux-mêmes, et peu d'activités sont intellectuellement hors de leur portée. Les individus de QI moyen (entre 90 et 110) sont inaptes à un grand nombre de travaux professionnels et administratifs, mais peuvent facilement être formés à la plupart des métiers. En revanche, les cinq pour cent d'adultes qui occupent la tranche inférieure de la répartition des QI (au-dessous de 75) ne peuvent que très difficilement être formés et sont inaptes à des métiers nécessitant une certaine capacité intellectuelle. Les graves problèmes rencontrés durant la Seconde Guerre mondiale pour former les recrues militaires à faible QI ont conduit le Congrès américain à ne plus enrôler les dix pour cent de la population au QI le plus faible (au-dessous de 80).

L'importance de *g* dans les performances professionnelles ou scolaires dépend de la complexité des tâches à accomplir. De faibles différences de *g* auront un effet important, et même cumulatif, dans la vie sociale et économique. Comme l'a montré récemment Charles Murray, de l'*American Enterprise Institute* de Washington, D.C., les différences de QI sont presque aussi importantes pour des enfants d'une même famille (12) que pour les personnes sans lien de parenté (17).

Dans la vie moderne, le seuil de QI est de 85 : au-dessous, les chances d'une personne de maîtriser un cursus scolaire élémentaire ne sont que de 50 pour cent, et ce n'est qu'après une longue période qu'elle acquiert une indépendance d'action ne nécessitant plus d'assistance. Les individus à QI élevé peuvent manquer de détermination, de caractère ou de chance, mais leur succès économique est entre leurs mains.

Les découvertes précédentes sur les effets de *g* sont la conclusion d'études qui ont été menées dans un cadre restreint de circonstances, à savoir dans le contexte social, économique et politique



**3. LA CORRÉLATION** entre les résultats en matière de QI et la réussite dans les activités conduit à penser que *g* reflète une aptitude à affronter la complexité cognitive. Ces résultats sont aussi corrélés avec certaines réussites sociales (les pourcentages concernent la population des jeunes adultes blancs aux États-Unis).

## CAPACITÉS COGNITIVES DES JUMEAUX

Depuis Galton, fondateur de la génétique du comportement, de nombreux chercheurs ont tenté, sur des jumeaux vrais (homozygotes) et faux (hétérozygotes) de démêler les incidences de l'hérédité et du milieu sur l'intelligence. Deux études récentes ont été menées par Thomas Bouchard (L'étude de l'université du Minnesota sur des jumeaux élevés séparément, Bouchard et al, *Science*, vol. 250 12 oct. 1990) et Gerald McClearn (Sur les jumeaux suédois de plus de 80 ans, McClearn et al, *Science*, vol. 276 6 juin 1997).

À l'étonnement des scientifiques, les ressemblances des capacités cognitives étaient fortes pour les vrais jumeaux élevés séparément, bien supérieures à celles d'individus élevés dans la même famille, mais sans relation de parenté.

Les variations d'un paramètre comme le QI sont mesurés par la variance (la largeur à mi-hauteur) de la courbe en cloche de répartition des valeurs du paramètre. D'après l'étude sur les jumeaux suédois, 62 pour cent de la variance de la capacité cognitive est d'origine génétique, 32 pour cent de la capacité de verbalisation, 62 pour cent de la vitesse de traitement des données, et 52 pour cent de la faculté de mémorisation. L'effet du milieu dans les capacités cognitives est limité à 40 pour cent.

L'observation d'autres coïncidences, traits de caractère, similitudes de noms ou de situations sociales est plus illusoire car parmi un grand ensemble de caractéristiques possibles l'observation de similitudes est inévitable. Il reste curieux mais non significatif de remarquer que deux jumeaux qui avaient été adoptés par des familles différentes s'étaient tous deux mariés deux fois, la première fois avec une femme nommée Linda, la seconde fois à un femme prénommée Betty.

qui prévaut maintenant et depuis quelques dizaines d'années dans les pays développés. Il n'est pas vraiment certain que ces résultats puissent s'appliquer aux populations du monde entier, aux personnes très privilégiées et très défavorisées des pays en voie de développement, aux peuples vivant sous la férule de régimes politiques très contraignants ou à des populations où les techniques de survie sont très différentes.

Nous concluons que, dans les civilisations où règnent la liberté et où les techniques sont en perpétuel développement, la vie est un rude combat pour les individus qui, pour apprendre, résoudre les problèmes et maîtriser la complexité, sont d'une compétence au-dessous de la moyenne. Nous savons aussi qu'il n'est pas facile de modifier l'évolution du développement intellectuel. Les niveaux de QI individuels ont tendance à rester immuables après l'adolescence, et, malgré les efforts acharnés déployés au cours des 50 dernières années, les tentatives éducatives pour augmenter *g* de façon durable et substantielle ont échoué.

Quelques chercheurs ont pensé que des régimes renforcés en vitamines pourraient être plus efficaces que les moyens éducatifs pour augmenter les niveaux de *g*. Cette approche repose sur l'hypothèse qu'une nutrition améliorée est à l'origine de l'étonnant

accroissement des niveaux moyens de QI et de la taille dans le monde développé tout au long de ce siècle. Les scientifiques s'interrogent pour savoir si les progrès des QI reflètent réellement une augmentation de *g* ou s'ils sont dus à des changements de compétences intellectuelles spécifiques moins critiques. Où que soit la vérité, les différences de capacité intellectuelle entre individus n'en demeurent pas moins, et le conflit entre l'égalité souhaitable des chances et l'inégalité réelle des réussites subsiste. Ce n'est qu'en se résignant à ces deux vérités que la société saura trouver des solutions humaines aux problèmes soulevés par les différences de capacité intellectuelle globale.

Linda GOTTFREDSON est professeur en science de l'éducation à l'Université de Delaware.

*Intelligence and Social Policy*, numéro spécial d'*Intelligence*, sous la direction de Linda S. Gottfredson, vol. 24, n° 1, janvier-février 1997.

Charles MURRAY, *IQ and Economic Success*, in *Public Interest*, n° 28, pp. 21-35, été 1997.

Arthur R. JENSEN, *The g Factor : The Science of Mental Ability*, Praeger, 1998.

Christopher F. CHABRIS, *IQ Since «The Bell Curve»*, in *Commentary*, vol. 106, n° 2, pp. 33-40, août 1998.

## L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

### LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



## LES ÉTOILES

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

272 pages - 220 F  
cod 1892

POUR LA  
**SCIENCE**  
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.194



# Les tests d'intelligence sont-ils intelligents?

ROBERT STERNBERG

*Les tests d'intelligence classiques ne mesurent pas les aptitudes essentielles au succès universitaire et professionnel.*

Les adolescents américains travaillent plus de 5 000 heures au lycée et plusieurs milliers d'autres à la bibliothèque ou à la maison. Cependant, leur destin universitaire dépend essentiellement des trois heures qu'ils consacrent au test d'aptitudes scolaire (SAT) ou au test universitaire américain (ACT). Quatre années plus tard, les candidats à un troisième cycle passeront de nouveaux tests. Pourquoi la sélection par ces tests est-elle si prépondérante aux États-Unis?

En 1994, dans leur ouvrage *The Bell Curve*, Richard Herrnstein et Charles Murray évoquaient la corrélation qui lie les scores à ce type de tests et toute une série de mesures du succès. Selon eux, la population des États-Unis est naturellement divisée en deux : une « élite cognitive », composée de personnes à fortes capacités destinées aux emplois prestigieux et lucratifs, et une population plus grande occupant des emplois sans évolution et mal rémunérés.

Cette dichotomie est peut-être plus culturelle que naturelle : les sociétés utilisent des critères variés, tels que l'origine sociale, la tendance politique, les convictions religieuses – et même la stature –, pour décider de l'accès à la réussite. Pour-

quoi certains pays utilisent-ils les résultats aux tests d'aptitude ? Ces mesures méritent-elles d'être utilisées ? L'histoire des tests d'intelligence éclaire cet épineux débat.

## L'histoire des tests

Francis Galton, un cousin de Charles Darwin, est un des premiers qui vou-

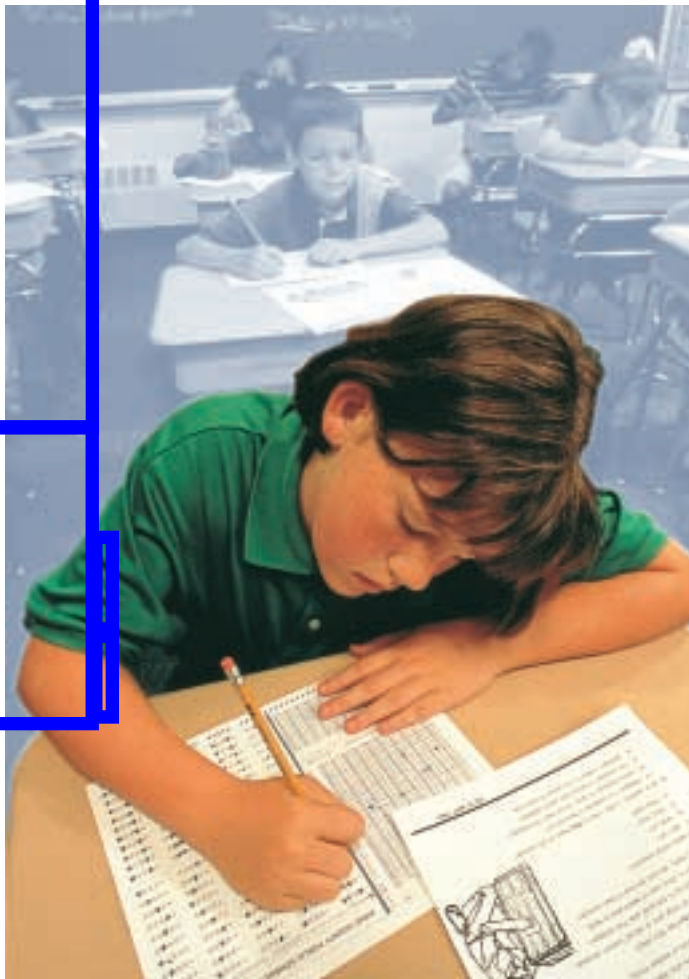
lurent mesurer l'intelligence de manière scientifique. Entre 1884 et 1890, au Musée de South Kensington, à Londres (voir les figures 1 et 3), Galton proposait une évaluation de l'intelligence contre une somme modique, mais les tests choisis étaient inappropriés. Par exemple, il utilisait un sifflet de son invention pour déterminer le son le plus aigu qu'une personne pouvait per-

cevoir. Dans un autre test, il demandait de soupeser des cartouches emplies de plomb, de laine ou de bourre et d'indiquer lesquelles étaient les plus lourdes. Un autre test mesurait la sensibilité à l'odeur des roses.

En 1890, impressionné par les travaux de Galton, le psychologue James McKeen Cattell, de l'Université Columbia, conçut et utilisa des tests similaires, que l'un de ses étudiants, Clark Wissler, décida d'éprouver : les scores n'étaient corrélés ni entre eux ni avec les notes obtenues à l'Université. Ainsi déclarés sans utilité, les tests de Galton furent abandonnés.

Puis, en 1905, les Français Alfred Binet et Théodore Simon concurent un test d'intelligence qui éva-

luait des capacités telles que le vocabulaire, la compréhension et les relations verbales. Les tests de jugement de Binet ont si efficacement prédit les per-



Charles Galton, The Stock Market

performances scolaires que l'une de leurs variantes, l'échelle d'intelligence de Stanford-Binet, reste utilisée aujourd'hui. Un test concurrent, celui de Wechsler, mesure les mêmes aptitudes.

Mandaté par le ministère de l'Instruction publique, Binet s'intéressait à la performance scolaire et cherchait à différencier les enfants réellement arriérés mentaux de ceux qui présentaient des troubles du comportement. Aujourd'hui, ses tests servent encore à prédire les performances scolaires.

Les tests d'intelligence ont pris de l'importance au cours de la Première Guerre mondiale : les psychologues militaires ont créé une méthode de différenciation des soldats fondée sur les tests Alpha (par exemple, quand deux mots sont présentés, dire s'ils sont synonymes ou contraires) et les tests Bêta (par exemple, compléter le dessin d'une main à quatre doigts).

En 1926, Carl Brigham, de l'Université de Princeton, a conçu un test verbal et mathématique, précurseur du test d'aptitudes scolaires actuel.

D'autres tests, dont le QI (quotient intellectuel), l'« aptitude scolaire », l'« aptitude académique », etc., ont été créés peu après. Malgré leurs différences, ces tests sont fortement corrélés. Dans cet article, nous les désignerons globalement sous le terme de tests d'intelligence classiques.

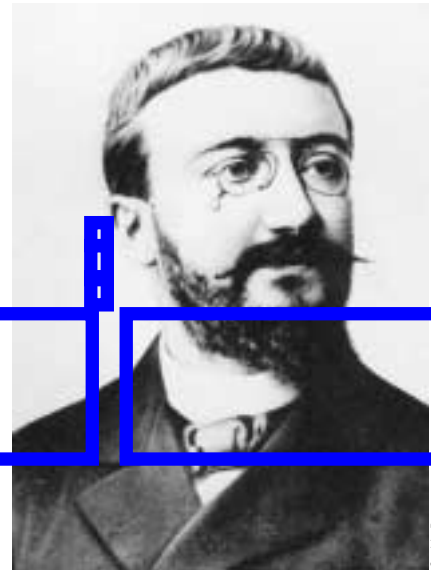
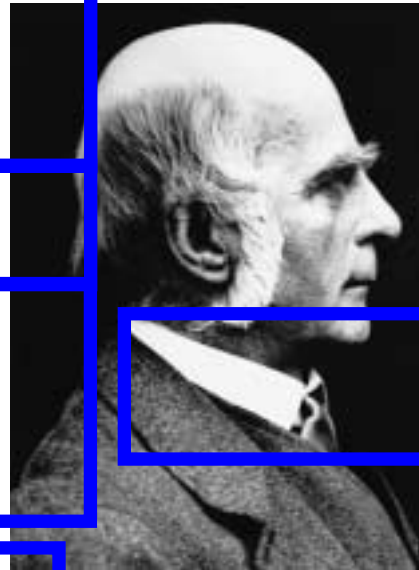
## Ce que prédisent les tests

Les corrélations entre les tests d'intelligence classiques et les notes scolaires sont généralement comprises entre 0,4 et 0,6. Ces valeurs indiquent une bonne correspondance entre les résultats aux tests et les résultats scolaires. Elle est comprise entre 0 (pas de correspondance du tout) et 1 (correspondance parfaite). Ainsi, une corrélation égale à 0,5, en moyenne, est statistiquement significative, mais ces tests ne rendent compte que de 25 pour cent de la variabilité des notes scolaires. La variabilité, ou variance, est égale au carré de la corrélation exprimée en pour cent ( $0,5^2 = 0,25$ , soit 25 pour cent). Un test d'intelligence qui prédit les performances avec une corrélation de 0,5 laisse inexpliqués 75 pour cent de la variation des notes scolaires. Selon de nombreux psychologues, la faible corrélation entre les

tests et les résultats scolaires est la preuve que les performances scolaires dépendent aussi, et pour une grande part, d'autre chose que de la capacité à passer les tests de QI.

La validité des prédictions des tests diminue chez les sujets plus âgés. Les corrélations des résultats de tests

avec les performances professionnelles ou avec le salaire sont inférieures à 0,3 : les tests n'expliquent que dix pour cent environ ( $0,3^2 = 0,09$ ) de la variation entre les individus ; 90 pour cent restent inexpliqués. La fiabilité des tests de QI s'amenuise encore lorsque les populations, les situations ou les tâches



1. FRANCIS GALTON fut un des premiers à vouloir mesurer scientifiquement l'intelligence. Ses tests, tels que l'identification du son d'un sifflet ou le soupèsement de cartouches de fusil emplies de divers matériaux apparaissent aujourd'hui insolites.

2. ALFRED BINET a élaboré les tests d'évaluation qui sont les ancêtres des tests modernes de QI. Par ses questions qui sondaient le vocabulaire, la compréhension et les aptitudes verbales, il voulait prédire les performances scolaires.



3. LE MUSÉE de South Kensington, à Londres, où Galton a effectué ses tests d'intelligence entre 1884 et 1890.

changent. Par exemple, à l'Université de Washington, Fred Fiedler a montré que les résultats aux tests de QI sont corrélés aux capacités à diriger, mais seulement dans des conditions de stress faible. La prédiction peut-elle être améliorée?

## Améliorer la prédiction

Alors que nombre de techniques ont considérablement progressé – pensons à l'informatique –, les tests d'intelligence diffèrent peu de ceux qui étaient utilisés au début du siècle. Dès 1966, le psychologue Edwin Ghiselli déplorait que la prédictivité des tests d'intelligence ne soit si peu améliorée. Plus de 30 ans plus tard, la situation est inchangée.

Avec Michael Ferrari, Pamela Clinkenbeard et Elena Grigorenko, j'ai tenté d'améliorer les prévisions. Nous avons montré qu'un test qui en plus

des critères classiques de mémoire et d'aptitudes analytiques, évaluait la créativité et le sens pratique, prédisait mieux les résultats scolaires des étudiants.

Dans ces tests, les sujets devaient résoudre des problèmes mathématiques à l'aide d'opérateurs originaux (par exemple,  $X \text{ glick } Y = X + Y$  si  $X < Y$ , et  $X - Y$  si  $X \geq Y$ ) qui nécessitent de la souplesse intellectuelle. Ils devaient également planifier des itinéraires à l'aide de cartes et résoudre des problèmes relatifs à des situations personnelles difficiles.

Avec Todd Lubart, de l'Université René Descartes, nous avons notamment demandé à des sujets d'effectuer plusieurs tâches créatives. Ils devaient écrire des histoires courtes à partir de titres étranges (*Les tennis de la pieuvre* ou *3073...*), réaliser des dessins (l'été vu par les yeux d'un insecte, la fin du temps...), proposer des publicités

passionnantes pour des produits variés (des nouilles papillons, des poignées de porte...) et résoudre des problèmes pseudo-scientifiques (comment identifier un extraterrestre qui se cache-rait parmi nous?). Les résultats ont montré que les personnes qui sont créatives dans un secteur ne le sont pas nécessairement dans un autre et que leurs performances ne sont que faiblement corrélées aux mesures classiques de QI.

Ces tests ont été utilisés en milieu scolaire. Les étudiants à qui l'on a enseigné à bien utiliser leurs aptitudes ont, à ces tests, des résultats supérieurs à ceux d'étudiants éduqués de manière classique, avec l'accent mis sur la mémorisation. Bruce Torff, E. Grigorenko et moi avons montré qu'en moyenne la performance des étudiants s'améliore lorsqu'ils apprennent à penser de manière analytique, créative et pratique, même

1. Le chiffre de chaque cercle est obtenu à partir des chiffres des cases précédentes. Pour chaque série, complétez, à partir des deux exemples, les opérations mathématiques utilisées (une seule par ligne) et calculez le chiffre du dernier cercle.

A.

|    |    |     |    |     |
|----|----|-----|----|-----|
| 1  | 5  | 7   | 2  | 2   |
| 2  | 4  | 6   | 3  | 4   |
| 3  | 6  | 9   | 4  | 8   |
| 4  | 8  | 12  | 5  | 10  |
| 5  | 10 | 15  | 6  | 12  |
| 6  | 12 | 18  | 7  | 14  |
| 7  | 14 | 21  | 8  | 16  |
| 8  | 16 | 24  | 9  | 18  |
| 9  | 18 | 27  | 10 | 20  |
| 10 | 20 | 30  | 11 | 22  |
| 11 | 22 | 33  | 12 | 24  |
| 12 | 24 | 36  | 13 | 26  |
| 13 | 26 | 39  | 14 | 28  |
| 14 | 28 | 42  | 15 | 30  |
| 15 | 30 | 45  | 16 | 32  |
| 16 | 32 | 48  | 17 | 34  |
| 17 | 34 | 51  | 18 | 36  |
| 18 | 36 | 54  | 19 | 38  |
| 19 | 38 | 57  | 20 | 40  |
| 20 | 40 | 60  | 21 | 42  |
| 21 | 42 | 63  | 22 | 44  |
| 22 | 44 | 66  | 23 | 46  |
| 23 | 46 | 69  | 24 | 48  |
| 24 | 48 | 72  | 25 | 50  |
| 25 | 50 | 75  | 26 | 52  |
| 26 | 52 | 78  | 27 | 54  |
| 27 | 54 | 81  | 28 | 56  |
| 28 | 56 | 84  | 29 | 58  |
| 29 | 58 | 87  | 30 | 60  |
| 30 | 60 | 90  | 31 | 62  |
| 31 | 62 | 93  | 32 | 64  |
| 32 | 64 | 96  | 33 | 66  |
| 33 | 66 | 99  | 34 | 68  |
| 34 | 68 | 102 | 35 | 70  |
| 35 | 70 | 105 | 36 | 72  |
| 36 | 72 | 108 | 37 | 74  |
| 37 | 74 | 111 | 38 | 76  |
| 38 | 76 | 114 | 39 | 78  |
| 39 | 78 | 117 | 40 | 80  |
| 40 | 80 | 120 | 41 | 82  |
| 41 | 82 | 123 | 42 | 84  |
| 42 | 84 | 126 | 43 | 86  |
| 43 | 86 | 129 | 44 | 88  |
| 44 | 88 | 132 | 45 | 90  |
| 45 | 90 | 135 | 46 | 92  |
| 46 | 92 | 138 | 47 | 94  |
| 47 | 94 | 141 | 48 | 96  |
| 48 | 96 | 144 | 49 | 98  |
| 49 | 98 | 147 | 50 | 100 |

B.

|    |    |     |    |    |    |    |    |  |
|----|----|-----|----|----|----|----|----|--|
| 3  | 4  | 6   | 6  | 5  | 10 | 2  | 3  |  |
| 2  | 2  | 4   | 3  | 3  | 6  | 2  | 2  |  |
| 3  | 3  | 6   | 2  | 2  | 4  | 3  | 3  |  |
| 4  | 4  | 8   | 3  | 3  | 6  | 2  | 2  |  |
| 5  | 5  | 10  | 4  | 4  | 8  | 3  | 3  |  |
| 6  | 6  | 12  | 5  | 5  | 10 | 4  | 4  |  |
| 7  | 7  | 14  | 6  | 6  | 12 | 5  | 5  |  |
| 8  | 8  | 16  | 7  | 7  | 14 | 6  | 6  |  |
| 9  | 9  | 18  | 8  | 8  | 16 | 7  | 7  |  |
| 10 | 10 | 20  | 9  | 9  | 18 | 8  | 8  |  |
| 11 | 11 | 22  | 10 | 10 | 20 | 9  | 9  |  |
| 12 | 12 | 24  | 11 | 11 | 22 | 10 | 10 |  |
| 13 | 13 | 26  | 12 | 12 | 24 | 11 | 11 |  |
| 14 | 14 | 28  | 13 | 13 | 26 | 12 | 12 |  |
| 15 | 15 | 30  | 14 | 14 | 28 | 13 | 13 |  |
| 16 | 16 | 32  | 15 | 15 | 30 | 14 | 14 |  |
| 17 | 17 | 34  | 16 | 16 | 32 | 15 | 15 |  |
| 18 | 18 | 36  | 17 | 17 | 34 | 16 | 16 |  |
| 19 | 19 | 38  | 18 | 18 | 36 | 17 | 17 |  |
| 20 | 20 | 40  | 19 | 19 | 38 | 18 | 18 |  |
| 21 | 21 | 42  | 20 | 20 | 40 | 19 | 19 |  |
| 22 | 22 | 44  | 21 | 21 | 42 | 20 | 20 |  |
| 23 | 23 | 46  | 22 | 22 | 44 | 21 | 21 |  |
| 24 | 24 | 48  | 23 | 23 | 46 | 22 | 22 |  |
| 25 | 25 | 50  | 24 | 24 | 48 | 23 | 23 |  |
| 26 | 26 | 52  | 25 | 25 | 50 | 24 | 24 |  |
| 27 | 27 | 54  | 26 | 26 | 52 | 25 | 25 |  |
| 28 | 28 | 56  | 27 | 27 | 54 | 26 | 26 |  |
| 29 | 29 | 58  | 28 | 28 | 56 | 27 | 27 |  |
| 30 | 30 | 60  | 29 | 29 | 58 | 28 | 28 |  |
| 31 | 31 | 62  | 30 | 30 | 60 | 29 | 29 |  |
| 32 | 32 | 64  | 31 | 31 | 62 | 30 | 30 |  |
| 33 | 33 | 66  | 32 | 32 | 64 | 31 | 31 |  |
| 34 | 34 | 68  | 33 | 33 | 66 | 32 | 32 |  |
| 35 | 35 | 70  | 34 | 34 | 68 | 33 | 33 |  |
| 36 | 36 | 72  | 35 | 35 | 70 | 34 | 34 |  |
| 37 | 37 | 74  | 36 | 36 | 72 | 35 | 35 |  |
| 38 | 38 | 76  | 37 | 37 | 74 | 36 | 36 |  |
| 39 | 39 | 78  | 38 | 38 | 76 | 37 | 37 |  |
| 40 | 40 | 80  | 39 | 39 | 78 | 38 | 38 |  |
| 41 | 41 | 82  | 40 | 40 | 80 | 39 | 39 |  |
| 42 | 42 | 84  | 41 | 41 | 82 | 40 | 40 |  |
| 43 | 43 | 86  | 42 | 42 | 84 | 41 | 41 |  |
| 44 | 44 | 88  | 43 | 43 | 86 | 42 | 42 |  |
| 45 | 45 | 90  | 44 | 44 | 88 | 43 | 43 |  |
| 46 | 46 | 92  | 45 | 45 | 90 | 44 | 44 |  |
| 47 | 47 | 94  | 46 | 46 | 92 | 45 | 45 |  |
| 48 | 48 | 96  | 47 | 47 | 94 | 46 | 46 |  |
| 49 | 49 | 98  | 48 | 48 | 96 | 47 | 47 |  |
| 50 | 50 | 100 | 49 | 49 | 98 | 48 | 48 |  |

3. Soulignez les formes analogues

Exemple : A est à B ce que C est à D

A.  est à  ce que  est à :  A  B  C

B.  est à  ce que  est à :  A  B  C  D  E

2. Soulignez la paire de figures qui représente les images de la même forme dans un miroir.

Exemple :    

A.    

B.    

4. Terminez chaque phrase par une comparaison similaire en utilisant deux des mots entre parenthèses.

- A. Un chien est à un chiot ce que... (cochon, chat, chaton)
- B. Un cercle est à une sphère ce que... (un angle, carré, solide, cube).

5. Trouvez les deux intrus de chaque série.

- A. Requin, phoque, morue, baleine, fletan.
- B. Sarge, papier feutre, tissu, papier d'aluminium.
- C. Épée, flèche, poignard, balle, club de golf.

utilisés à la main).

**Réponses :** 1A : 5 ; 1B : 3 ; 2A : A et C ; 2B : B et D ; 3A : B ; 3B : A ; 3C : A et C ; 4A : chat et chaton ; 4B : phoque, baleine (ce ne sont pas des poissons) ; 5B : papier, papier d'aluminium (ils ne sont pas faits de fibres compressées) ; 5C : flèche, balle (ils ne sont pas utilisés à la main).

LES TESTS DE QI et d'autres tests standardisés prétendent analyser les capacités de calcul, de raisonnement mathématique, de visualisation spatiale et d'association verbale.

titude des classiques (mnésiques et analytiques) sont essentiellement blancs, issus des classes sociales favorisées et scolarisés dans de «bonnes» écoles. Cependant, les étudiants qui obtiennent les meilleurs scores pour les aptitudes créatives et pratiques ont des profils plus variés. Ainsi les différences d'«intelligence» selon les groupes résulteraient d'un trop petit nombre d'aptitudes évaluées par ces tests et aussi de l'inadéquation de ces tests à certains environnements culturels.

## Une question de culture

rick Okatcha et Don Bundy, avons conçu un test spécialement adapté aux enfants kenyans des zones rurales.

**D**es tests d'intelligence pratique fondés sur la résolution de problèmes de la vie quotidienne prétendent prévoir la performance professionnelle. Cependant, les résultats à ces tests ne sont pas corrélés aux tests de QI, qui prétendent également prévoir la réussite des individus.

«Un employé dépendant de l'un de vos quatre subordonnés directs a demandé à vous parler du gaspillage, de la médiocrité de l'orga[ne] [saut], et des violations des règles de la compagnie et de la loi dont ce subordonné serait l'auteur. Vous n'occupez votre poste que depuis un an, mais vous n'avez jamais eu à vous occuper du subordonné accusé. Votre organisation, comme celle de votre entreprise, est très hiérarchisée, si bien que les employés doivent se référer à leur supérieur immédiat avant de s'en remettre à quelqu'un d'autre. Étant donné la nature délicate de sa démarche, l'employé qui souhaite vous rencontrer n'a pas discuté du sujet avec son supérieur direct.»

1. Refuser de rencontrer l'employé, sauf si il commence par discuter du problème avec votre subordonné.
2. Rencontrer l'employé, mais seulement en présence de votre subordonné.
3. Prévoir une réunion avec l'employé, puis une autre avec le subordonné pour connaître les deux versions de l'histoire.
4. Rencontrer l'employé, mais s'enquêter sur les accusations, avant de parler à votre subordonné.
5. Faire une enquête sur l'employé, si possible, avant de prendre une décision.
6. Refuser de rencontrer l'employé et informer votre subordonné que l'employé a essayé de vous contourner hiérarchiquement.
7. Rencontrer votre subordonné d'abord, avant de décider si vous allez recevoir l'employé.
8. Attribuer un blâme à l'employé pour avoir ignoré la hiérarchie.
9. Demander à un collègue plus ancien dont vous respectez le jugement ce qu'il ferait dans cette situation.
10. Transmettre le problème à un assistant.

Ils devaient exécuter une tâche adaptative jugée intelligente dans leur propre culture : décider à bon escient de l'usage des plantes médicinales (les enfants des villages connaissent un grand nombre de ces plantes et ils les utilisent en moyenne une fois par semaine). Ils ont aussi passé des tests d'intelligence classiques.

Les enfants qui obtenaient les meilleures performances aux tests adaptés avaient les pires résultats aux tests occidentaux, et inversement. Cet effet est-il dû à l'éducation, qui transmet soit une culture africaine, soit une culture occidentale, mais jamais une double culture ?

Cette question est complexe, parce que l'on sait que des personnes de cultures différentes interprètent parfois différemment les questions des tests. En 1971, Michael Cole et ses collègues de l'Université de San Diego ont étudié les Kpellés, un peuple d'Afrique de l'Ouest (Liberia et Guinée) : les solutions jugées intelligentes par les Kpellés semblaient stupides à des Occidentaux, et inversement. Par exemple, les Kpellés regroupent des mots de manière fonctionnelle (par exemple, «pomme» avec «mange», alors que les Occidentaux les traitent par catégorie («pomme» avec «orange», le tout dans la catégorie des «fruits»).

Au sein de leurs familles ou à l'école, les Occidentaux apprennent à classer des objets par catégories, tandis que les Kpellés classent selon l'utilisation quotidienne : c'est sans doute un tour d'esprit plus «naturel». Les êtres humains à qui l'on présente une pomme la mangeront plus volontiers qu'ils ne la classeront de façon abstraite.

Aujourd'hui, les tests classiques de QI mis au point en Occident sont traduits dans toutes les langues et utilisés dans le monde entier, mais ils n'ont pas un sens dans toutes les cultures.

## Vers un meilleur test

Pourquoi utilise-t-on encore les tests classiques ? Pourquoi leur attribue-t-on encore une pertinence ? Tout



**4. L'INTELLIGENCE DES KPELLÉS d'Afrique de l'Ouest (Liberia et Guinée) est mal évaluée par des tests de QI occidentaux. Les Kpellés classent les objets selon leur fonction – «pomme» avec «manger» –, tandis que les tests occidentaux utilisent une classification par catégorie – «pomme» avec «orange».**

d'abord, la quantification précise que donnent ces tests semble leur conférer de la valeur. D'autre part, les personnes qui s'enorgueillissent d'une aptitude, par exemple celle d'avoir un QI élevé, déclarent intelligents les individus qui leur ressemblent. Aux États-Unis, ceux qui sont sélectionnés par des tests de QI ont du pouvoir et pérennisent un système auquel ils doivent leur réussite.

Enfin, les institutions sont responsables de l'utilisation de ces tests : quand ils sont inscrits dans un règlement

qu'un jour d'admission ne doit pas accepter que les étudiants dont les résultats aux tests sont supérieurs à un certain niveau et refuser les autres parce qu'ils seraient promis à l'échec, l'institution ne peut plus vérifier si certains candidats ainsi recalés sont susceptibles de réussir.

Les défauts des tests classiques ont poussé certains éducateurs à réclamer leur suppression. On pense que ce serait une erreur : sans ces tests, on risque de sélectionner sur des critères inadéquats tels que les idées politiques ou le statut socio-économique ou la beauté. Les sociétés utilisent les tests pour augmenter, et non pour diminuer, l'équité des sélections.

D'autres pensent que seules les mesures fondées sur les performances effectuées sont pertinentes. Ces mesures, en dépit de

leur attrait intuitif, ne sont pas moins culturellement inadéquates que les tests classiques et posent, par ailleurs, des problèmes de fiabilité et de validité statistiques encore irrésolus.

Ne vaudrait-il pas mieux compléter les tests classiques par d'autres tests qui pallieraient les défauts des premiers ?

Aux États-Unis, la majorité des tests utilisés sont classiques, et ils sont élaborés par un petit nombre de sociétés en position de monopole. Les psychologues devraient s'unir pour obliger ces entreprises à modifier leur démarche. Les innovations devraient porter non seulement sur les supports des tests (comme les logiciels informatiques), mais surtout sur leur contenu. Si l'on ne peut pas éviter la sélection par les tests, autant utiliser des tests plus intelligents.

Robert J. STERNBERG est professeur de psychologie et d'éducation à l'Université Yale.

Robert J. STERNBERG, *Beyond IQ: A Triarchic Theory of Human Intelligence*, Cambridge University Press, 1985.

R.J. STERNBERG, *Metaphors of Mind: Conceptions of the Nature of Intelligence*, Cambridge University Press, 1990.

*Encyclopedia of Human Intelligence*, sous la direction de R.J. Sternberg, Macmillan, 1994.

Stephen J. CECI, *On Intelligence: A Bioecological Treatise on Intellectual Development*, Harvard University Press, 1990.

*Intelligence, Heredity and Environment*, sous la direction de Robert J. Sternberg et Elena L. Grigorenko, Cambridge University Press, 1997.

Robert J. STERNBERG, *Successful Intelligence: How Practical and Creative Intelligence Determine Success in Life*, Plume, 1997.

L'INTELLIGENCE



L'intelligence artificielle



# L'intelligence artificielle

KENNETH FORD • PATRICK HAYES

*Le plus grand mérite de l'intelligence artificielle pourrait ne pas résider dans l'imitation de la pensée humaine, mais plutôt dans son élargissement à de nouveaux domaines.*

La plupart des philosophes et des spécialistes des sciences humaines sont convaincus que l'intelligence artificielle n'a pas atteint ses objectifs, et certains soutiennent que des machines réellement intelligentes ne pourront jamais être construites. Pourtant, la recherche en intelligence artificielle n'a jamais été aussi prospère : nous utilisons déjà des machines « intelligentes » et bien des psychologues admettent que le cerveau est un ordinateur biologique.

L'histoire de l'intelligence artificielle ressemble ainsi à l'histoire du vol artificiel. La volonté de voler était le premier objectif ambitieux de l'humanité, mais, pendant des siècles, elle est restée le symbole de l'orgueil démesuré du genre humain. La comparaison est instructive : de même que l'homme ne peut voler sans avion, la réalisation d'une machine imitant le comportement humain est sans doute inaccessible.

L'idée du vol à l'aide d'ailes fixées aux bras date de la préhistoire de l'aéronautique. Les essais étaient tous des échecs. Quel était le secret des oiseaux ? Certains supposèrent que les plumes d'oiseau avaient une « légèreté » intrinsèque. Ceux qui croyaient le vol possible avançaient que les oiseaux et les êtres humains étaient similaires, tandis que leurs opposants prétendaient que cette comparaison était sans valeur, immorale et perverse. Les deux groupes reconnaissaient néanmoins que l'homme ne volerait que s'il imitait les oiseaux. Les plus élaborées des premières machines volantes possédaient souvent des caractéristiques d'oiseau, tel ce bec que l'on trouve sur un dessin d'un planeur en bois conçu en 1810 par l'artiste anglais Thomas Walker (voir la figure 5).

Cette conception du vol copié sur celui des oiseaux a persisté longtemps. Un article publié au début du siècle

dans une revue de mécanique assure qu'« une vraie machine volante doit être un oiseau dans tous ses desseins et intentions ». Un brevet d'un « costume de vol » recouvert de plumes a été déposé à la fin XIX<sup>e</sup> siècle, et le vol à l'aide de machines à ailes battantes étaient encore discutés dans les revues aéronautiques au début du siècle.

## Le test de Turing

Si l'intelligence est un concept plus abstrait que celui du vol, le but affiché de l'intelligence artificielle a également été l'imitation d'un exemple biologique. C'est le mathématicien anglais Alan Turing qui, en 1950, a imaginé la possibilité d'une intelligence artificielle. Il proposa que la recherche en intelligence artificielle vise ce qui était, à l'époque, le meilleur test de l'intelligence humaine : une conversation avec une machine.

Pour Turing, une machine serait intelligente si un être humain dialoguant avec elle ne pourrait savoir si son interlocuteur était un être humain ou une machine. N'importe quel sujet de conversation devant être possible, la machine devait, pensait Turing, comprendre la langue et les conventions de langage, et posséder une bonne capacité de raisonnement.

Encore aujourd'hui, les cognitiens discutent des règles détaillées du test de Turing, alors que ce dernier ne semble pas y avoir accordé beaucoup d'importance. Le test de Turing, cité dans la plupart des livres consacrés à l'intelligence artificielle, semble ainsi être l'un des buts ultimes de l'intelligence artificielle, mais nous pensons que les nombreuses analyses et critiques du test ont donné une fausse impression des véritables ambitions de notre discipline. En effet, ce test pro-

pose une expérience mal conçue, car elle dépend trop de la subjectivité du juge. En outre, son objectif est douteux, car l'intelligence peut prendre plusieurs formes. Enfin, ce test dépend de la culture : une conversation acceptable pour un Français peut ne pas l'être pour un Japonais ou pour un Russe.

Comme Turing lui-même l'avait observé, un être humain trop intelligent, qui ferait des calculs mentaux très rapidement, par exemple, risquerait d'être considéré comme une machine par son interlocuteur. Lors de la première compétition de Loebner, en 1991 (un concours d'intelligence artificielle fondé sur le test de Turing qui s'est déroulé au Musée de l'Informatique, à Boston), les juges ont cru avoir affaire à une machine quand ils se sont trouvés en face d'une femme qui fournissait des textes structurés, bien écrits et informatifs. Apparemment notre culture considère ce mode d'écriture comme inhumain. Le test de Turing a surtout le défaut de vouloir mesurer toutes les intelligences à l'aune de l'intelligence humaine. Il n'admet pas l'existence d'intelligences plus faibles, différentes ou même supérieures à l'intelligence humaine.

Aujourd'hui, la plupart des spécialistes de l'intelligence artificielle rejettent

**1. LES SYSTÈMES INTELLIGENTS foisonnent. Quelques applications actuelles et futures (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) : des programmes informatiques qui composent de la musique, des programmes pour la sonde spatiale Deep Space 1 (lançee le 24 octobre 1998, cette sonde volera à proximité de l'astéroïde 1992 KD, en juillet 1999), le calcul des cours des marchés dérivés, à la Bourse de Chicago, la commande d'un véhicule autonome d'exploration de Mars, des systèmes de navigation pour les camions et la surveillance des émulsions dans des aciéries.**

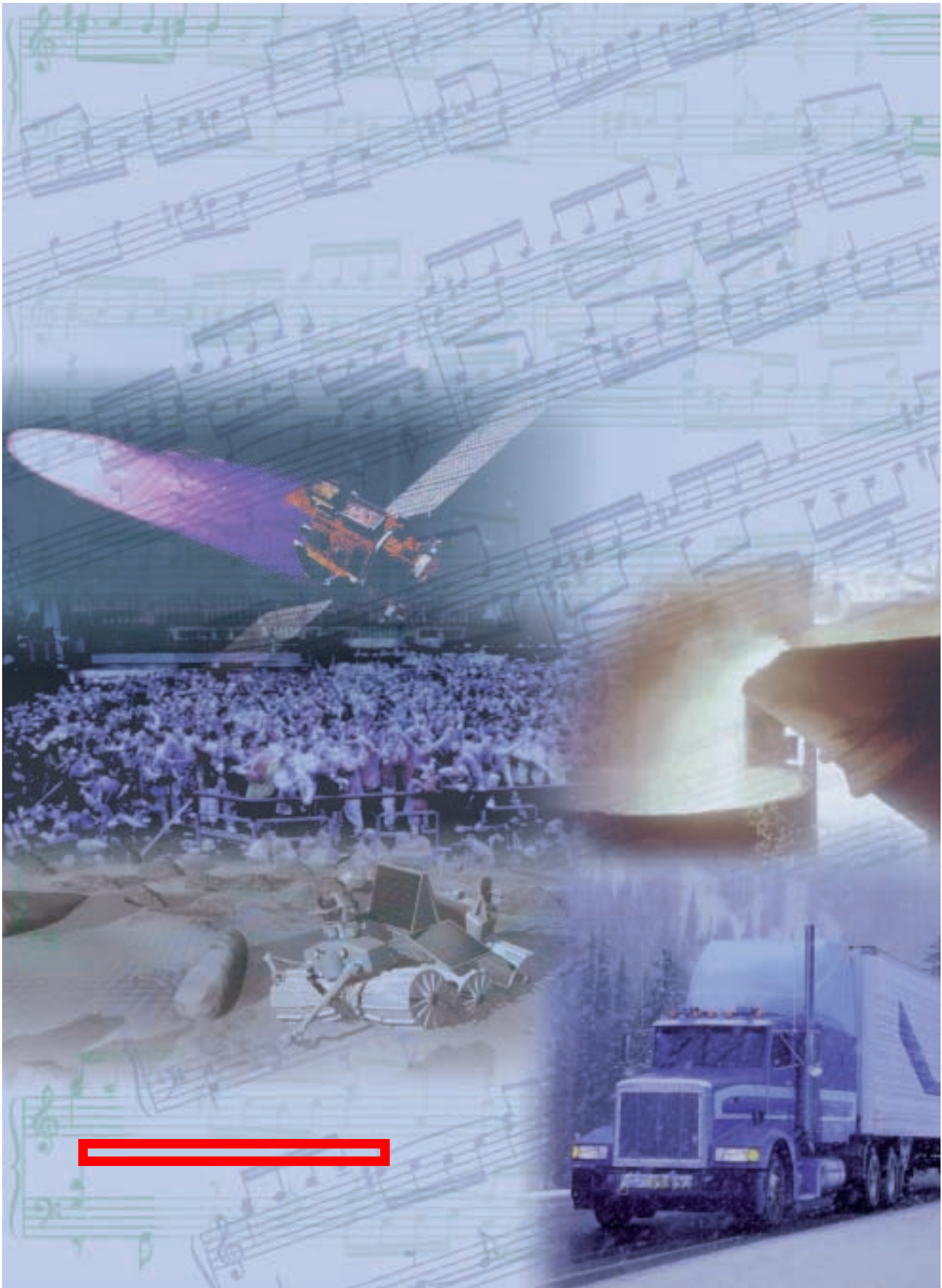


Illustration : L. Grace. Photographies : Spektrum Astro, J. Titcomb, Liaison International, NASA Ames Research Center, M. Kazar, Tony Stone Images, J. Kim, Liaison International et D. Cope, University of California at Santa Cruz

tent l'objectif du test de Turing et se préoccupent plutôt des mécanismes à la base de l'intelligence animale, humaine, informatique ou... extraterrestre. Ils cherchent les algorithmes, ou «calculs», qui sont considérés comme intelligents et construisent des machines qui étendent les capacités mentales humaines.

La recherche en intelligence artificielle cherche notamment des méthodes perfectionnées d'apprentissage ou de vision, elle construit des véhicules spatiaux autonomes, capables de planifier leurs actions.

Les progrès de l'intelligence artificielle ne se mesurent pas par le test de Turing, qui doit être relégué dans le musée des sciences, tout comme l'imitation des oiseaux a été définitivement abandonnée par les pionniers de l'aviation. L'intelligence artificielle doit se tourner vers d'autres horizons.

## Imitation ou compréhension

Les spécialistes de l'intelligence artificielle devraient se souvenir de l'histoire de l'aéronautique : les avions se sont développés quand les inventeurs n'ont plus voulu imiter les oiseaux et qu'ils ont analysé le vol en termes d'écoulement d'air ou de pressions. Certes, les frères Wright se sont inspirés des goélands pour mettre au point les ailerons mobiles qui guidaient leurs appareils, mais ils ne cherchaient pas à imiter leurs ailes mobiles. Ils testèrent d'abord un cerf-volant, afin de savoir comment obtenir suffisamment de portance ; puis ils cherchèrent des systèmes, afin de stabiliser longitudinalement et latéralement leur appareil ; enfin, ils se préoccupèrent du guidage et de la

propulsion. À chaque étape, ils résolvaient les problèmes techniques particuliers, qui les conduisirent à un appareil qui ne ressemblait pas à un oiseau.

L'aviation a beaucoup évolué depuis celui des frères Wright ; il n'atteindra jamais l'élégante précision de l'oiseau, mais, pour d'autres aspects, il le dépasse largement. Si un avion ne peut se poser dans un arbre, pêcher des poissons dans la mer ou utiliser les vents pour planer sans bouger au-dessus des terres, aucun oiseau ne peut voler à 15 000 mètres d'altitude ni plus vite que le son.

Au lieu de confiner l'intelligence artificielle à la reproduction des comportements humains, nous pouvons, plus utilement, chercher à donner des comportements intelligents aux systèmes de calcul. Aujourd'hui, les programmes d'intelligence artificielle se comptent par centaines, dans des applications aussi variées que l'aide à l'investissement financier, l'aide au diagnostic médical, la stratégie militaire, la gestion des pièces détachées de la navette spatiale ou la détection de l'usage frauduleux de cartes de crédit. Ces programmes prennent des décisions d'expert, trouvent des caractéristiques qui ont du sens dans une foule de données complexes et améliorent leurs performances par l'apprentissage. Si elles étaient prises par des humains, ces décisions seraient nommées bon sens, expertise et responsabilité. Toutefois, la plupart de ces tâches ne pourraient être accomplies par des humains qui sont trop lents, trop facilement distraits et peu fiables. Nos machines intelligentes nous dépassent sur bien des plans. Les programmes informatiques les plus utiles – notamment ceux d'intelligence artificielle – sont appréciés parce qu'ils n'ont rien d'humain. Un programme «humain» serait l'analogue d'un avion à l'allure de pigeon.

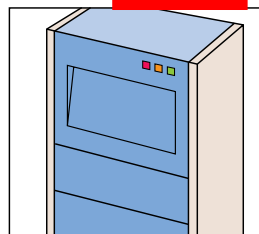
## En attendant la science

L'histoire de l'aviation a également montré que la technique devance fréquemment la connaissance scientifique. Les concepteurs des premiers avions n'apprirent pas les principes de l'aérodynamique en étudiant l'anatomie des oiseaux : les systèmes vivants comportent quantité de «pièces» ayant plusieurs fonctions ou des structures qui sont héritées de l'évolution.

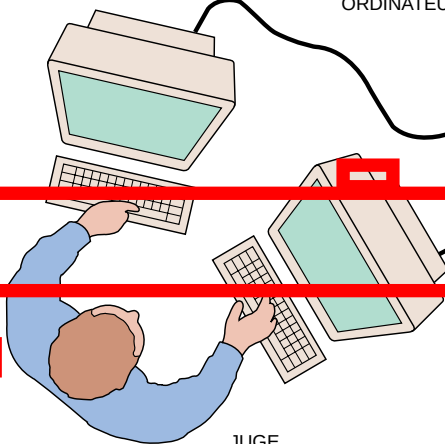
L'aérodynamique ne naquit qu'après les premières expériences en soufflerie,



HUMAIN

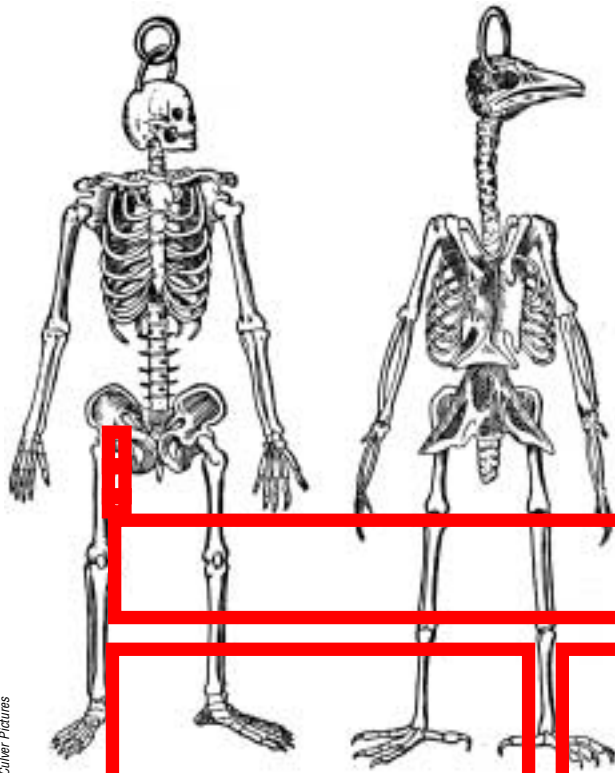


ORDINATEUR



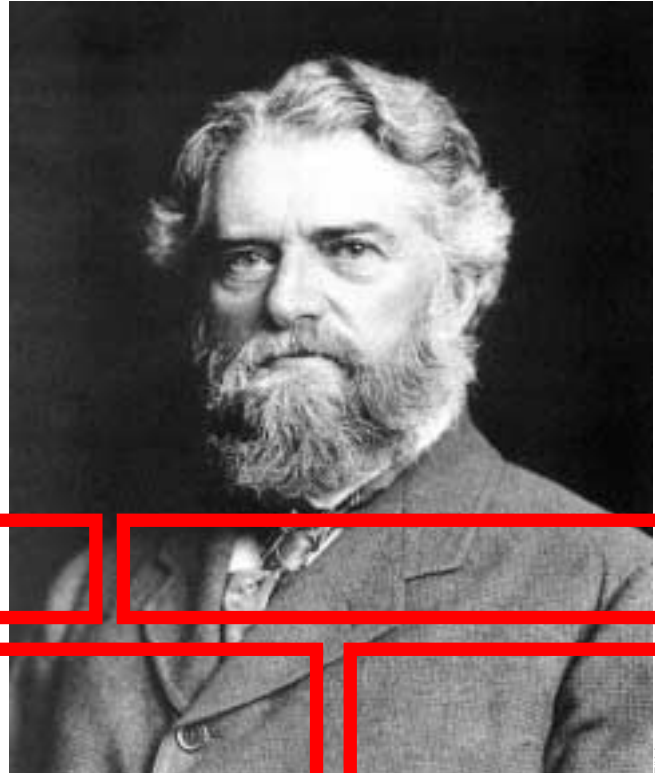
JUGE

**2. LE TEST DE TURING** porte le nom du mathématicien britannique Alan Turing (*photographie en haut à gauche*), qui l'imagina en 1950. Dans ce test, un juge discute avec un ordinateur et un autre humain, mais sans les voir. Si le juge ne peut distinguer la machine de l'humain, la machine est jugée «intelligente».



Culver Pictures

**3. CETTE COMPARAISON** entre un squelette humain et un squelette d'oiseau provient d'un texte écrit au XVI<sup>e</sup> siècle par le naturaliste français Pierre Belon. Il analysait les similarités anatomiques des hommes et des oiseaux afin de comprendre comment les oiseaux peuvent voler.



TIN Agency

**4. SIMON NEWCOMB**, astronome et mathématicien américain, a passionnément combattu l'idée du vol artificiel. Jusque sur son lit de mort, en 1909, il prétendait que le vol était impossible, même après que les frères Wright aient réussi à voler, en 1903.

au début du siècle. Ce sont ces expériences qui ont montré pourquoi les ailes des oiseaux étaient adaptées à leur fonction, et non l'examen de l'anatomie des oiseaux. Les frères Wright ne savaient pas pourquoi leur avion volait, et les principes aérodynamiques des ailes profilées ne commencèrent à être compris qu'avec les travaux de Gustave Eiffel, vers 1909. Eiffel testa en soufflerie des ailes artificielles munies de nombreux appareils de mesure. Les premiers avions possédant des ailes modernes profilées n'apparurent qu'à la fin de la Première Guerre mondiale, lorsque les ingénieurs démontrèrent que des ailes épaisses avaient une portance supérieure et une traînée peu différente de celle des ailes minces. Une compréhension théorique cohérente n'a été obtenue qu'après des expériences qui analysaient des aspects particuliers du problème.

On ne découvre probablement pas les principes de la pensée intelligente en plongeant dans les dédales de l'esprit humain. Une science de l'intelligence doit isoler des aspects spécifiques de la pensée, comme la mémoire, la recherche et l'adaptation, pour nous permettre

de les expérimenter, chacun à leur tour, sur des systèmes artificiels. En faisant varier systématiquement des paramètres fonctionnels de la pensée, nous déterminerons comment l'interaction des différents processus mentaux engendre des comportements intelligents.

### Une science de l'intelligence

Ces dernières années, l'intelligence artificielle a notablement progressé quand elle a compris qu'elle pouvait comparer quantitativement les divers algorithmes de résolution des tâches spécifiques.

Le rejet du test de Turing n'est pas l'abandon d'une ambition excessive ; le véritable but de l'intelligence artificielle est plus ambitieux encore que la fabrication d'une machine qui réussirait ce test : c'est la création d'une science de l'intelligence elle-même, qu'elle soit humaine, animale ou matérielle. Cette idée était déjà celle des pionniers de l'intelligence artificielle, dans les années 1960, mais la comparaison de l'aéronautique et de l'intelligence artificielle a bien montré que la quête d'une machine qui réussirait

le test de Turing était une fausse piste. Certains de nos collègues sont persuadés que leur but ultime est l'imitation de l'intelligence humaine, mais, même dans cette perspective limitée, les idées développées ici proposent des pistes inédites.

Reprenons une fois de plus l'analogie avec le vol. De même que les principes de l'aérodynamique s'appliquent à toutes les ailes, qu'elles soient naturelles ou artificielles, une vue informatique de l'intelligence ou, plus largement, de la pensée s'applique aussi bien aux penseurs naturels qu'aux penseurs artificiels. Si la psychologie cognitive et la psycholinguistique ressemblent à l'étude du vol des oiseaux dans toute sa complexité, les applications de l'intelligence artificielle ressemblent à la technique aéronautique. L'informatique fournit les principes qui guident les techniques, et le calcul lui-même est l'air qui porte les ailes de la pensée.

Comme une grande partie de l'informatique, les études sur l'intelligence artificielle sont principalement empiriques. L'exécution d'un programme est une expérience qui utilise un appareil complexe, constitué de métal, de

silicium et de symboles, afin de trouver les lois qui lient un comportement à une structure. On peut mettre au point des systèmes particuliers pour isoler un aspect de cette relation. Si les recherches en psychologie exploitent des méthodes d'analyses statistiques éprouvées, afin de révéler les comportements cachés dans l'inextricable complexité de la nature, les méthodes de l'intelligence artificielle sont ouvertes à l'examen direct. Avec les ordinateurs, nous pouvons décou-

vrir et expérimenter directement ce que les économistes Allen Newell et Herbert Simon nommaient les «lois de structure qualitatives».

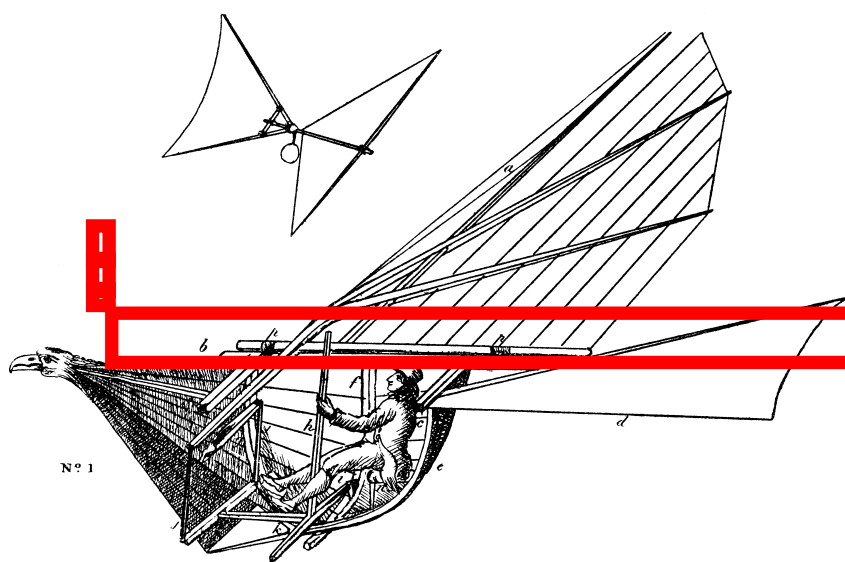
Ainsi, l'intelligence artificielle est la technique des objets cognitifs fondés sur la compréhension «calculatoire» qui alimente et instruit les sciences cognitives actuelles. Turing n'a pas proposé son test pour définir l'intelligence, mais bien des spécialistes d'intelligence artificielle ont mal interprété ses idées.

## Critiques dogmatiques

L'intelligence artificielle et le vol artificiel se ressemblent jusque dans les critiques qu'ils attirent. Dans les années 1900, Simon Newcomb (1835-1909), qui était pourtant un astronome remarquable, fit campagne pour montrer que le plus lourd que l'air ne volerait pas. Aujourd'hui, l'erreur de Newcomb fait sourire, mais nous oublions que ses arguments étaient largement partagés par ses contemporains. Newcomb utilisa des arguments mathématiques, comme le fit le mathématicien anglais Roger Penrose, qui «démontra», à l'aide du théorème de Gödel, que l'intelligence artificielle était impossible. Newcomb observait que la surface des ailes des oiseaux est proportionnelle au carré de leur taille : un oiseau de la taille d'un humain ne pouvait donc pas voler. Il se ridiculisa quand il conserva cette idée jusque bien après le premier vol des frères Wright, quand des avions volaient pendant plusieurs heures. En fait, l'argument était bon : le poids des avions est à peu près proportionnel au cube de leur envergure, mais Newcomb ignorait comment la portance variait avec la vitesse de l'air.

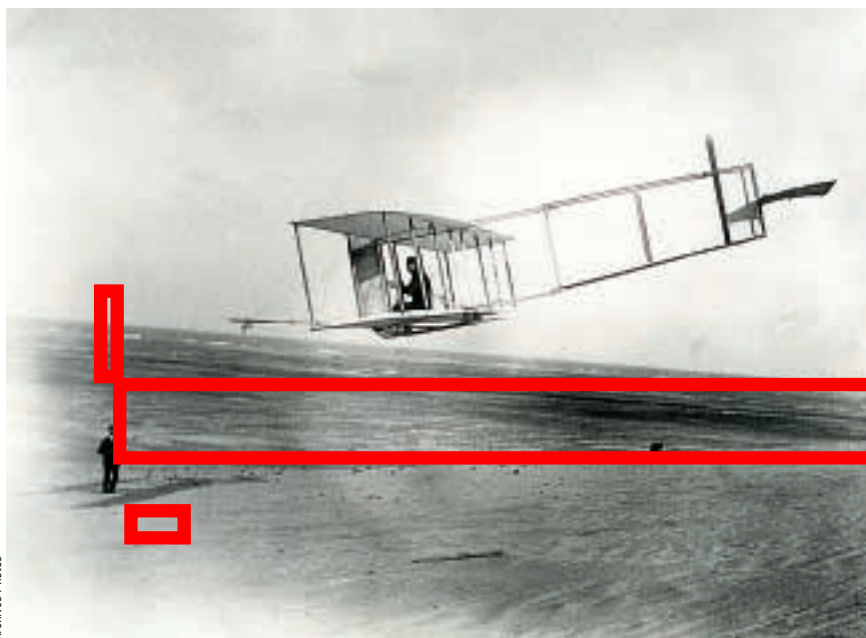
Newcomb utilisa des expériences de pensée et des arguments rhétoriques variés pour fonder son idée : n'est-ce pas ce que fit John Searle, de l'Université de Berkeley, contre l'intelligence artificielle dans sa fameuse «pièce chinoise» (voir *L'esprit est-il un programme d'ordinateur ?* par John Searle, *Pour la Science*, mars 1990). Les arguments de Newcomb, fougueux, passionnés... mais faux, sont si semblables à ceux qui ont été opposés à l'intelligence artificielle que pendant plusieurs années, nous avons décerné tous les ans un prix Simon Newcomb aux adversaires les plus virulents de notre discipline.

Où est le premier avion de l'intelligence artificielle? Nous l'avons déjà : les ordinateurs effectuent des tâches intelligentes, et ce depuis des années. L'intelligence artificielle vole tout autour de nous, mais beaucoup refusent de l'admettre. Voici quelques exemples parmi les milliers d'applications qui fonctionnent aujourd'hui : les systèmes d'intelligence artificielle sont des adversaires redoutables à des jeux comme les échecs, les dames, le bridge ou le backgammon ; ils composent de la musique, démontrent des



Culver Pictures

5. CE PLANEUR EN BOIS, conçu en 1810 par l'artiste anglais Thomas Walker, possède un bec d'oiseau.



Archives Photos

6. THE FLYER («La volante»), l'aéroplane des frères Wright, photographié à Kitty Hawk, avec Orville Wright aux commandes, montra qu'un appareil volant n'avait pas besoin de ressembler à un oiseau.

théorèmes mathématiques, analysent les marchés financiers, prennent des décisions concernant les crédits bancaires, inspectent des moteurs de pompes, contrôlent des émulsions dans les aciéries... Bientôt les programmes d'intelligence artificielle guideront des missions spatiales, exploreront d'autres planètes et conduiront des camions sur les autoroutes.

Toutes ces tâches sont-elles des preuves d'«intelligence»? La performance des systèmes d'intelligence artificielle, tout comme la vitesse des avions, est incontestable. Toutefois, l'histoire de l'intelligence artificielle a souvent montré que les capacités semblaient perdre leur caractère de prouesse mentale dès qu'on parvenait à les mécaniser. On a oublié qu'à l'époque de Turing un «calculateur» était un être humain qui faisait des calculs arithmétiques et qu'il était alors évident pour tous que cela nécessitait de l'intelligence. Le mot calculateur désigne aujourd'hui une machine. L'exécution rapide et précise de calculs n'est plus considérée comme une preuve de capacité mentale, tout comme le terme «voler» a évolué pour désigner le cas, alors inconcevable, où des centaines de personnes assises tranquillement dans un avion volent à 1 000 kilomètres par heure, loin au-dessus des nuages. Newcomb, qui était un des calculateurs prodiges de son temps, refusa jusque sur son lit de mort d'admettre que les premiers avions «volaient».

L'arbitraire de la désignation culturelle peut être illustrée par l'expérience de la pensée qui consiste à remplacer une machine par quelque chose de mystérieux, mais de naturel. Bien qu'un chien ne puisse réussir le test de Turing, on admet que les chiens ont une certaine intelligence. On dit souvent que *Deeper Blue*, l'ordinateur de la Société IBM qui a battu le champion d'échecs Garry Kasparov, n'est pas réellement intelligent, mais imaginez un chien jouant aux échecs : s'il battait Kasparov, on le considérerait comme un chien remarquablement intelligent.

L'idée selon laquelle l'intelligence naturelle est une forme complexe de calcul n'est encore qu'une hypothèse. Toutefois, aucune raison claire ne permet de l'infirmer. Certains ont argumenté qu'elle n'expliquerait pas la

conscience, mais, de toutes les théories actuelles sur la nature de la conscience, la théorie «calculatoire» semble la plus prometteuse. D'autres «théories» considèrent que la conscience résulte de propriétés physiques mystérieuses, mais elles ne proposent pas d'hypothèses testables. En considérant la vie mentale comme l'expression de calculs, l'intelligence artificielle fournit les éléments pour expliquer comment les symboles internes peuvent posséder une signification pour la machine et comment cette signification peut exercer une influence et être influencée par les relations causales qui existent entre la machine et son environnement.

Le but scientifique de l'intelligence artificielle est l'explication, en termes de calculs, de l'intelligence ou, plus largement, des capacités mentales elles-mêmes et pas seulement une explication de l'esprit humain. Si cette démarche réussit elle réfutera la spécificité de la pensée humaine et, par là, nous permettra de l'étendre et de la développer. Turing ne voulait pas souligner les différences entre les êtres pensants et les machines non pensantes ; il voulait les effacer. L'humanité ne serait pas amoindrie pour autant, car, somme toute, la compréhension des mouvements de l'air autour des ailes renforce l'admiration que nous portons au merveilleux vol des oiseaux. Il apparaît peut-être maintenant que la complexité et ses raffinements sont impressionnants. Nous soupçonnons qu'il en est de même pour l'intelligence humaine. Si nos cerveaux sont vraiment des calculateurs biologiques, alors ce sont de remarquables ordinateurs.

William H. FORD est directeur du Centre informatique de la NASA. Patrick HAYES travaille à l'Institut pour la cognition humaine et artificielle, à l'Université de Floride.

Terry W. NOYRAD et Fernando Flores, *L'intelligence artificielle en question*, PUF, 1989.

Hans MORAVEC, *Une vie après la vie : les robots, avenir de l'intelligence*, Odile Jacob, 1992.

Jacques PITRAT, *De la machine à l'intelligence*, Hermès, 1995.

Daniel CREVIER, *À la recherche de l'intelligence artificielle*, Flammarion, 1997.

## Ce magazine vous intéresse !



### Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actuelles
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'espace
- ☐ Le texte intégral de nombreux ouvrages de science
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme de l'année scientifique de la découverte

## Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque

à l'ordre du  
PALAIS DE LA DÉCOUVERTE  
(COP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)  
Tarif étranger : 200 F  
par mandat international uniquement  
(par avion, supplément de 80 FF)  
Abonnement de soutien : 200 F

Nom (M., Mme, Mlle) : .....  
Prénom : .....  
Adresse : .....  
Ville : .....  
Code postal : .....  
Profession : .....

à retourner avec votre règlement à  
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE  
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.  
Tél. : 01 40 74 80 00



# L'intelligence des réseaux de neurones

JEAN-PIERRE NADAL

*Représentations simplifiées de parties du système nerveux des animaux, les réseaux de neurones résolvent des problèmes informatiques et éclairent certaines caractéristiques du fonctionnement cérébral.*

Depuis 15 ans, des chercheurs de plusieurs disciplines – mathématiques, physique, biologie, etc. – étudient le comportement « intelligent » à l'aide de systèmes qui ont une architecture et un fonctionnement analogues à ceux de groupes de cellules dans le cerveau. Ces « réseaux de neurones formels », que nous désignerons désormais sous le nom de réseaux de neurones, résolvent des problèmes informatiques (reconnaissance de formes, par exemple) ou modélisent la cognition animale et humaine. Pour reproduire les mécanismes qui sont à l'origine de certaines capacités telles qu'apprendre, s'orienter, se déplacer, etc., on étudie le fonctionnement de réseaux de neurones à qui l'on fait exécuter des algorithmes, ou « calculs », qui semblent être ceux des groupes de neurones réels du cerveau.

Pour désigner ces calculs qui n'ont rien d'explicitement numérique, on emploie le terme de computation, mot d'origine latine, fort justement repris par la langue anglaise. Les sciences expérimentales sur lesquelles s'appuient ces travaux théoriques sont les neurosciences, notamment les neurosciences computationnelles ; ces disciplines tentent de relier l'organisation et les propriétés physico-chimiques des systèmes nerveux à leur fonction cognitive. La psychologie expérimentale, notamment la psychophysique et la psychologie cognitive participent également à cette recherche.

Naturellement, les spécialistes des neurosciences computationnelles ne prétendent pas que l'intelligence s'explique exclusivement par les propriétés de réseaux de neurones. Toutefois, il est bien démontré expérimentale-

ment que des réseaux, c'est-à-dire des assemblées de neurones plutôt que des neurones individuels, jouent un rôle fonctionnel dans le cerveau. Par exemple, les neurophysiologistes ont démontré que, chez le rat, un groupe de neurones particulier code l'orientation de la tête ; l'activité de chaque neurone de ce groupe dépend de l'angle de la tête, mais celui-ci n'est correctement décrit que par l'activité de tous les neurones du groupe.

La première grande étude théorique des réseaux de neurones fut effectuée par le neurologue américain W. McCulloch et par le mathématicien W. Pitts en 1943. McCulloch reconnut ultérieurement qu'ils avaient voulu considérer le cerveau comme une machine universelle, au sens défini par le mathématicien britannique Alan Turing en 1937, c'est-à-dire un système capable de faire, en principe, n'importe quel calcul. McCulloch et Pitts montraient qu'on peut réaliser une machine de Turing avec des réseaux de neurones. Les « neurones » qu'ils envisageaient n'étaient pas de véritables cellules nerveuses mais des modèles simplifiés de ces cellules : des « neurones formels », qui sont des « automates à seuil » ; ces petites unités qui additionnent les stimulations qu'elles reçoivent, produisent la valeur 0 ou 1 selon que cette somme est inférieure ou supérieure à un seuil (voir la figure 2).

Certains psychologues considèrent alors que l'on pouvait comprendre l'intelligence d'un cerveau par analogie avec les capacités d'un ordinateur. Cette idée reste aujourd'hui à la base de certaines approches de l'intelligence, en psychologie, en philosophie et en

intelligence artificielle, mais l'étude des réseaux de neurones s'est développée, d'abord dans les années 1960, puis dans les années 1980, avec un point de vue tout différent.

En effet, un ordinateur classique a pour principale propriété d'être généraliste : on peut le programmer pour lui faire effectuer n'importe quelle tâche. Au contraire, un cerveau ressemble plutôt à un assemblage de machines spécialisées : le cortex visuel assure la vision, le cortex olfactif l'olfaction, le cortex moteur la commande des muscles... Ces structures ont la faculté d'évoluer, de s'adapter à l'environnement. Les spécialistes des neurosciences computationnelles cherchent quelles sont les propriétés cognitives à la portée d'un réseau de neurones ou la structure et la fonction sont intimement mêlées où la frontière entre programme et matériel estompe. La faculté d'apprentissage étant l'une des plus fascinantes propriétés des systèmes vivants, la perspective d'en obtenir une modélisation par les réseaux de neurones est un attrait majeur.

## La fonction dans la structure

La mémoire d'un réseau de neurones réside dans les poids, ou efficacités synaptiques, qui caractérisent les connexions entre les neurones : si un signal est transmis par un neurone A, il est transmis à un neurone B avec une amplitude  $a$ , où  $a$  est ce que l'on nomme le poids de la connexion du neurone A au neurone B.

Dans les applications informatiques (par exemple, lors d'une tâche de recon-

naissance de formes), l'apprentissage s'effectue par une modification de ces poids (voir la figure 7). Initialement, on attribue des poids synaptiques aléatoires aux diverses connexions, et l'on applique aux neurones d'entrée un ensemble de valeurs. Le réseau calcule alors une réponse de sortie, qui diffère initialement de celle qu'il doit donner à la fin de l'apprentissage. On calcule un nouvel ensemble de poids synaptiques, afin que la sortie soit plus conforme à la sortie souhaitée. Progressivement, en modifiant ainsi les poids synaptiques alors que l'on présente au réseau un jeu de données, on

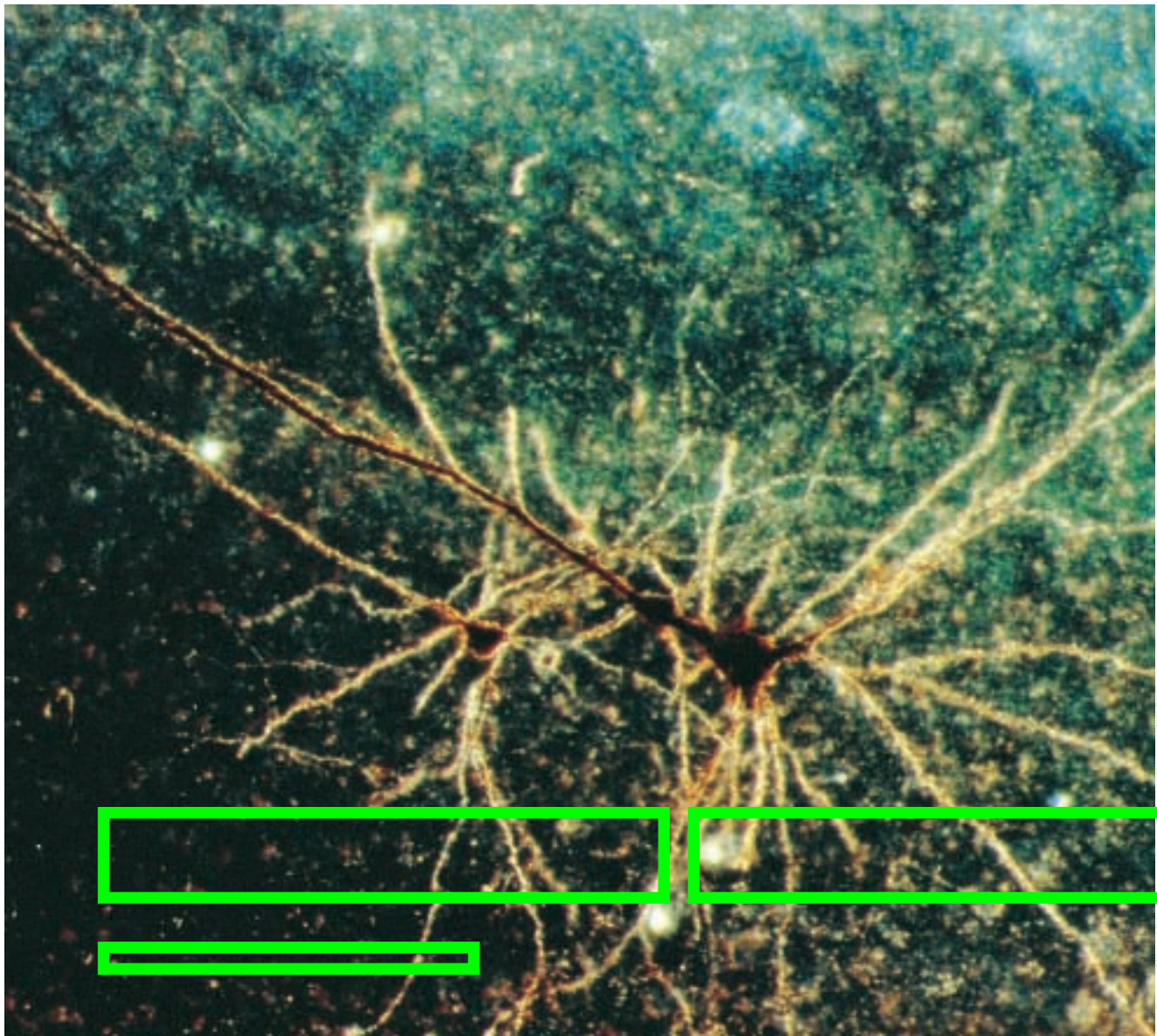
obtient des poids qui permettent au réseau d'effectuer aussi bien que possible le calcul qu'on veut lui confier.

Cette procédure peut s'automatiser : on fait donner à un réseau la capacité de calculer lui-même les modifications des poids synaptiques qui s'imposent. Comme la fonction réalisée par le réseau, c'est-à-dire les « connaissances » et les compétences de ce réseau, est ainsi essentiellement déterminée par les connexions entre les neurones qui le constituent, on nomme parfois « connexionnisme » l'analyse des capacités cognitives des réseaux de neurones.

Nous considérerons ici deux aspects de l'« intelligence » des réseaux de neurones, deux concernant les facultés d'apprentissage des réseaux.

### Réseaux à attracteurs et mémoire associative

La première propriété « intelligente » des réseaux de neurones concerne la mémoire. La mémoire humaine est différente de la mémoire d'un ordinateur classique, notamment en ce qu'elle est « associative ». Elle nous permet, par exemple, de faire des mots croisés : une définition nous fait penser à un ou



Yves Fagnac, Michael Fried, pour et leurs collègues de l'Université de Birmingham

**1. LE CERVEAU** est composé de neurones, qui se transmettent des signaux ; les signaux électriques qui se propagent à l'intérieur des neurones provoquent la libération de molécules, nommées neuro-médiateurs, aux synapses. Les réseaux de neurones sont inspi-

rés de cette architecture. Ici on voit deux cellules pyramidales du cortex visuel chez le cochon d'Inde ; la juxtaposition des prolongements cellulaires incite à penser que ces cellules sont connectées.

plusieurs mots, que nous essayons de placer dans la grille (une mémoire associative est également dite « adressable par le contenu »). Des physiiciens ont découvert que les réseaux de neurones ont cette même propriété d'associativité.

En effet, les réseaux de neurones sont précisément des réseaux, c'est-à-dire des assemblées de neurones suffisamment interconnectés pour que l'activité de chaque neurone dépende des activités des autres neurones. Un cas extrême est celui d'un réseau à connectivité complète comme celui qui est représenté sur la figure 4 : quand on applique à chaque neurone du réseau une valeur d'entrée (c'est l'équivalent de la définition des mots croisés) et qu'on laisse ensuite le réseau évoluer, il se stabilise dans un état particulier, qui correspond au mot évoqué par la définition. Un tel réseau, s'il est suffisamment grand, peut ainsi avoir une fonction cognitive (par exemple, celle d'une mémoire associative) que ne peut posséder un neurone individuel.

La stabilisation d'un réseau ressemble à l'évolution de systèmes matériels : un matériau peut être dans différents états macroscopiques, ou « phases » gazeux, liquide, solide), et les différentes phases ont des propriétés variées, telles que le ferromagnétisme (la capacité d'être aimantable, comme le fer). Ces états macroscopiques des matériaux résultent des interactions d'un très grand nombre de constituants élémentaires (atomes, molécules, moments magnétiques...).

Or, en 1982, à l'Université de technologie de Californie, le physicien John Hopfield a identifié une analogie fructueuse entre un groupe de neurones formels fortement interconnectés et un ensemble de moments magnétiques (ou « spins ») en interaction. Cette analogie permet d'utiliser tout un savoir acquis en physique statistique ; elle permet de comprendre le rappel associatif, tel qu'il se produit dans la mémoire humaine, comme la convergence d'un système dynamique vers un « attracteur », et l'existence même de cette fonction de mémoire comme la manifestation d'un phénomène collectif. De même qu'un pendule simple finit par s'arrêter dans la position de repos, laquelle est un attracteur réduit à un point fixe, un réseau fortement connecté évolue jusqu'à un état particulier qui code le concept associé à l'in-

formation d'entrée (contrairement à un pendule simple, un réseau de neurones peut avoir un grand nombre d'attracteurs différents, chacun codant un objet mémorisé).

On retrouve avec ces modèles des caractéristiques définies par la psychologie de la Gestalt, le courant développé au début du siècle par des psychologues allemands et de nouveau à l'honneur aujourd'hui : percevoir, c'est percevoir une forme (*Gestalt*, en allemand) ou un tout qui n'est pas la simple juxtaposition de ses parties (les élé-

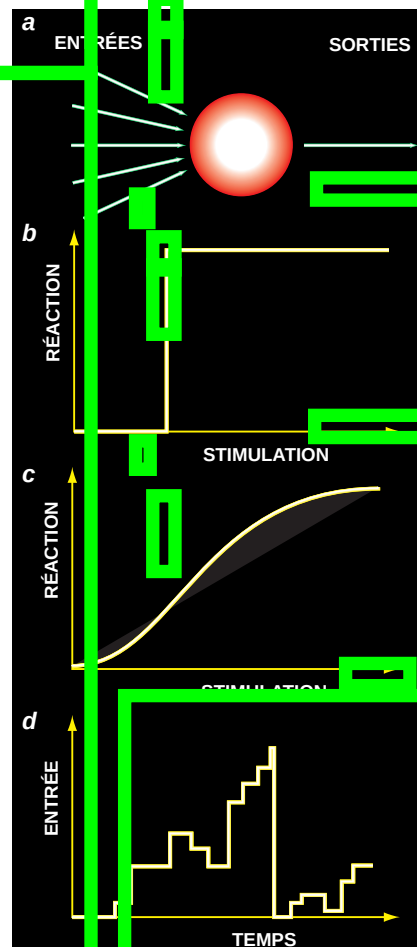
ments d'une scène visuelle, par exemple), mais qui résulte d'une interaction de ses parties. On peut dire, de même, que les attracteurs sont les seuls états d'activité du réseau qui portent un sens. Toute autre activité, y compris l'état initial directement imposé par le stimulus, n'apparaît que comme une étape intermédiaire dans la dynamique du réseau : une étape de calcul, qui mène à la réponse (l'attracteur associé).

Les interactions des neurones, c'est-à-dire les poids synaptiques qui quantifient la capacité des synapses à transmettre le signal, sont modifiées en fonction de l'activité du réseau, au cours de la phase d'apprentissage. Cet apprentissage conduit à la formation d'attracteurs qui représentent les objets à mémoriser. Qu'un état de mémoire soit un attracteur du système explique pourquoi une activité spécifique persiste en réaction à un stimulus, bien après que le stimulus a disparu. Le fait que l'information codant un objet de mémoire soit répartie dans l'ensemble des connexions entre les neurones explique la grande robustesse des réseaux de neurones en cas de lésions.

Le modèle de J. Hopfield peut être considéré comme la formalisation mathématique la plus directe et la plus convaincante des idées avancées dans les années 1940 par Donald Hebb, de l'Université McGill. Ces idées restent à la base des travaux théoriques et expérimentaux sur la mémoire. Des études analytiques et numériques du modèle de J. Hopfield et de ses variantes ont conduit à une compréhension fine des mécanismes d'apprentissage dans de tels réseaux.

## Du modèle à l'expérience

Ainsi, Daniel Amit et ses collègues physiciens de l'Université de Rome I, de l'Université hébraïque de Jérusalem et de l'École normale supérieure, à Paris, étudient depuis peu des modèles qui s'éloignent des systèmes magnétiques, pour mieux reproduire les interactions des neurones réels. Ils ont proposé de représenter les interactions de neurones par des potentiels d'action, c'est-à-dire des impulsions électriques brèves, plutôt que par des signaux continus. Comme dans le cerveau, ils considèrent que l'intérieur de chaque neurone présente une différence de potentiel par rapport au milieu extracellulaire



**2. DIVERS MODÈLES** représentent les neurones d'une façon plus ou moins réaliste. Les neurones formels de McCulloch et Pitts produisent un signal de sortie égal à 0 ou à 1 selon les signaux d'entrée (b). Les neurones sigmoïdes (c) ont une sortie continue, comprise entre 0 et 1, et d'autant plus proche de 1 que la somme pondérée des entrées est forte. Les neurones « qui intègrent et qui déchargent » (d) calculent la somme des stimulations et des inhibitions au cours du temps et déchargent quand cette somme devient supérieure à un seuil. Le modèle de M. Huxley et M. Hodgkin se fonde sur la physique de la membrane de la cellule nerveuse pour rendre compte des mécanismes d'intégration et d'émission de potentiels d'action.

et que cette différence de potentiel est modifiée par les stimulations électriques reçues. Quand la différence de potentiel électrique dépasse un seuil, le neurone décharge : il émet une impulsion électrique qui se propage vers d'autres neurones, tandis que la différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur du neurone revient à la valeur de repos.

Les modèles obtenus décrivent bien toute une série d'expériences de neurophysiologie nommées « tâches à réponse différée », effectuées par Y. Miyashita, de l'Université de Tokyo. Dans ce type d'expériences, un singe doit produire une action qui dépend du stimulus présenté un certain temps auparavant. Plus précisément, on montre à l'animal une image, engendrée par ordinateur, qui ne représente rien de familier ; puis, quand on lui montre une seconde image, on lui demande d'indiquer si cette image diffère de la première (le singe tient une manette ; il doit alors lâcher la manette et toucher un écran afin d'obtenir une récompense).

On enregistre, à l'aide d'électrodes implantées dans certaines aires corticales, telles que le cortex préfrontal et le cortex inféotemporal, l'activité de neurones de ces aires. Les expériences montrent que, par endroits, les cellules ont une activité soutenue durant la période qui sépare le stimulus et la réaction. On constate que cette activité dépend sélectivement de un (ou plusieurs) des stimuli présentés durant l'expérience.

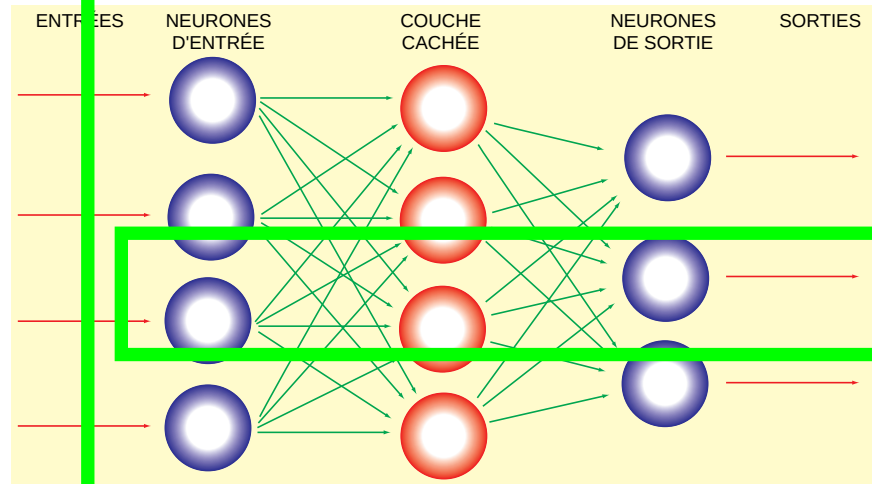
Ces données expérimentales sont en très bon accord avec les modèles de mémoire associative évoqués précédemment. En outre, les descriptions fondées sur ces modèles conduisent à des prédictions qui sont testées dans des expériences actuellement en cours à Jérusalem ; par exemple, quand les images sont présentées toujours dans le même ordre, on peut prédire certaines caractéristiques des configurations d'activités neuronales suscitées par les images. Pour la première fois, on cherche à montrer qu'un phénomène collectif est à l'origine d'une fonction cognitive.

## Apprentissage généralisé

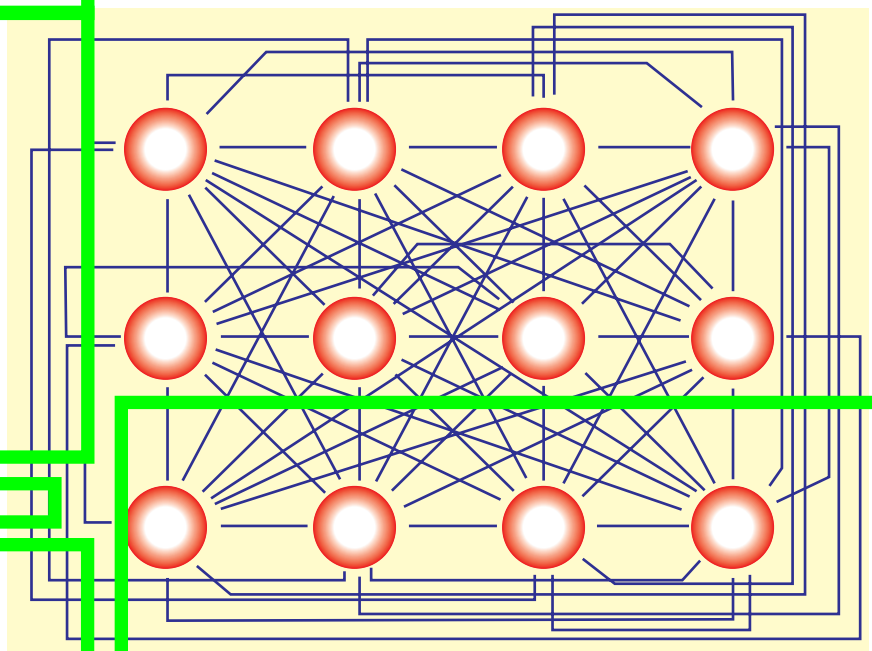
La deuxième propriété « intelligente » qu'ont les réseaux de neurones est celle de « généralisation ». Le cerveau humain généralise sans cesse, au point que les psychologues ont prétendu évaluer

l'intelligence en mesurant cette capacité par les tests de quotient intellectuel (QI). Les tests classiques de QI comprennent beaucoup d'exercices où l'on demande de trouver la suite logique d'une séquence.

Comment poursuivre la série 1, 1, 2, 3, 5, 8, par exemple ? Après un bref moment, on détecte la règle cachée : chaque nombre est égal à la somme des deux précédents, de sorte que le nombre suivant doit être 13 (la suite est nom-



**3. LES RÉSEAUX DE NEURONES EN COUCHES** ont des propriétés qui dépendent du nombre de couches et du nombre de neurones par couche. Ce sont généralement ces types de réseaux que les informaticiens utilisent pour la reconnaissance de formes ; ils décrivent également de façon simplifiée les premières étapes de traitement des systèmes sensoriels (la rétine, par exemple).



**4. LES RÉSEAUX DE NEURONES COMPLÈTEMENT CONNECTÉS** ont été étudiés dans les années 1980. Ils ont servi aux études de l'associativité de la mémoire, c'est-à-dire de la capacité analogue à celle qui nous permet de reconnaître une personne d'après son visage. Les informaticiens utilisent de tels réseaux avec un très grand nombre de neurones : on a déjà effectué des simulations avec 15 000 neurones, tandis que les parties de système nerveux à modéliser comportent quelque 100 000 neurones. Ces réseaux ont des capacités limitées, qui en font de bons candidats pour la description de la mémoire humaine à court terme. La nature de cette limitation est bien décrite par Sherlock Holmes : « Voyez-vous, le cerveau est comme un petit grenier d'abord vide. L'erreur est de s'imaginer que ce petit grenier a des murs extensibles. Soyez sûr qu'à un moment donné chaque nouvelle acquisition prend la place d'une ancienne. Il importe donc beaucoup de ne pas laisser les connaissances superflues évincer celles dont on a besoin. »

mée suite de Fibonacci). Toutefois on peut aussi bien prétendre que le nombre suivant est n'importe quel autre nombre, car une infinité de fonctions  $f$  prennent les valeurs 1, 1, 2, 3, 5, 8 pour les arguments 1, 2, 3, 4, 5, 6. La réponse

$f(7) = 13$  nous paraît seulement plus «naturelle», plus «raisonnable»: on s'attend à ce que la règle cachée soit «simple». Peut-on comprendre cette faculté que nous avons à généraliser, autrement dit à inférer une règle à

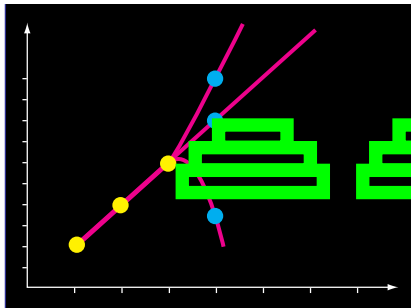
partir d'un nombre limité d'exemples? Peut-on comprendre pourquoi certaines généralisations paraissent plus naturelles, plus simples, que d'autres?

L'analyse des réseaux de neurones a éclairé cette question. Mieux encore, ces réseaux de neurones ont été généralisés en «machines à apprendre» avec lesquelles on cherche à comprendre le fonctionnement du cerveau. De telles machines, réelles ou simulées sur ordinateur, sont décrites par quelques équations; elles sont spécialisées dans la tentative de résolution de tâches analogues à la recherche de termes d'une suite. On admet qu'elles peuvent lire des questions, c'est-à-dire saisir des données dans un format prédéterminé; puis elles répondent aux questions qu'on leur pose.

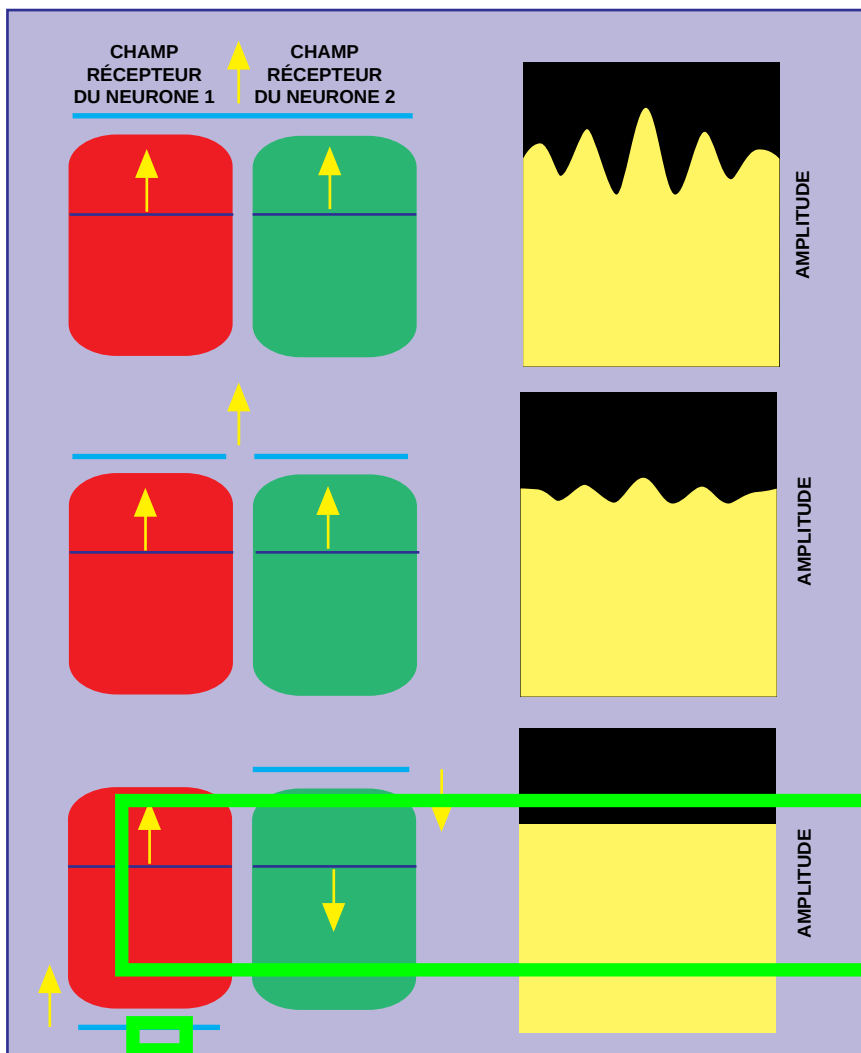
Par exemple, vers la fin des années 1980, une équipe des Laboratoires Bell de la Société AT&T a mis au point des réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits de codes postaux. L'équipe présentait des photographies numérisées de caractères manuscrits en entrée d'un réseau à trois couches cachées, et elle faisait apprendre au réseau à produire la sortie appropriée: le premier neurone de sortie devait être actif quand le réseau reconnaissait le chiffre 0, le deuxième neurone devait être actif quand le chiffre 1 était reconnu, etc.

Plus de 7 300 chiffres étaient utilisés pour l'apprentissage. Après cette phase d'apprentissage, l'équipe présentait de nouveaux chiffres (environ 2 000) pour tester les performances en généralisation: le réseau afficherait-il la bonne sortie pour ces exemples non vus au cours de l'apprentissage? Le résultat fut assez satisfaisant: la proportion d'erreurs sur ces exemples tests était seulement de cinq pour cent (sur les mêmes données, un être humain fait moitié moins d'erreurs seulement). Plus récemment, avec un nombre de chiffres manuscrits bien supérieur (60 000 pour l'apprentissage et 10 000 pour le test), et avec des architectures et des algorithmes d'apprentissage plus complexes, la même équipe a obtenu un taux d'erreurs inférieur à un pour cent.

Dans ce type d'application, on modifie les poids synaptiques à l'aide d'algorithmes comparables à l'algorithme d'apprentissage précédemment évoqué. Toutefois, dans le cadre des neurosciences computationnelles, on considère



**5. LA CAPACITÉ DE GÉNÉRALISER** est utilisée dans les tests de OI. On présente une série de nombres telle que 2, 4, 6, et l'on demande le nombre suivant. Nous avons tendance à penser que ce nombre doit être 8, parce que les premiers termes sont les premiers nombres pairs de la suite. Pourtant, en théorie, n'importe quel nombre est possible, parce que plusieurs courbes peuvent passer par les points imposés. Par exemple, si l'on observe que 6 est égal à la somme des deux termes précédents, on peut ainsi poursuivre la suite par le nombre 10.



**6. LA DYNAMIQUE** des réseaux de neurones est une caractéristique importante de leur fonctionnement. Wolf Singer, à Francfort, a enregistré l'activité des neurones d'un singe à qui il montrait une barre (en bleu clair) qui se déplaçait. Il enregistrait alors des réactions synchrones de certains neurones (la courbe de corrélation à droite est accentuée quand les décharges des neurones sont synchrones) (a). Deux barres mobiles excitant indépendamment les deux neurones suscitent une réaction inférieure (b). Enfin, deux barres indépendantes qui se déplacent dans des directions opposées n'engendrent aucune réaction (c).

plus particulièrement des algorithmes d'apprentissage ayant une certaine plausibilité biologique : les poids synaptiques sont changés selon un critère hebbien, c'est-à-dire en fonction des activités pré- et postsynaptiques.

Ainsi, après une phase d'apprentissage qui consiste à modifier les paramètres, une machine généralise – elle a compris la règle – si elle donne la réponse appropriée pour tout exemple qui n'a pas été considéré lors de l'apprentissage.

## Questions de ressources

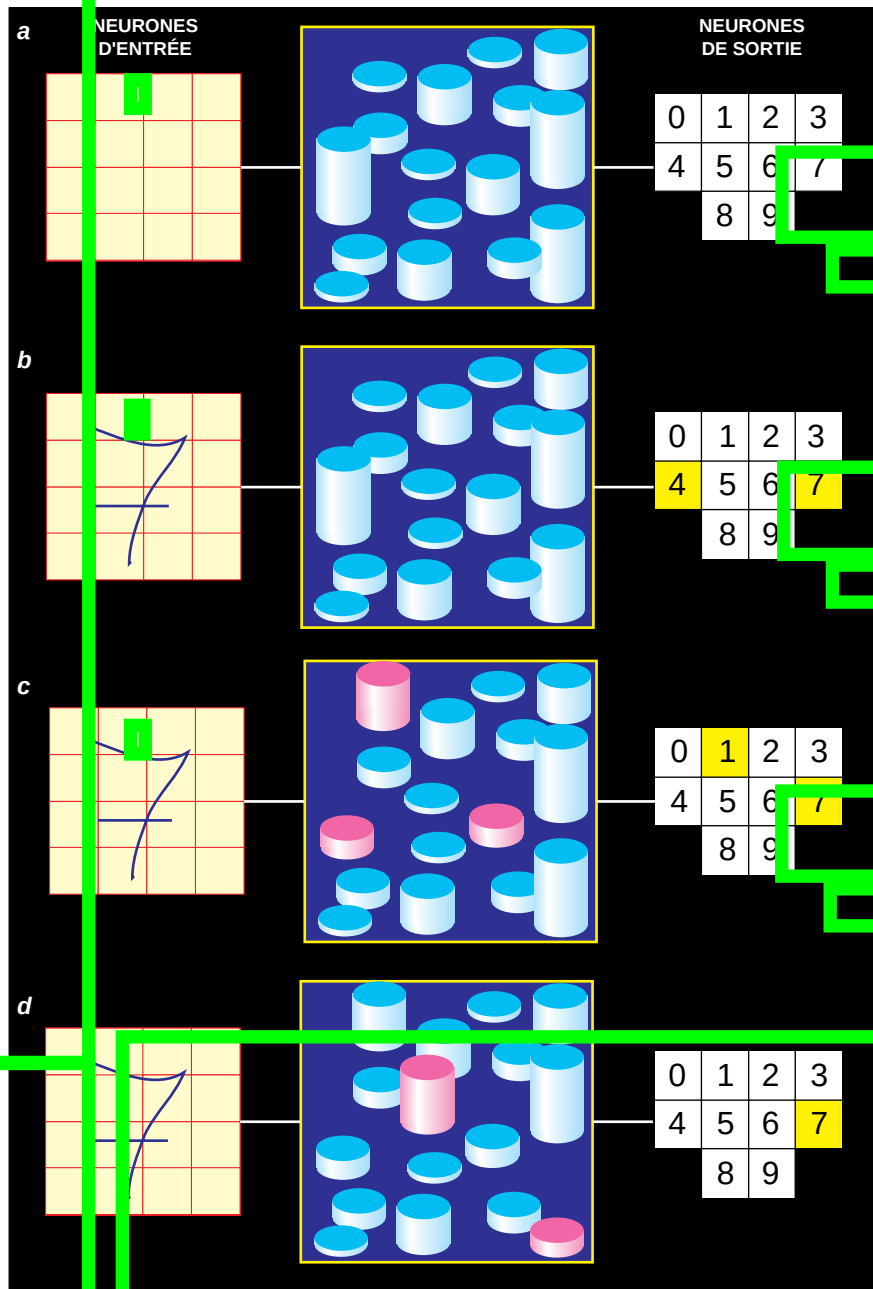
Supposons que l'on arrive effectivement à adapter les paramètres, de sorte que la machine produise la sortie désirée pour chaque exemple donné lors de l'apprentissage : ce serait la preuve que, pour chaque exemple, la machine a mémorisé l'association entrée-sortie désirée. Une telle mémorisation est possible si les ressources de la machine sont suffisantes, c'est-à-dire si l'architecture est appropriée et si le nombre de paramètres adaptables est suffisamment grand. Cependant, si ces ressources sont vraiment très grandes, la machine apprend par cœur tout nouvel exemple donné : quelle que soit la sortie désirée, il existera toujours un choix des paramètres qui permet d'obtenir cette sortie, tout en gardant les bonnes sorties pour tous les exemples déjà appris. La machine ne généralise alors pas, puisque à chaque instant elle peut mémoriser un nouvel exemple.

En revanche, si les ressources de la machine sont limitées, la mémorisation d'un grand nombre d'exemples risque d'encombrer la mémoire, de sorte que, lors de la présentation d'un nouvel exemple, on ne peut plus modifier les paramètres sans remettre en cause l'apprentissage déjà effectué. Autrement dit, avant que soit donnée la réponse à reproduire (la sortie désirée), la machine a déjà une réponse prête, la seule possible compte tenu de ce qu'elle a déjà appris. En ce sens, la machine généralise.

Plus on donne d'informations sur la règle à découvrir, plus on restreint le domaine des valeurs admissibles pour les paramètres, mais plus on limite le nombre de règles nouvelles que la machine peut encore apprendre. Si l'architecture est adaptée, la machine peut apprendre la règle cachée : il existe au moins un choix des paramètres qui per-

met à la machine de reproduire la règle ; dans ce cas, la généralisation sera correcte. Sinon, la machine généralise, mais infère une mauvaise règle : la règle trouvée ne coïncide que partiellement avec celle qu'il fallait trouver.

Ainsi la capacité à généraliser, à catégoriser, commence là où s'arrête la capacité à apprendre par cœur, et un système aux ressources illimitées ne peut qu'apprendre bêtement. Cette notion de ressources est subtile, car on



**7. LA RETROPROPAGATION DU GRADIENT** est un algorithme d'apprentissage très utilisé. Son principe est schématisé ici. Après le choix de l'architecture du réseau, par exemple un réseau en couches avec une couche cachée (*non représenté*), on modifie les connexions entre les neurones (au centre, on a représenté les poids synaptiques par des plots de différentes hauteurs), pour que le réseau affiche une sortie désirée. On définit une fonction dite de coût, qui décrit la différence entre l'activité de sortie et l'activité désirée. Cette fonction est nulle si la sortie est celle que l'on désire. On présente alors des exemples au réseau, et, à chaque présentation, on modifie les connexions, de sorte que la sortie se rapproche de la sortie désirée. Par exemple, on présente ici un chiffre 7 ; le réseau réagit d'abord en affichant un 4 et un 7. On modifie alors les poids synaptiques (*en rouge, c*) et l'on présente à nouveau le chiffre 7 : le réseau réagit en affichant 7 et 1. Puis, quand on modifie encore les poids (*d*), le réseau détecte le 7. De proche en proche, la sortie se rapproche de la sortie voulue.

sait réaliser des systèmes dont un seul paramètre est modifiable et qui, pourtant, ont des ressources infinies dans le sens précédent (c'est-à-dire une capacité infinie à mémoriser).

Considérons, par exemple, les nombres réels 0,8 ; 2,2 ; 5,1, et cherchons à les classer en deux classes. En considérant le signe du sinus de leur produit par un nombre  $f$ , on parvient à grouper ces nombres comme on le désire. Par exemple, si  $f$  est égal à  $\pi/2$ , 0,8 et 5,1 seront dans la première classe, tandis que 2,2 sera dans la seconde. Si  $f$  est égal à  $\pi$ , 0,8 et 2,2 seront dans la première classe et 5,1 dans la seconde. Ainsi, en choisissant convenablement  $f$  (le paramètre ajustable), on arrive à réaliser n'importe quel classement au choix. Ce procédé qui n'utilise qu'un seul paramètre s'applique généralement à un nombre quelconque de nombres à classer.

Pour estimer les ressources, on utilise aujourd'hui un nombre de paramètres effectifs nommé dimension de Vapnik-Chervonenkis, du nom des deux chercheurs russes qui ont introduit cette notion dans les années 1970. Cette dimension est parfois infinie, comme dans l'exemple précédent, mais, dans la plupart des cas et, notamment, pour les réseaux de neurones, elle est de l'ordre de grandeur du nombre de paramètres modifiables. Notons que, pour la plupart des machines à apprendre, on ne sait pas calculer exactement cette dimension...

Une machine apprend par cœur tant que le nombre d'exemples à apprendre est inférieur à sa dimension de Vapnik-Chervonenkis, et elle commence à généraliser au-delà. Un apprentissage efficace par un réseau de neurones demande donc une architecture suffisamment complexe pour que la règle à apprendre soit effectivement réalisable par le réseau, mais une dimension de Vapnik-Chervonenkis pas trop grande, pour que l'apprentissage ne nécessite pas un trop grand nombre d'exemples : il s'agit de trouver le bon compromis, le réseau dont la complexité a le bon goût d'être bien adapté à la tâche à résoudre.

Ainsi, un réseau ou, plus généralement, une machine à apprendre qui a appris une règle est devenu un modèle pour cette règle ; il prédit le résultat de l'application de cette règle à tout nouvel exemple. On retrouve alors,

dans le cadre de la théorie de l'apprentissage, la notion classique du rasoir d'Ockham : le bon modèle (la bonne théorie) est celui dont la complexité est assez grande pour rendre compte des observations, mais pas plus.

## Intelligence et sensations

Si nous avons privilégié ici les capacités d'apprentissage des réseaux de neurones, bien d'autres aspects de l'intelligence sont aujourd'hui étudiés à l'aide de réseaux de neurones. Ainsi de nombreuses équipes s'intéressent à la modélisation des systèmes sensoriels. D'autres modélisent les contrôles sensorimoteurs ou explorent des applications en contrôle de systèmes (pilote d'un véhicule par un réseau de neurones, par exemple).

On étudie notamment les possibilités offertes par la dynamique des réseaux et par une activité neuronale qui est sous forme de potentiels d'actions, d'impulsions brèves. Ainsi des expériences en neurosciences indiquent que la mise en activité synchrone de groupes de neurones peut avoir un rôle fonctionnel important : par exemple, quand on présente une barre qui se déplace dans le champ visuel et que l'on enregistre l'activité de neurones du cortex visuel, on observe que des neurones éloignés ont pourtant une activité synchrone ; on a compris que ces neurones synchrones participent au codage de la barre dans le cerveau. Si l'on présente maintenant des microstimuli de barre qui activent les mêmes neurones, on observe que ces neurones sont encore actifs, mais que leurs activités ne sont pas synchrones. Ainsi le synchronisme est une indication que les neurones réagissent au même objet (voir la figure 6).

D'autres expériences de neuropsychologie, telles celles de S. Thorpe et de ses collègues de Toulouse, démontrent que la première vague d'impulsions engendrée par la présentation d'une image dans le champ visuel est suffisante pour détecter la présence ou non d'un animal dans une image. Dans certaines expériences, les neuropsychologues toulousains projettent à des sujets humains des images si rapidement que les sujets ne voient pas les détails et ne peuvent qu'identifier globalement les images. On leur demande de maintenir un bouton enfoncé et de le relâcher quand un animal apparaît.

En mesurant le laps de temps entre la présentation des images et la réaction motrice des sujets, connaissant le temps de traitement dans chaque module cérébral ainsi que le temps de propagation des signaux nerveux, les psychologues ont montré que les réactions résultent d'un très petit nombre de traitements : on peut donc estimer le nombre de couches neuronales qui participent au comportement testé.

En mesurant l'activité du cerveau à l'aide d'électrodes posées sur le crâne (comme pour un électro-encéphalogramme), les neuropsychologues ont démontré que le système nerveux détecte la présence d'un animal dans l'image après seulement 150 millisecondes et que le cerveau n'utilise parfois que les toutes premières réactions des neurones stimulés.

Plus généralement, l'extrême efficacité algorithmique du système nerveux dans les tâches de reconnaissance de formes qu'on ne sait absolument pas reproduire avec des modèles de réseaux de neurones classiques, pourrait résulter d'une utilisation astucieuse du codage par impulsions. Nous ne sommes pas à l'abri de très bonnes surprises à venir dans les prochaines années...

Jean-Jacques NADAL est chercheur CNRS au Département de physique de l'École normale supérieure de Paris.

J.-P. NADAL, *Réseaux de neurones : de la physique à la psychologie*, Armand Colin, 1993.

J. HERTZ, A. KROGH et R.G. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley, 1990.

J. HÉRAULT et Ch. JUTTEN, *Réseaux neuronaux et traitement du signal*, Hermès, 1994.

G. HINTON, *Apprentissage et réseaux de neurones*, in *Pour La Science*, novembre 1992.

M.A. ARBIB, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Bradford Books / The MIT Press, 1995.

P. CHURCHLAND et T.J. SEJNOWSKI, *The Computational Brain*, MIT Press / Bradford Books, 1992.

S. THORPE, F. FIZE et C. MARLOT, *Speed of Processing in the Human Visual System*, in *Nature*, vol. 381 pp. 520-522, 1996.



# L'intelligence des jeux

MATTHEW GINSBERG

*Les ordinateurs de jeux comprennent l'intelligence humaine en proposant de nouvelles méthodes de résolution de problèmes.*

En 1997, la nouvelle stupéfia le monde : le meilleur joueur du monde d'échecs, Garry Kasparov, avait été battu, au meilleur des six parties, par l'ordinateur *Deep Blue*, programmé par une équipe d'IBM. Cette victoire de la machine dans le plus cérébral des jeux montrait qu'un seuil avait été franchi et qu'il fallait réévaluer les caractéristiques de notre intelligence.

En fait, le résultat de cet affrontement n'est pas si tranché. Le jeu de Kasparov fut étonnamment timoré, il abandonna trop tôt dans une partie qui aurait dû aboutir à la nullité et commit, dans la dernière partie, une erreur indigne de son statut de meilleur joueur du monde. Il est dommage qu'aucun match revanche n'ait été organisé.

Examinons d'autres jeux : si, aux dames américaines (*checkers*) et à othello, des machines sont championnes du monde depuis quelques années, si, aux échecs, les ordinateurs semblent, depuis peu, avoir pris l'avantage sur les humains, dans bien d'autres jeux, tels le go et le bridge, les programmes restent faibles. La situation reste indécise au backgammon, tandis qu'au scrabble la machine possède un avantage, léger mais indubitable.

Grâce aux jeux, les chercheurs apprennent à programmer des situations bien définies (aux règles précises), où il est possible de tester les programmes par les résultats obtenus. Les techniques d'intelligence artificielle utilisées pour programmer les logiciels de jeux ont mis en lumière les différences d'efficacité entre la force brute de calcul des machines et la manière humaine de raisonner, plus intuitive.

Les informaticiens se sont attaqués aux jeux dès que la première ligne de programmation a été écrite. En 1946, le mathématicien britannique Alan Turing conçut une machine à jouer aux échecs fondée sur la machine de décryptage *Enigma*, utilisée par l'armée

britannique pendant la Seconde Guerre mondiale. Le niveau de cette première machine était celui d'un débutant. Turing et ses collègues de l'Université de Manchester s'attaquèrent ensuite à la programmation du morpion et des dames américaines, plus simple.

Depuis lors, les programmes de jeux ont proliféré. Actuellement les meilleurs d'entre eux jouent en général assez bien, mais ils utilisent des techniques assez différentes des techniques humaines. En effet, dans un jeu comme les échecs, quand un joueur humain examine quelques dizaines (au mieux, quelques centaines) de positions pour décider quel coup jouer, une machine en analyse plusieurs milliards. Pourtant l'homme gagne encore à certains jeux ! C'est parce que, s'il examine seulement une poignée de positions possibles, il regarde « la bonne poignée ». Le champion du monde d'échecs de 1921 à 1937, Raoul Capablanca, à qui on avait demandé combien de mouvements il envisageait dans l'analyse d'une position d'échecs, répondit : « Un seul, mais le bon. »

Notons, déterminons les meilleures positions à étudier par un processus d'identification des structures (*pattern matching*). C'est par ce processus que nous découvrons immédiatement qu'un plateau sur quatre pieds est une table, et que les photographies de face et de profil d'un gangster interpellé par la police sont celles d'une même personne. Un joueur d'échecs professionnel compare une position sur l'échiquier avec le nombre fantastique de celles qu'il a rencontrées au cours de sa carrière, et utilise ce qu'il a appris de l'analyse de ces positions pour déterminer de bons coups dans la partie en cours. Ce processus est plus ou moins conscient.

Cette identification de structure est un processus parallèle ; avec  $n$  cerveaux, vous allez  $n$  fois plus vite. Supposons que vous compariez une

position d'échecs aux 100 000 que vous avez déjà rencontrées : comme chaque comparaison est dans une grande mesure indépendante des autres, avec 100 000 cerveaux vous comparez presque 10 000 fois plus vite.

Au contraire, l'exploration de la suite des coups possibles n'est pas un processus parallélisable : ce que vous pouvez jouer dépend de ce que vous avez fait à l'étape précédente. Le programme de *Deep Blue* ne compare pas une position à une liste de positions pré-existantes et il ne peut examiner une position que s'il a déjà obtenu la position précédente.

Quand nous affirmons qu'une identification de structure est parallélisable, c'est qu'une recherche par exploration calculatoire brutale ne l'est pas, cette assertion ne porte pas sur le problème à résoudre, mais sur la méthode pour le résoudre. Le jeu d'échecs n'est pas, dans son essence, parallèle ou séquentiel, car aussi bien les techniques parallèles (l'identification des structures) que séquentielles (la recherche « bêtement » calculatoire de *Deep Blue*) s'appliquent au jeu.

## La fonction calculatoire ne crée pas l'organe...

Garry Kasparov, comme n'importe quel joueur humain, utilise une technique parallèle, parce que son cerveau opère ainsi : le cerveau est une machine parallèle composée d'environ 100 milliards de neurones capables chacun d'un millier d'opérations par seconde. Environ 30 milliards de neurones sont disposés en six couches dans le cortex, la *moelle grise* (les neurones qui « pensent ») formant les circonvolutions extérieures du cerveau humain. Les

**1. PORTRAIT DE JOUEURS D'ÉCHECS**, par Marcel Duchamp, qui fut membre de l'équipe de France d'échecs.



70 milliards d'autres neurones constituent la matière blanche (les neurones «de liaison»). Cette architecture massivement parallèle, efficace pour identifier une structure, maîtrise mal le calcul séquentiel.

En opposition, *Deep Blue* contient seulement 480 processeurs spécifiques des échecs, capables chacun d'examiner environ 200 millions de positions par seconde. Cette configuration, qui permet d'analyser rapidement les positions, confère au programme un avantage certain, mais elle a aussi des inconvénients. Même le plus puissant des ordinateurs imaginables – effectuant

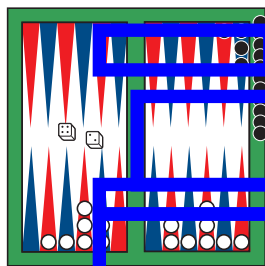
$10^{17}$  opérations à la seconde (une opération est le temps nécessaire à la lumière pour traverser un atome d'hydrogène) – ne pourrait qu'effleurer la résolution d'un jeu comme le go, où le nombre de positions possibles est environ  $10^{170}$ .

Lorsque les hommes jouent à un jeu comme othello qui nécessite une recherche pour le meilleur coup parmi un grand nombre de positions, ils peuvent traiter des milliards d'informations par seconde : un neurone de traitement est un million de fois moins rapide. Ça. Du fait de la lenteur de notre cerveau, nous ne

pouvons en général pas utiliser de telles méthodes séquentielles.

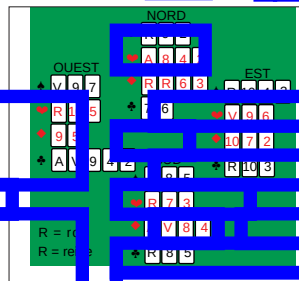
Évidemment, même si 1 000 opérations par seconde est relativement peu, les joueurs humains n'en appliquent pas moins une méthode séquentielle dans des cas particuliers, les finales aux échecs, par exemple. Nous utilisons aussi de telles méthodes pour multiplier à la main de grands nombres, pour résoudre des casse-tête comme le cube de Rubik, ou trouver la solution du problème de traversée d'une rivière à trois missionnaires et trois cannibales, à l'aide d'une seule barque qui peut ne contenir que deux

## JEUX PRATIQUÉS PAR LES ORDINATEURS



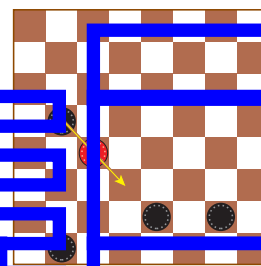
### BACKGAMMON

- 2 joueurs
- 15 pions chacun
- but : faire traverser le tableau à tous ses pions
- règles
- le résultat du jet de dés détermine le nombre de mouvements à faire
- les joueurs se déplacent en sens opposé
- les pions ne peuvent pas se placer sur une colonne occupée par deux pions adverses ou plus
- un pion peut être «frappé» par un autre qui aboutit sur la même flèche. Un pion frappé repart du début
- programme : TB Cannon
- site Internet : [www.research.ibm.com/massdist/tcl.html](http://www.research.ibm.com/massdist/tcl.html)
- prédominance : situation serrée



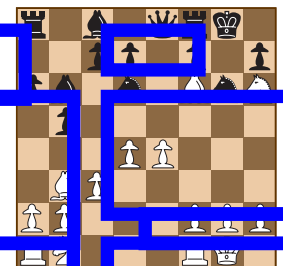
### BRIDGE

- 4 joueurs répartis en deux équipes
- 13 cartes distribuées à chaque joueur
- but : réussir deux «manches» ou un «robre»
- règles
- les annonces : chaque joueur annonce par un code ouvert combien de points il va faire
- le jeu : on pose la carte à chaque tour et on les compare : on le fait 13 fois
- le score : on marque des points si on remplit son contrat. Sinon, c'est l'équipe adverse qui marque
- programme : GIB
- site Internet : [www.gibware.com](http://www.gibware.com)
- prédominance : humaine



### DAMES AMÉRICAINES (OU CHECKERS)

- 2 joueurs
- 12 pions chacun
- but : empêcher l'autre de pouvoir jouer (habituellement c'est quand il n'a plus de pion)
- règles
- on déplace à chaque coup un pion sur une diagonale noire, d'une case vers l'avant
- on capture les pièces adverses en sautant par-dessus en diagonale s'il y a une case vide derrière le pion adverse
- un pion qui arrive sur la dernière ligne dans le camp opposé se transforme en «dame», une pièce qui peut bouger vers l'avant et vers l'arrière
- programme : Chinook
- site Internet : [www.cs.ualberta.ca/~chinook](http://www.cs.ualberta.ca/~chinook)
- prédominance : machine



### ÉCHECS

- 2 joueurs
- 16 pions chacun (1 roi, 1 dame, 2 tours, 2 fous, 2 cavaliers, 8 pions)
- but : capturer le roi adverse (échec et mat)
- règles
- on capture une pièce adverse en plaçant sur la case qu'elle occupe l'une de ses propres pièces
- chaque type de pièce a des possibilités de mouvements différentes
- programme : *Deep Blue*
- site Internet : [www.chess.ibm.com/meet/html/d.3.html](http://www.chess.ibm.com/meet/html/d.3.html)
- prédominance : situation serrée

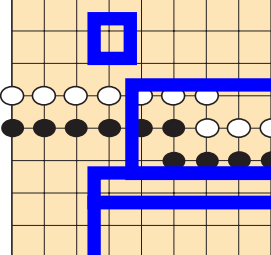
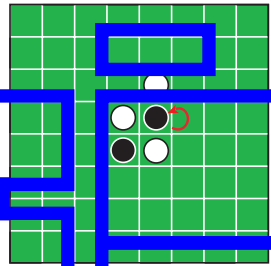
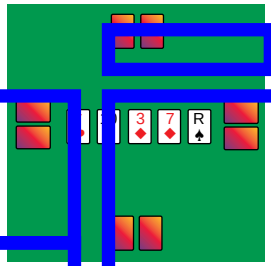
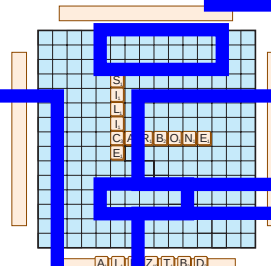
\* Logiciel en vente dans le commerce et fonctionnant sur ordinateur personnel.

personnes au maximum. (De la sorte, sur chaque rive, le nombre de cannibales n'excede jamais le nombre de missionnaires : faute de quoi ces derniers se feraient manger ; dans une version plus politiquement correcte, le nombre de missionnaires ne doit pas excéder celui des cannibales, sinon les missionnaires les convertissent...) Bien que nous raisonnions parfois ainsi, ce mode de pensée nous semble peu naturel, car nous avons habituellement recours à des méthodes parallèles. En revanche, les machines excellent à ce mode de recherche exhaustive (elles ont été fabriquées pour cela).

Les ordinateurs augmentent leur capacité de jeu grâce à des puces plus rapides et à des programmes plus efficaces plus rapidement que les joueurs humains s'améliorent leur jeu. Dans la majorité des programmes de jeux, l'ordinateur est programmé pour n'analyser qu'un certain nombre de coups possibles, voisins de la position obtenue, afin d'éviter des recherches trop longues (on n'explore qu'une petite fraction de l'arbre des positions). On évalue ces coups au moyen d'un algorithme appelé minimax. Un raffinement de cet algorithme, appelé l'élagage alpha-bêta, permet à l'ordinateur de calculer ces

évaluations sans considérer l'intégralité des coups possibles jusqu'à une certaine profondeur. Cette stratégie permet à l'ordinateur d'optimiser sa recherche en fonction de ses capacités de calcul.

On conçoit des ordinateurs d'échecs qui jouent d'une manière plus « humaine », mais leurs performances restent modestes. Herbert Simon, de l'Université Carnegie Mellon, pense que l'architecture des ordinateurs leur interdit tout raisonnement de type humain : « Il se pourrait qu'à cause des différences radicales entre les dispositifs électroniques et le cerveau, les programmes conçus pour être efficaces dans

| GO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | OTHELLO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | POKER TEXAN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | SCRABBLE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 joueurs</li> <li>• pierres blanches et noires</li> <li>• la taille du plateau (goban) : 19 par 19 (361 intersections)</li> <li>• but : conquérir le territoire le plus grand (les territoires conquis comprennent les pierres placées sur le goban et les zones qui pourraient être occupées sans risque)</li> <li>• règles :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• chaque camp place à son tour une pierre sur le goban</li> <li>• les pierres entourées par des pierres adverses sont capturées et retirées du plateau</li> </ul> </li> <li>• programme : Handtalk*</li> <li>• site Internet : <a href="http://www.webwind.com/go">www.webwind.com/go</a></li> <li>• prédominance : humaine, et de très loin</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 joueurs</li> <li>• pions noirs et blancs</li> <li>• but : avoir le plus grand nombre de pions de sa couleur à la fin de la partie</li> <li>• règles :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• les joueurs placent chacun à leur tour un pion sur une case inoccupée</li> <li>• si des pions adverses sont coincés entre deux pions du joueur, on les retourne pour changer leur couleur</li> </ul> </li> <li>• programme : Logistello</li> <li>• site Internet : <a href="http://www.neci.nj.nec.com/homepage/mic/log.html">www.neci.nj.nec.com/homepage/mic/log.html</a></li> <li>• prédominance : machine</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• de 3 à 20 joueurs</li> <li>• 2 cartes distribuées à chaque joueur, 5 placées au centre du plateau</li> <li>• but : obtenir la meilleure main pour remporter le « pot »</li> <li>• règles :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• les 5 cartes centrales sont distribuées face cachée</li> <li>• après le premier tour d'enchères, on dévoile trois cartes communes</li> <li>• dans les tours d'enchères suivants on retourne la quatrième et la cinquième carte commune.</li> <li>• les joueurs choisissent parmi leurs cartes et les cartes communes la plus forte main possible selon la hiérarchie du poker normal.</li> <li>• on termine sur un dernier tour d'enchères.</li> </ul> </li> <li>• programme : LOKI</li> <li>• site Internet : <a href="http://www.cs.ualberta.ca/games/poker">www.cs.ualberta.ca/games/poker</a></li> <li>• prédominance : humaine, et de très loin</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 à 4 joueurs</li> <li>• 100 pions-lettre</li> <li>• but : obtenir le meilleur total de points</li> <li>• règles :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• chaque joueur tire 7 lettres</li> <li>• chaque lettre a une valeur</li> <li>• les cases du plateau ont une valeur</li> <li>• les mots faits doivent être placés en ligne ou en colonnes</li> </ul> </li> <li>• programme : Maven* (utilisé dans le CD-ROM de Scrabble)</li> <li>• site Internet : <a href="http://www.has-bros-scrabble.com/cd/cd.html">www.has-bros-scrabble.com/cd/cd.html</a></li> <li>• prédominance : machine, avec une faible marge</li> </ul> |



Jonathan Elderfield, Gamma Liaison

**2. GARRY KASPAROV, le meilleur joueur du monde au jeu d'échecs, a été battu par le programme Deep Blue d'IBM (deux victoires, une perte, deux nulles).**

programmes intelligents ont une architecture et un fonctionnement totalement différents des dispositifs conçus pour imiter le raisonnement humain.» Ainsi nous évaluerions mal ce qui est efficace pour la machine.

## La programmation dépend du jeu

Certains problèmes sont mieux résolus par identification de structure, d'autres par une recherche séquentielle. Le go semble être un problème parallèle, othello séquentiel. D'autres jeux, tels les échecs, sont analysables par les deux méthodes.

Cette distinction subsiste pour les jeux à information partielle, où les joueurs ne connaissent pas toutes les cartes, ou autres éléments de jeu, détenus par leurs adversaires (dans un jeu à information complète, les joueurs connaissent l'intégralité de l'état de la partie ; le backgammon, les échecs, les dames et othello en sont des exemples). La programmation a longtemps été assez inefficace dans les jeux à information partielle. Au poker et au bridge, les hommes utilisent souvent leur expérience et leur intuition pour bien jouer et les ordinateurs sont désavantagés, car ils ont beaucoup trop de possibilités à envisager.

Récemment toutefois, des moyens de calcul massivement parallèles ont permis de résoudre certains jeux à information partielle. Daphne Koller et Avi Peffer, de l'Université de Stanford, pen-

sent qu'il sera bientôt possible de «résoudre» le poker, c'est-à-dire d'y jouer parfaitement. Leur opinion se fonde sur l'algorithme performant qu'ils ont conçu pour jouer à un poker réduit avec un jeu de 8 cartes. Existera-t-il un jour une puissance de calcul suffisante pour utiliser la même approche avec 52 cartes ? La question reste ouverte.

Au bridge, on commence aussi à tirer parti de la puissance des méthodes exhaustives de recherche. Alors que les premiers programmes cherchaient à imiter la pensée humaine, l'approche moderne est la suivante : on distribue aux adversaires, à plusieurs reprises, des mains spécifiques tirées aléatoirement puis le résultat est analysé en supposant connues les positions de toutes les cartes. Cette approche détermine le meilleur choix de jeu dans un grand nombre de cas particuliers à jeux connus et, *in fine*, la tactique choisie est celle qui est la meilleure dans le plus grand nombre possible de cas particuliers aléatoires.

Là encore, ce type d'analyse est possible grâce à des puissances de calcul de plus en plus grandes. Bien que les meilleurs joueurs surpassent encore les meilleurs programmes, l'écart se réduit. Là encore, de même qu'aux échecs, les programmes qui essaient de copier la pensée humaine ne sont pas au niveau de ceux qui effectuent une recherche exhaustive, tels que le programme de bridge.

Dans tous ces cas, la conjecture de Herbert Simon sur l'importance

innée de l'architecture s'est révélée justifiée. Les ordinateurs de jeux les plus puissants ressemblent peu aux joueurs humains. Seul le backgammon semble faire exception : Gerald Tesaro de la Société IBM a créé un programme dénommé TD-Gammon qui semble, du moins à première vue, avoir une architecture de type humain : il utilise des réseaux de neurones formels qui imitent, dans une certaine mesure, la fonction et la structure des neurones humains.

## Triomphes et faiblesses des ordinateurs

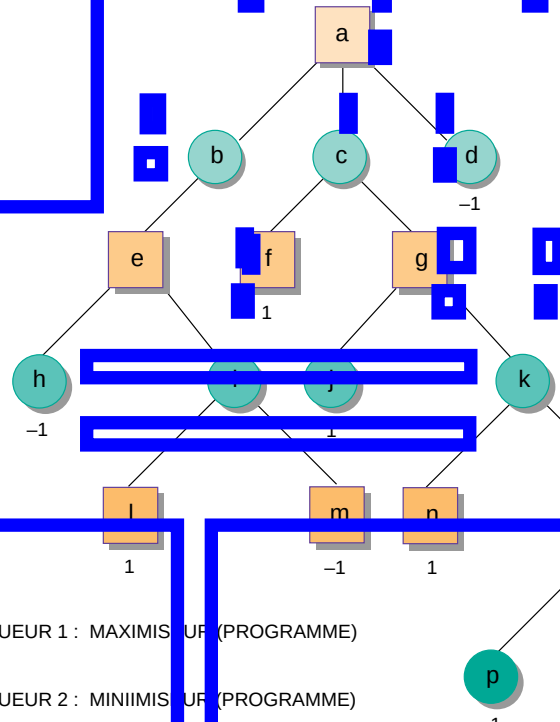
La nature du jeu, et donc le type de méthode qui aboutit au meilleur résultat, détermine qui l'emporte, de l'homme ou de la machine. Les machines excellent aux dames américaines (checkers), un jeu qui utilise une recherche profonde (analyse d'un grand nombre de coups) pour évaluer les combinaisons possibles. Dès qu'il reste huit pions ou moins en jeu, le meilleur programme de dames actuel, *Chinook*, sait immédiatement si la position est gagnante. Le programme trouve le résultat en utilisant un énorme catalogue de fins de parties. *Chinook* a stocké dans ce catalogue les positions et leur valeur associée en termes de gains, et le programme consulte cette table pour évaluer le résultat de la position.

Les machines disposent à othello d'un formidable avantage, car il est quasi impossible de voir d'un coup d'œil, à un moment donné de la partie, qui sont en train de gagner. Les jetons se retournent dans un sens ou dans l'autre si fréquemment que le fait d'avoir une plus grande quantité de jetons de sa couleur n'indique pas nécessairement que la position obtenue est gagnante. En d'autres termes, othello est un jeu difficile à jouer en utilisant l'identification de structures, mais il est parfaitement adapté aux méthodes de recherche par force brute calculatoire des machines, donc elles y excellent.

En revanche, le go est le talon d'Achille des ordinateurs. À ce jeu, l'expert humain a une intuition générale reconnaissant si un gros motif de pierres est mort (encerclé et promis à une capture prochaine), vivant (imprenable) ou si son sort est encore incertain ; pas l'ordinateur. Jouer au go en utilisant le calcul brutal est extrêmement difficile, car à

## COMMENT « PENSENT » LES PROGRAMMES DE JEUX

L'algorithme minimax affecte à un joueur une valeur positive et à l'autre une valeur négative (dans l'exemple présent, l'ordinateur est le joueur 1, le maximiseur ; et l'homme le joueur 2, le minimiseur). Une fois établie, la valeur de chaque nœud peut être interprétée comme favorable au maximiseur (le joueur «positif») ou au minimiseur (le joueur «négatif»). Chaque nœud représente la position de toutes les pièces après un mouvement et, plus généralement, l'état de la partie.



L'élagage alpha-bêta élimine les parties de l'arbre qui représentent un moins bon choix que d'autres branches. Par exemple, si l'ordinateur a déterminé qu'il peut gagner en jouant le nœud  $c$ , quelque soient les répliques du joueur 2, il n'a pas besoin d'examiner les autres possibilités issues du nœud  $a$ .

tout moment de la partie il y a environ 250 coups possibles (contre approximativement 30 seulement aux échecs et à othello). Construire une table des fins de parties au go, comme celle concoctée par *Chinook*, est hors des possibilités de calcul de l'ordinateur.

Et les autres jeux? Le combat pour le titre de meilleur joueur de backgammon est acharné, et cette quasi-égalité homme-machine persistera probablement, car la relative simplicité du jeu fait que joueurs et machines jouent presque à la perfection. Au scrabble aussi, le combat est douteux, mais ne le restera vraisemblablement pas, car les machines vont améliorer leur stratégie (les machines et les hommes n'ont tous deux aucune difficulté à trouver, à un point donné du jeu, le mot qui rapporte le plus, mais le scrabble à haut niveau impose aussi de bien gérer les lettres restantes et à minimiser les possibilités de l'adversaire). Les hommes ont gagné en 1997 un match à deux parties, mais ils ont perdu un match en 11 parties en 1998.

La situation au bridge va probablement se resserrer d'ici cinq ans, car les machines sont de plus en plus puissantes et les algorithmes s'améliorent. Les hommes ont gagné de justesse un

match de deux heures en juillet dernier, et aux championnats du monde de bridge 1990, en août à Lima, mon programme de bridge s'est placé douzième parmi les 14 meilleurs joueurs de bridge du monde. Toutefois, il s'agissait de donner préparées et uniquement le jeu de la carte (pas les enchères).

## Jouer ensemble agréablement

Depuis les débuts de l'intelligence artificielle, les progrès des algorithmes séquentiels amènent succès après succès. Ces succès ne se limitent pas à la programmation des jeux : les algorithmes séquentiels sont les méthodes les plus efficaces pour décider de l'ordre d'assemblage des différentes pièces d'un Boeing 747. Ces algorithmes fournissent des plans de production 10 à 20 pour cent plus rapides que ceux élaborés par les hommes. L'identification des structures et les techniques parallèles ne sont pas très bien adaptées aux problèmes de planification de tâches complexes, car un plan qui a l'air bon peut ne pas l'être.

Dans un futur proche, les hommes seront meilleurs que les machines pour résoudre les problèmes parallèles, et

les machines resteront supérieures pour les traitements par voie séquentielle. Il n'y a là rien de particulièrement surprenant ou d'effrayant; nous avons conçu ces machines (avions et chariots élévateurs) pour accomplir des tâches dont nous sommes incapables, comme voler ou soulever des charges extrêmement lourdes. Aux Jeux olympiques, nous ne nous sentons pas tenus de mettre en compétition les chariots élévateurs et les haltérophiles.

Les machines intelligentes ne sont pas nos collaborateurs. Les complémentarités de l'homme et de la machine permettent de résoudre des problèmes qu'aucun des deux n'aurait pu résoudre isolément. Et après tout, ce sont les hommes qui programment les machines...

Malgré tout, le **Dr. Andrew GINSBERG** est chercheur à l'Université de l'Oregon et fondateur du *Computational Intelligence Research Laboratory* (CIRL) de cette université. Ginsberg pense que son programme de bridge, GIB, sera champion du monde d'ici cinq ans.

*La mathématique des jeux*, Éditions Pour la Science, 1988.



# L'intelligence des robots

ARAB ALI CHERIF

*Pour organiser les tâches d'un groupe de robots mobiles, les roboticiens les dotent d'une organisation sociale sous la forme de règles économiques et constitutionnelles.*

Première loi : un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger.

Deuxième loi : un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la première loi.

Troisième loi : un robot doit protéger son existence, dans la mesure où cette protection n'est pas en contradiction avec la première ou avec la deuxième loi.

Les lois de la robotique, Isaac Asimov

Dans les années 1950, l'écrivain de science-fiction Isaac Asimov énonçait les trois lois de la robotique. Dans un monde où cohabitent humains et robots, ces lois devaient éviter les conflits et assurer l'harmonie sociale. Au fil de ses romans, Asimov montrait les paradoxes et les conflits qui émergeaient de la stricte application de ses lois. Ces lois «de bon sens» étaient insuffisantes et nous verrons, à la lueur des recherches actuelles, que des énoncés plus élaborés sont nécessaires.

L'utilisation d'un groupe de robots pour effectuer une tâche renoue avec les origines de l'intelligence artificielle des années 1960 : à l'époque, on cherchait à fabriquer des robots intelligents. Aujourd'hui, les difficultés ne sont pas tant les perfectionnements d'un robot, mais la coordination des efforts de plusieurs. En particulier, le risque de collisions et de conflits, augmente avec le nombre de robots.

Comment amener les robots à coopérer? Une solution consiste à utiliser un contrôleur extérieur qui dispose d'une vue globale sur le groupe de robots. Cependant, cette solution centralisée est peu fiable et peu efficace, puisqu'elle exclut la parallélisation des tâches, ainsi que l'autonomie de décision. Le robot

envoyé sur Mars lors de la mission *Pathfinder*, en juillet 1997, devait attendre 20 minutes pour chaque ordre émanant de la Terre. Face à une situation de crise, ce délai peut être fatal : l'autonomie est indispensable. Aussi avons-nous exploré une nouvelle voie : le contrôle distribué, où la coordination se fait localement et où chaque robot synchronise son action avec les autres robots.

Cette démarche présente plusieurs avantages. Premièrement, les calculs sont autonomes, et la réaction aux événements, tels que l'évitement d'obstacles et la communication entre robots, se fait en temps réel. Deuxièmement, la redondance des unités autonomes augmente la fiabilité du système : la disparition d'un robot est pénalisante, mais pas rédhibitoire. De surcroît, alors qu'un système centralisé doit coordonner tous les robots et leurs capteurs, un robot autonome ne gère que ses propres capteurs et actionneurs, de sorte que la gestion de la commande est allégée. Troisièmement, nous voyons apparaître expérimentalement des comportements nouveaux entre robots, tels des comportements «égoïstes», sans que ces comportements soient explicitement programmés. Enfin, cette structure permet la spécialisation d'un robot, ou d'un groupe de robots, pour une tâche déterminée, comme l'entretien ou la recharge en énergie des autres robots.

Les premiers travaux sur les groupes de robots mettaient en œuvre des robots réactifs, c'est-à-dire des robots qui réagissent à un stimulus externe, comme un obstacle. Nous verrons que les groupes de robots réactifs ne sont pas adaptés à l'accomplissement de tâches complexes, puis, nous examinerons la solution adoptée pour le travail collectif des robots : un groupe de robots auto-

nomes qui interagissent à l'aide de règles microéconomiques et dont les conflits sont gérés par une constitution. Dans notre cas, nous avons programmé notre société de robots pour ramasser du minéral, mais d'autres tâches peuvent être assignées, tel le déminage.

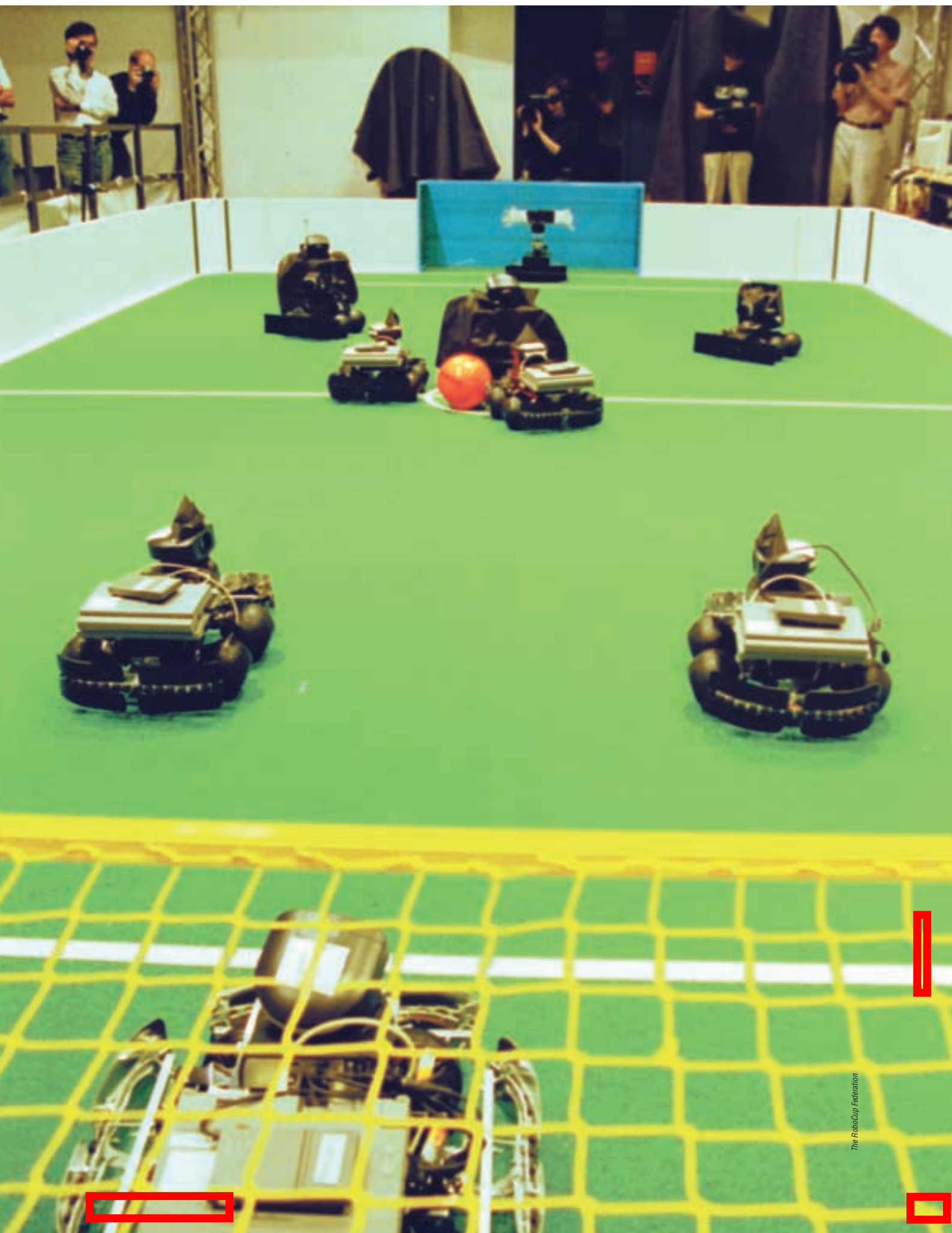
## Des fourmis aux robots

La plupart des travaux sur la robotique collective sont essentiellement des modélisations et des simulations. Bien avant l'apparition de la discipline de la vie artificielle, des chercheurs étudiaient les capacités collectives de certains insectes, tels les termites, les fourmis ou les guêpes, en vue d'appliquer ces capacités à la robotique ou, plus généralement, à l'informatique.

Les fourmis rousses, par exemple, fabriquent des dômes de brindilles dont le diamètre atteint 20 centimètres. Comment des fourmis sans compétences particulières s'organisent-elles pour former un dôme dont, individuellement, elles n'ont pas conscience? En 1972, l'éthologue français Rémy Chauvin et l'économiste Georges Galais-Hamonno ont modélisé cette construction du dôme de brindilles. De ces exemples naturels émergea une idée : un groupe d'individus pouvait être plus efficace qu'un unique individu hyperspécialisé autonome.

En 1986, sous l'impulsion de Rodney Brooks, de l'Institut de technologie

**1. LES ROBOTS FOOTBALLEURS illustrent le fonctionnement en groupe des robots. Dans ce jeu d'équipe, la commande des robots est assurée par un ordinateur central qui collecte et analyse les données d'une caméra pour établir la stratégie de jeu. Lorsque l'objectif n'est pas de marquer un but, mais de déminer un terrain, ou de ramasser du minéral, une stratégie coopérative non centralisée est mieux adaptée.**



du Massachusetts (MIT), apparut une nouvelle conception de la robotique : alors que les spécialistes de l'intelligence artificielle cherchaient à construire des machines autonomes au comportement élaboré, c'est-à-dire capables d'actions intelligentes résultant d'un raisonnement calqué sur le raisonnement humain, la nouvelle conception hiérarchisait les comportements.

Cette architecture décompose le comportement global d'un robot en un ensemble de tâches élémentaires. La priorité entre les comportements est définie par le concepteur et elle est figée une fois pour toutes. Aussi le choix des priorités adéquates est-il primordial. Les robots fondés sur cette architecture sont nommés réactifs, car leur comportement est dicté par une réaction à un stimulus extérieur. L'un des robots réactifs le plus simple est un robot qui modifie sa route à chaque obstacle détecté.

Cette architecture semble efficace pour les tâches simples, telles que l'exploration d'environnements inconnus, l'évitement d'obstacles, le ramassage des canettes vides de boisson gazeuse. En revanche, pour des tâches complexes où coexisteraient des priorités de même niveau, elle est difficile à mettre en œuvre, même si des méthodes de gestion de priorités de même niveau ont été mises au point.

En 1988, Marvin Minsky, du MIT, a proposé d'utiliser des groupes d'agents (des logiciels) pour obtenir un comportement global intelligent. Malheureusement, l'application de cette démarche était limitée à un groupe

de robots virtuels dotés d'un système de communication : autrement dit, on simulait l'interaction d'un groupe de robots réactifs, mais on ne faisait pas d'expériences en vraie grandeur.

Lorsque l'on fait interagir un groupe de robots réactifs virtuels (en pratique, des programmes), on peut résoudre des problèmes complexes, à condition de faire interagir de très nombreux robots virtuels et de coordonner les réactions simples de ces robots pour atteindre un objectif complexe. Ces problèmes d'échelle et de coordination sont résolus partiellement par la simulation : la puissance de calcul permet de faire interagir de nombreux robots virtuels tandis que les langages de programmation autorisent la programmation de toutes sortes de comportements.

Ainsi, grâce aux simulations, on explore des situations qui prendraient trop de temps avec des expériences. Cependant, dans la réalité, quel sera le comportement d'un robot réactif en présence de  $N$  stimulus conduisant à  $N$  réactions possibles, dont certaines peuvent être contradictoires? Comment se comportera un robot réactif face à un environnement sans stimulus?

## La limite des robots réactifs

Si l'on souhaite qu'un robot ramasse des échantillons de minerai, il faut que le robot ait ce réflexe dès qu'il voit un minerai. Cela suppose donc qu'il distingue un caillou quelconque d'un minerai. Nous avons été confrontés à

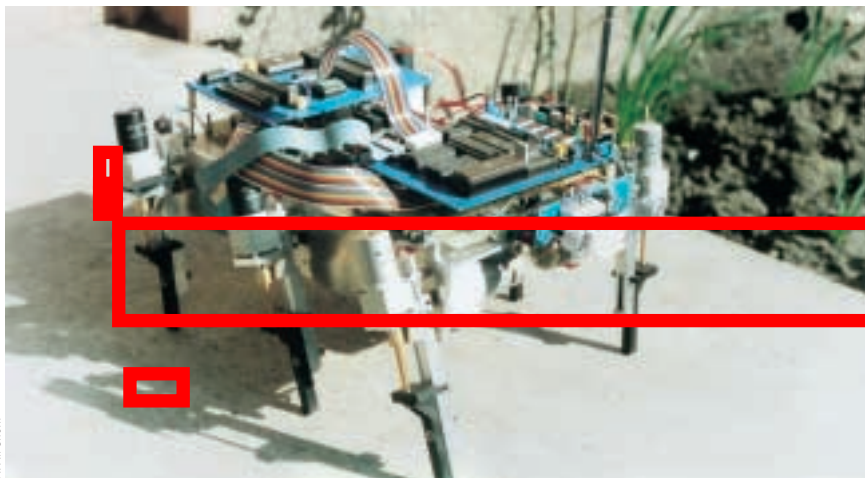


**2. LE ROBOT EXPÉRIMENTAL APE** est programmé pour aller chercher du café. Mais, il ne distingue pas le café du chocolat : il n'est pas adapté à un environnement varié.

ce type de problèmes avec notre robot APE (voir la figure 2). Ce robot, conçu pour aller chercher du café à la machine à café de l'étage et pour le rapporter au Laboratoire d'intelligence artificielle, ne distingue pas le café du chocolat. Autrement dit, l'environnement doit être parfaitement adapté à cette «action réflexe» ou l'on doit faire en sorte que le mécanisme de reconnaissance du café, sur lequel porte l'action réflexe, soit prévu. Ainsi, la nature d'une action réflexe doit être définie au préalable.

Cet exemple illustre la difficulté de confier une mission explicite à un robot réactif. L'utilisation d'un groupe de robots semble mieux adaptée à la réalisation d'une tâche complexe, mais pose de nouvelles questions. Quels modèles de comportement les robots doivent-ils adopter? Comment arbitrer et résoudre les conflits engendrés par la coopération et par le partage de ressources (sensorielles, par exemple) entre robots? Comment chaque robot doit-il travailler pour atteindre l'objectif final assigné au groupe?

Pour structurer notre groupe de robots, nous l'avons muni d'une orga-



**3. LE ROBOT MARCHEUR**, utilisé dans les expériences de comportement collectif, est équipé de douze moteurs électriques, d'une architecture parallèle qui comprend quatre processeurs, d'un sonar, d'une radio multi-fréquences et d'une boussole électronique. Selon le type d'application (ramassage de minerai ou déminage), on lui adjoint les instruments nécessaires.

nisation légale formée d'une microéconomie et d'une constitution. À cet effet, nous introduisons la notion d'intérêt matériel pour chaque robot. Trois principaux comportements d'économie de marché structurent le groupe : le partage rémunéré de capacités sensorielles, le partage rémunéré de la mémoire, enfin la négociation pour l'achat et la vente d'informations sur l'environnement. De son côté, la constitution, implantée dans chaque robot, garantit la stabilité de la structure du groupe, qui peut être perturbée par les conflits issus des négociations.

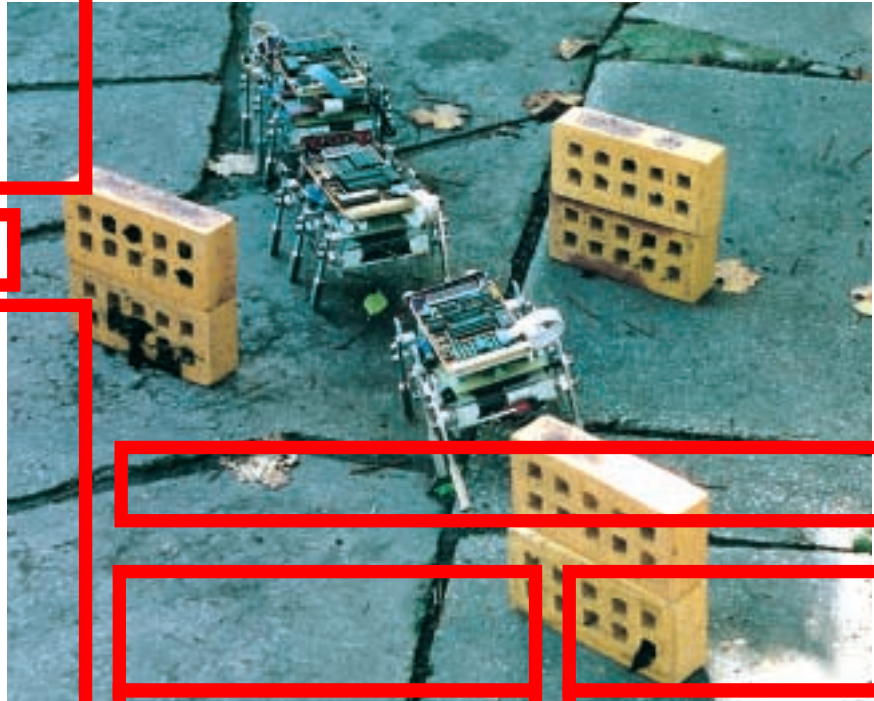
### Les intérêts individuels et les intérêts collectifs

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressource, ou comme consommateur. Lorsqu'un robot veut en recruter un autre pour une tâche donnée, les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité : le gain d'énergie proposé par le robot recruteur, moins l'énergie nécessaire au robot pour se rendre sur le site de travail, moins l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche (initialement, les robots ont leurs batteries électriques pleines, et ils sont payés en énergie électrique).

Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable. Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas rentable, car la dépense d'énergie nécessaire pour satisfaire la demande est supérieure au gain. Si la fonction d'utilité est nulle, le choix d'accepter ou de refuser est aléatoire.

Cette minimisation des coûts de déplacement est également présente dans l'économie des transports urbains. Dans la plupart des grandes villes, les voyageurs ont le choix, pour se rendre à leur travail, entre les transports en commun et le véhicule individuel. Pour choisir entre les possibilités, chaque voyageur prendra en compte le temps de parcours, le temps d'attente et le coût. En attribuant une valeur à chacune de ces caractéristiques, il calculera une fonction d'utilité dont le résultat déterminera son choix. Pour un robot, l'évolution de la fonction d'utilité déterminera ses actions.

Ainsi, dans notre construction, la motivation personnelle de chaque robot est l'intérêt matériel. L'intro-



**4. LES TROIS ROBOTS MARCHEURS coopèrent : dans un environnement couvert d'obstacles, le robot de tête met son sonar à la disposition des robots qui le suivent. Ces derniers économisent ainsi leurs ressources en énergie.**

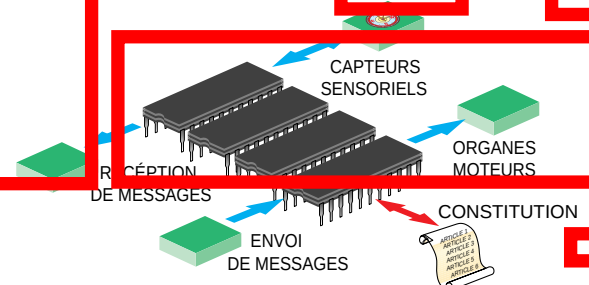
duction d'une économie dans une organisation collective régle la coopération, la division du travail et le partage des ressources entre les robots.

Avec pour motivation personnelle un enrichissement matériel, nous voyons apparaître des structures d'organisation collective : coalitions de robots pour la recherche du minéral, contrats entre robots pour le prêt et la location d'organes sensoriels, des contrats de services de robots pour d'autres robots contre une rémunération fixée après négociation, voire des quiproquos entre robots qui ne se comprennent pas bien.

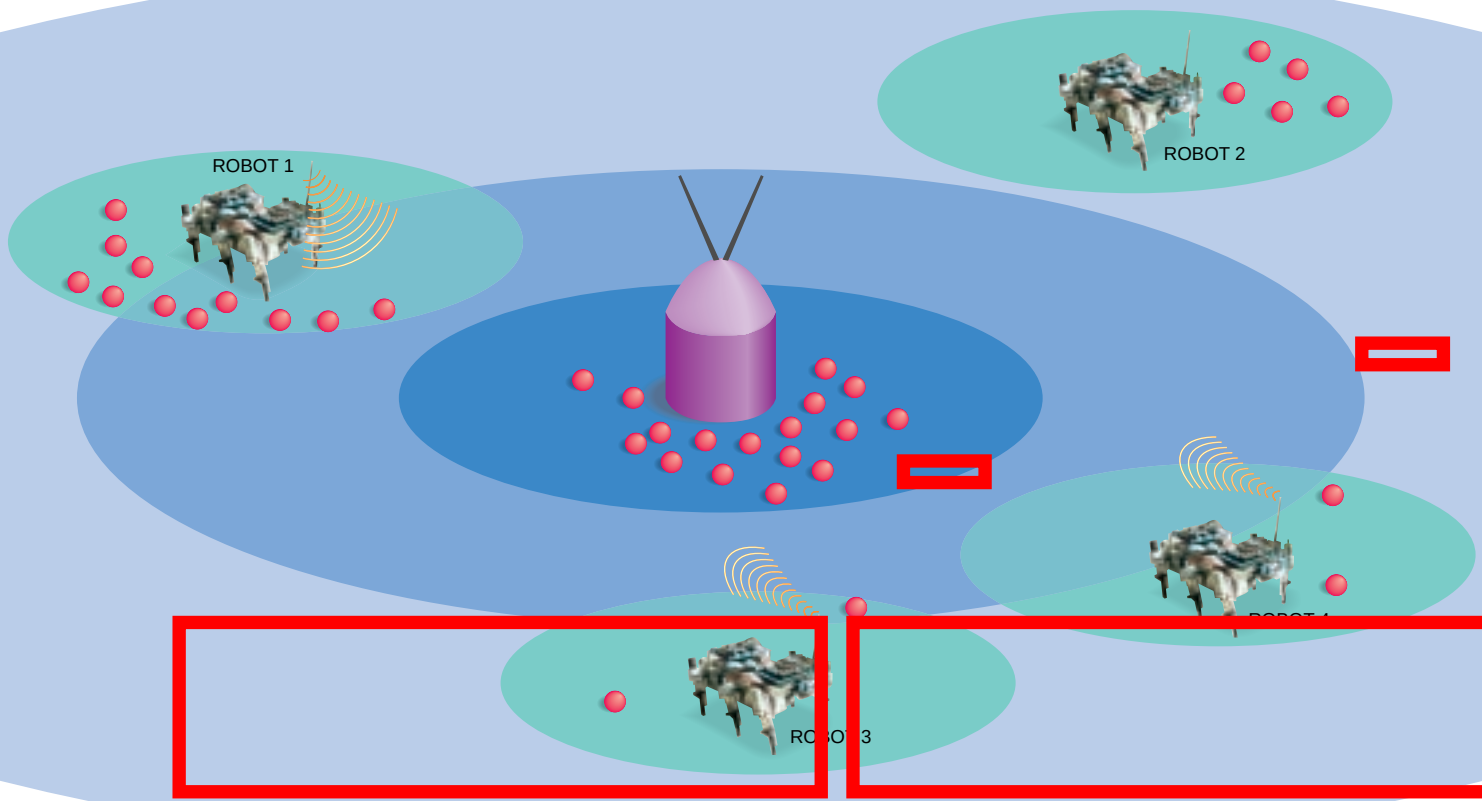
Certaines situations de coopération rencontrées sont analogues au dilemme du prisonnier. Dans ce dilemme, on interroge deux prisonniers sur la culpabilité de leur complice et « l'autorité » détermine la sévérité de leur peine selon leur réaction. Si tous deux coopèrent (ne dénoncent pas leur complice), l'autorité leur inflige une peine de prison de un an ; lorsque les deux trahissent (en se dénonçant), il se voit infliger chacun une peine de cinq ans ; quand l'un des prisonniers trahit, tandis

que l'autre coopère, le traître est libéré et l'autre est condamné à dix ans de prison. Les prisonniers doivent-ils s'entraider ou non ?

Imaginons la situation où l'un des robots trouve un gisement de minéral tellement important que, ne pouvant l'exploiter seul, il souhaite engager la totalité du groupe. Les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité qu'ils transmettent au robot recruteur. Ce dernier calcule alors la fonction d'utilité du groupe qui est la somme des fonctions d'utilité individuelle des robots. Si cette fonction est positive, et si, individuellement, l'un des robots a une fonction d'utilité négative, le der-



**5. LE ROBOT MARCHEUR traite l'information à l'aide de quatre microprocesseurs. Ce sont eux qui font les calculs nécessaires aux négociations microéconomiques. En cas de conflit entre deux robots, la constitution embarquée par chaque robot (des petits programmes et des circuits logiques) est chargée de les départager.**



6. LE TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION est une zone de dix mètres de diamètre. Au centre, une balise de repérage auprès de laquelle les robots déposent le minéral ramassé. Les robots explorent leur environnement. Dans sa zone de prospection (*disque vert*), le robot 1 trouve plus de minéral qu'il ne peut en ramasser. Il émet alors un message pour recruter un robot. Deux robots (3 et 4) sont intéressés par l'offre (le robot 2 n'est pas intéressé, car il a du travail

dans sa zone de prospection). Si les robots 3 et 4 veulent tout deux répondre à l'offre, ils soumettent leur désaccord à la constitution (un ensemble de lois, élaborées par chaque robot). Celle-ci départage les robots sur des critères d'intérêt pour le groupe : par exemple, elle favorisera celui qui n'a pas travaillé depuis le plus longtemps afin qu'il puisse recharger ses batteries (les travaux sont rémunérés par de l'énergie électrique).

nier doit-il être pris en charge ou abandonné? Dans ce cas, la prise en charge est plus utile à la communauté que l'abandon : le robot abandonné est perdu pour la communauté, alors que soutenu, il peut aider au ramassage du minéral. Toutefois, la coopération peut entraîner des blocages.

### La résolution des conflits

Lorsque plusieurs robots sont amenés à collaborer, donc à négocier, ils doivent à un certain moment arrêter de négocier. Cet arrêt peut être explicitement programmé après un temps donné, auquel cas on ne peut plus parler d'une négociation, dans la mesure où elle n'a pas abouti.

La seconde possibilité est que les robots s'arrêtent de négocier mutuellement, par exemple lorsqu'ils ont «conscience» d'avoir obtenu chacun le maximum dans la négociation. C'est là le nœud de la programmation d'un groupe de robots : comment un robot peut-il optimiser sa satisfaction?

Pour résoudre ces problèmes, nous avons décidé d'implémenter une

constitution – au sens politique du mot. Nous avons introduit deux premiers articles qui obligent les robots à protéger leurs existences, mutuellement et collectivement. Ces articles ressemblent à la troisième loi d'Asimov que nous avons évoquée en début d'article. Dans le cas où les robots sont chargés de ramasser du minéral, les six articles de notre constitution sont :

- Article un. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre le groupe en danger.
- Article deux. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre un membre du groupe en danger.
- Article trois. Aucun robot ne peut fixer seul le prix officiel du minéral non ramassé.
- Article quatre. Un robot est libre de négocier le prix d'une ressource avec un autre robot.
- Article cinq. Pour réviser un règlement de la constitution, il faut que les deux tiers du groupe soient d'accord.
- Article six. La durée d'une négociation est limitée.

Seuls les deux premiers articles ne sont pas modifiables par les membres

du groupe. Les deux premiers articles interdisent à un robot ayant d'importantes réserves d'énergie de refuser son aide à un robot menacé (dont les batteries sont presque vides), dans la mesure où cela ne le met pas lui-même en danger.

Chaque robot embarque un exemplaire de la constitution. Si, lors d'une négociation ou d'un conflit, deux ou trois membres du groupe ne sont pas en mesure de s'accorder sur une action qui engage le groupe, chacun soumet localement à la constitution l'ensemble des propositions et des points de désaccord. Comme tous les robots ont la même constitution, le résultat de la soumission est identique, et les robots exécutent le résultat proposé. Chacun des articles composant la constitution est défini par des fragments de programmes de quelques lignes ou par des fonctions électroniques câblées directement sur le robot.

Examinons le cas d'un robot qui trouve un gisement de minéral dont il sait, par expérience et apprentissage, que deux robots suffisent à l'exploiter : il cherche alors à engager

un seul autre robot. Deux robots, 3 et 4, répondent à son offre. Chacun calcule sa fonction d'utilité. Le robot recruteur choisit alors la robot dont la fonction d'utilité est supérieure. Lorsque les deux fonctions d'utilité sont voisines, le robot recruteur a du mal à choisir, et les deux robots disponibles peuvent ne pas s'accorder. Les deux robots soumettent alors leur désaccord à la constitution.

Celle-ci vérifie que les fonctions d'utilité des robots est bien positive (sinon ils sont en danger) ; elle vérifie l'état des capteurs des deux robots (un robot peut avoir un capteur abîmé ce qui nuira à son efficacité sur le terrain) ; enfin, elle examine si l'un des deux robots a moins travaillé que l'autre. Dans 99 pour cent des cas, la constitution résout ainsi les conflits en choisissant le robot le plus apte, pour le bien de la société. Lorsqu'à l'issue de cet examen, la constitution ne parvient pas à départager les robots, elle fait un choix aléatoire.

Dans notre expérience, les robots utilisés sont des robots à six pattes, munis d'un système de communication et d'un détecteur de minerai (voir la figure 3). Chaque robot connaît sa position par rapport à une base. Cette dernière n'est pas un organe central de contrôle, mais uniquement un repère fixe pour les robots mobiles. Nous avons analysé la quantité de minerai ramassé en fonction de plusieurs paramètres : le nombre de robots, et selon que le système de communication radio est connecté ou non (suppression du recrutement).

Conformément à nos attentes, la quantité de minerai ramassé augmente avec le nombre de robots du groupe : en passant de trois à quatre robots, le nombre d'échantillons de minerai ramassés après une heure de travail est passé de 16 à 28. En revanche, avec cinq robots, la quantité de minerai ramassé a légèrement diminué, car l'un des robots n'a rien trouvé et que le minerai était plus dispersé que dans les expériences précédentes.

Pourquoi faire des expériences alors que les simulations pourraient reproduire ce phénomène ? Parce que nos expériences sont plus « réelles » que les simulations. La simulation numérique est une forme particulière de l'expérience : elle revêt les apparences d'un système en reproduisant

## L'intérêt individuel, moteur de la coopération

La capacité individuelle de survie d'un robot se définit, soit en considérant sa probabilité de survie dans un environnement donné, soit en analysant son bilan énergétique, c'est-à-dire la différence entre la quantité d'énergie qu'il reçoit et celle qu'il dépense, par unité de temps. Lorsque ce bilan est positif, le robot est capable de survivre et d'investir cette énergie dans la coopération.

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressources ou comme consommateur. A chaque interaction, le robot calcule sa fonction d'utilité :

$$U_{\text{robot}} = \text{GAIN}_{\text{proposé}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$$

où  $\text{GAIN}_{\text{proposé}}$  est le gain d'énergie proposé par le robot recruteur ou offreur de service,  $\text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}}$  l'énergie cinétique nécessaire au robot pour se rendre au site de travail et  $\text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$  l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche.

- Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable pour le robot. Il peut l'accepter immédiatement s'il n'est pas en situation de mieux faire. Sinon l'offre est mémorisée par le robot pour une action différée, en accord avec le robot recruteur ou offreur de service.
- Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas intéressante pour le robot, car la dépense d'énergie nécessaire pour satisfaire la demande est supérieure au gain.
- Si la fonction d'utilité est nulle, le choix d'accepter ou de refuser la proposition est aléatoire.

une partie de son comportement ou de sa forme, mais sans en avoir l'ensemble des caractéristiques. Le modèle y est limité aux seules propriétés nécessaires pour mener à bien la tâche que l'on s'est fixé. Dans une expérience ordinaire, l'expérimentateur exerce une action immédiate sur l'objet étudié ; dans une simulation, ce contact n'existe pas : l'expérimentateur agit uniquement sur le modèle de l'objet.

Certes la simulation est nécessaire lorsque l'expérimentation directe est impossible (impossibilité technique ou expériences trop longues). Le travail de simulation sur l'évolution des espèces, par exemple, justifie pleinement le choix d'une telle démarche. Toutefois, lorsqu'une réalisation demeure possible, pourquoi essayer de reproduire imparfaitement un environnement dont nous disposons sachant que, de toute manière, il n'est pas possible de reproduire pleinement ce milieu ?

Dans la réalité, les robots se fatiguent : après quelques heures, l'un des robots se déplaçait mal, en raison d'une surchauffe de moteur et du frottement de deux pignons. Ce pro-

blème de fatigue, voire de panne du robot, n'est pas pris en compte dans des simulations.

### Constitution nécessaire

Peut-on obtenir un comportement efficace, analogue à celui que nous avons observé sans l'introduction d'une constitution ou d'une notion d'économie ? Selon nous, une organisation sociale, même artificielle, doit être régulée ; sinon les conflits sont inévitables. Dès lors qu'il y a communication, coopération et négociation, les outils économiques sont indispensables. Dans d'autres réalisations d'intelligence artificielle, ces mécanismes de régulation portent des noms différents, mais ils s'inspirent également de mécanismes économiques, qui seuls peuvent gérer les relations de dépendance complexe dans un système d'interaction collective.

La microéconomie étudie le comportement d'individus rationnels, dans un environnement où toute l'information n'est pas disponible et où les décisions individuelles ne sont pas coordonnées par une autorité centrale. La microéconomie reconnaît que la

concurrence parfaite est une référence abstraite qui ne peut avoir de valeur normative, car les échanges de biens sont inévitablement soumis à des coûts de transaction et à des défauts de coordination. Ainsi, les marchés ne fonctionnent jamais selon l'hypothèse de la concurrence parfaite.

L'analyse des comportements de nos robots dans certaines situations nous a permis de déceler des sources systématiques d'inefficacité de transaction marchande (comportement égoïste, par exemple). Si notre société de robots fonctionne, c'est parce que nous l'avons dotée d'une constitution qui pallie ces lacunes en maintenant la cohésion du groupe.

L'économiste écossais Adam Smith (1723-1790) prétendait que, si chaque agent économique améliore sa situation, la situation du groupe est améliorée. Contrairement à cette intuition, la microéconomie montre que les décisions individuelles égoïstes sont le plus souvent incompatibles avec l'intérêt général. En l'absence de coordination, les individus font des choix qui impliquent un gaspillage de ressources.

Dans les années 1970, l'éthologue Nicholas Humphrey écrivait que l'intelligence des animaux et celle de l'homme résulteraient d'une adaptation, non aux vicissitudes de l'environnement physique (intelligence physique) mais aux contraintes de l'environnement social et à la nécessité de maintenir la cohésion du groupe auquel on appartient (intelligence sociale). Selon cette conception, l'intelligence sert essentiellement à préserver la structure d'un groupe, malgré les tentatives individuelles à l'exploitation et à la manipulation des autres. Dans cette mesure, notre groupe de robots est intelligent.

Arabi ALI CHÉRIF est chercheur au Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Université Paris 8 (Saint-Denis). Il enseigne la robotique à la formation MIMES de cette université.

R. TANGUY, *Coopération et coordination des robots autonomes*, Colloque IAS, Université Paris 6, janvier 1997.

J.-P. DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour la Science, 1995.

D. BLAIR, *La logique du choix collectif*, in *Pour la Science*, octobre 1983.

L'INTELLIGENCE



L'intelligence en sciences

# L'intelligence en physique

PIERRE-GILLES DE GENNES

**C**omment devenir un bon physicien ? Chaque nouveau problème apporte son lot de difficultés. Le physicien théoricien a besoin d'intuition et de chance pour naviguer entre le Charybde du formalisme excessif et le Scylla de l'expérimental inexécutable.

La préoccupation centrale est la recherche de modèles simples qui décrivent les phénomènes. Attention : le modèle utile n'est pas nécessairement unique. Ainsi, dans les années 1950 s'est posée la question du comportement des noyaux atomiques dans un champ magnétique. Le groupe d'Edward Purcell, à l'Université de l'Illinois, a tout fondé sur les niveaux d'énergie du proton dans un champ magnétique : leur position, leur largeur, etc. À l'Université Stanford, Felix Bloch procéda très différemment : il assimila le spin (ou moment magnétique) des atomes à un petit gyroscope soumis à des couples qui le faisaient précesser (la précession d'une toupie est la rotation de son axe de rotation) et retrouva les résultats de Purcell. Toutefois son modèle lui donnait beaucoup plus : il décrivait les mécanismes transitoires, qui ont ensuite été utilisés pour la mise au point des techniques de résonance magnétique nucléaire. Au total, deux modèles très différents d'une même réalité.

L'étude des polymères nous a montré, aussi, que le bon choix des modèles est parfois conjoncturel. Les polymères sont composés de très longues molécules ; un matériau composé de polymères à l'état fondu ressemble à un plat de spaghettis enchevêtrés. Comment calculer son comportement ? Samuel Edwards, à l'Université de Cambridge, avait remarqué que les polymères faisaient des nœuds, et il avait utilisé la théorie mathématique des nœuds pour déterminer les propriétés physiques des polymères fondus. Bien qu'intéressante, cette approche fut peu féconde.

Plus tard est apparue une description différente, qui considère que chaque chaîne est un serpent qui ondule dans un tube étroit, autour de sa position initiale ; c'est la théorie de la reptation. On comprend aujourd'hui que la description en termes de nœuds était limitée pour plusieurs raisons : premièrement le problème

de la classification des nœuds est un problème mathématiquement inachevé ; deuxièmement les nœuds mathématiques exigent des fils infiniment longs ou refermés sur eux-mêmes, contrairement aux molécules de polymères, qui sont de longueur finie ; troisièmement les nœuds qui déterminent la dynamique des matériaux polymériques.

Au total, j'ai consacré une grande partie de mon temps à tester des représentations. Il fait souvent de mauvais choix, mais, parfois, ceux-ci lui donnent des idées pour progresser : on modélise avec de bonnes idées, mais les brouillons sont utiles.

**D**ans la physique que je rencontre, les idées viennent rarement comme des éclaircissements. Les nuits de Pascal sont exceptionnelles, et les matinales sont lentes. Voici un exemple : la description des solutions de polymères au contact d'une surface solide. Ce problème est important, car les solutions de polymères contenant des particules solides sont omniprésentes : le blanc d'œuf est une solution de polymères ; un pot de peinture contient des pigments et des polymères.

Les physico-chimistes avaient lentement déterminé les particularités de l'absorption des polymères sur les surfaces, et les physiciens théoriciens avaient modélisé l'ensemble des données. Toutefois il allait encore dix ans de réflexion pour qu'apparaisse le modèle qui éclaircit vraiment le problème : on assimile le polymère à une grille dont la maille est de plus en plus serrée quand on se rapproche de la surface. Ce modèle permet l'explication quantitative d'une foule de phénomènes. Il a permis d'obtenir une vision simple. Nous avons eu de la chance.

Le formalisme est parfois un danger (aggravé par l'informatique) : il permet de décrire les phénomènes dans trop de détails, au détriment de la compréhension profonde. Le physicien doit ignorer certains détails. Dans le cas des polymères au contact des surfaces, par exemple, on cherche une représentation qui ne fasse pas intervenir les particularités chimiques des molécules de polymère et des surfaces ; on regarde seulement les formes globales. En revanche, si l'on veut cor-

rectement résoudre le problème technique de recouvrir une surface solide d'une couche de polymère, on devra se préoccuper de la structure tridimensionnelle des chaînes et de leurs liaisons éventuelles avec les molécules de la paroi : ces propriétés dépendront de la constitution chimique précise des chaînes.

**J**e tiens à insister sur le travail à effectuer : le physicien ne se contente pas de rêver à une solution jusqu'à ce qu'elle vienne. Pour obtenir une description simple des phénomènes physiques, il doit avoir une solide culture : celle-ci s'acquiert lentement et laborieusement. Bloch, par exemple, m'a comparé le spin atomique à un gyroscope que grâce à sa connaissance de la mécanique quantique et, notamment, du travail de Julian Schwinger, de l'Université Harvard. On ne trouve pas de notions de physique sans être guidé par des mathématiques puissantes.

C'est également pour cette raison que je recommande à nos étudiants français d'utiliser le cours de Lev Landau, assez mathématique, plutôt que le cours de Richard Feynman. Ce dernier est plus profond que le texte de Landau, mais il s'adresse à des personnes qui ont déjà assimilé le formalisme.

**D**evenir « intelligent » ? Il ne s'agit pas d'être malin : la rapidité d'esprit à la française, la « pointe » de Cyrano de Bergerac, me semble nuire à nos étudiants qui oublient alors parfois de creuser les sujets. Je crois beaucoup à l'échange d'idées, mais cet échange ne doit pas se transformer en duel intellectuel ; il est plus fructueux que s'il est une invitation à une réflexion égoïste. Personnellement, je dois beaucoup à Feynman que je n'ai jamais rencontré, mais dont j'ai lu très tôt deux articles sur la superfluidité de l'hélium. Ces articles qui contenaient peu d'équations, m'ont plus appris par leur style, que des années d'étude. Les enseignants ne devraient-ils pas faire lire des articles de ce genre à tous les étudiants ?

Ce serait en tout cas une contribution à l'élaboration de cette culture. L'inculture est redoutable : il est naïf de croire que n'importe qui peut trouver

de bons modèles physiques sans un entraînement patient.

Inversement l'excès de culture paralyse, tout comme l'excès d'informations! Quand notre groupe s'est intéressé aux polymères, l'information était pléthorique : les physiciens et les chimistes faisaient une multitude d'expériences, de résonance magnétique nucléaire ou de spectroscopie infrarouge, par exemple, qui donnaient des informations excessivement détaillées. Les théoriciens étaient égarés : ils accumulaient les effets physiques simultanés et les paramètres ajustables, de sorte que les modèles qu'ils élaboraient étaient nécessairement obscurs.

Pour simplifier, nous avons décanté l'information, avant d'identifier les données qui ont conduit à des modèles clairs. Je crains fort que l'usage du réseau *Internet* ne crée ainsi un excès d'informations, dont on devra se dégager avant d'identifier les données utiles.

Landau lui-même a souffert d'un excès de culture, à propos de l'antiferromagnétisme. On avait d'abord compris le ferromagnétisme : c'est une situation où les aimantations des atomes voisins tendent à se mettre parallèles. Puis les physiciens s'intéressèrent à d'autres matériaux, qui présentaient des caractéristiques magnétiques inhabituelles. Louis Néel et Landau se sont alors demandé théoriquement quels effets on obtiendrait si les aimantations des atomes voisins préféreraient être antiparallèles, c'est-à-dire dans la même direction, mais de sens opposés. Néel a correctement prévu les effets possibles d'une telle situation : ses descrip-

tions ont été confirmées expérimentalement. Landau, également, avait eu cette idée du couplage antiparallèle, mais il était trop savant pour s'imaginer que deux moments magnétiques (qui est un peu pathologique), il pensa que le couplage antiparallèle ne pouvait conduire à une phase ordonnée... et il manqua la théorie de l'antiferromagnétisme. Méfions-nous des *a priori* théoriques.

**Q**uelle doit être la place respective des physiciens théoriciens et des expérimentateurs? Parfois la théorie guide l'expérimentation : ce fut le cas pour la théorie de la supraconductivité, qui guida beaucoup d'expériences dès le début de son développement. En revanche, la théorie risque toujours de se figer : après l'explication de la supraconduction par John Bardeen, Léon Cooper et John Schrieffer, les physiciens s'attachèrent à développer la théorie, et ils n'ont pas prévu l'existence des oxydes supraconducteurs à haute température.

Pour revenir au rôle des théoriciens, je les vois comme des catalyseurs. Leur proportion n'est pas nécessairement importante, dans les équipes, mais ils jouent un rôle important de « pollution » quand ils visitent beaucoup de laboratoires.

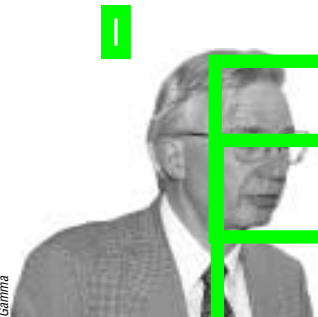
**L**es grandes lignes d'une forme d'approche à la physique ayant été ainsi considérées, quelles qualités sont-elles utiles? Certaines qualités spécifiques sont un atout : par exemple, en France, deux chercheurs, Jacques Teyssie et Yves Bouligand, sont doués d'une

bonne vision dans l'espace : elle a considérablement facilité la recherche sur les défauts dans les polymères liquides.

D'autre part, les physiciens théoriciens ont intérêt à suivre couramment le catalogue des nouveaux outils théoriques ; et à évaluer leurs potentialités pour leur recherche personnelle.

Il y a aussi une gymnastique mentale utile à tous : c'est la détermination d'ordres de grandeur, qui permet au physicien de s'assurer qu'il perçoit bien le problème qu'il étudie. C'est un garde-bou qui évite de croire prépondérants des phénomènes de deuxième ordre. On peut s'amuser à chercher des ordres de grandeur à propos de n'importe quoi. On utilise un stylo en matière plastique : quelle est la production annuelle de plastique en France? On joue du piano : peut-on estimer le nombre d'accordeurs de piano à Paris? (C'est un problème que le physicien Enrico Fermi posait, jadis)? On disperse dix tonnes d'atomes radioactifs sur l'Europe occidentale, à partir de Tchernobyl : combien de molécules chimiques ou biologiques seront détruites par mètre carré? Le jeu des ordres de grandeur n'est pas suffisant, pour faire un bon physicien, mais il est sans doute nécessaire.

**Pierre-Gilles de GENNES est professeur au Collège de France et directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de Paris.**



## L'intelligence du chimiste

JEAN-MARIE LEHN

**L'**intelligence du chimiste? La difficulté de cette question est aggravée par la diversité de la chimie : un chimiste qui cherche à synthétiser des molécules organiques ne met pas en œuvre les mêmes talents qu'un spécialiste d'analyse, par exemple. Toutefois la chimie fait apparaître trois types d'intelligence.

Tout d'abord, une faculté « conceptuelle » qui permet de dégager une règle, une caractéristique générale, d'un ensemble souvent touffu de faits expérimentaux. La grippe se manifeste diffé-

remment chez les divers individus, mais c'est toujours la grippe ; de même, un groupe on connaît, on connaît bien, on a des propriétés différentes selon la nature exacte de la molécule qui contient, mais tous les groupes thiols ont une réactivité commune. Savoir identifier ces propriétés communes ou savoir dégager des règles qui expliquent le mécanisme des réactions, dans la forêt des faits expérimentaux : voilà une capacité que le chimiste gagne à acquérir.

La deuxième faculté importante est l'observation : un bon chimiste doit savoir

observer, ne pas passer à côté de détails qui peuvent se révéler importants, être attentif et ne pas rejeter l'inattendu par lequel les faits veulent en quelque sorte nous dire quelque chose.

Enfin, le chimiste doit être capable de percevoir l'organisation, l'organisation spatiale d'abord — c'est une évidence, car les molécules sont des constructions dans l'espace — et aussi l'organisation logique : la logique des séquences réactionnelles. Une synthèse est une longue séquence de réactions dans laquelle la stratégie est importante ; il faut savoir se représenter

l'ensemble élaborer des voies d'approche originales et conserver l'idée du but final.

Examinons plus en détail ces trois formes d'intelligence.

La capacité de voir dans l'espace, évoquée en dernier, est celle qui doit sans doute être acquise en premier : les molécules étant des assemblages d'atomes, leurs propriétés résultent de la disposition des atomes et du maillage des liaisons chimiques. Cette perception, importante en chimie moléculaire, s'impose plus encore quand on se préoccupe de chimie supramoléculaire, c'est-à-dire d'assemblages complexes de molécules qui s'asortissent de propriétés d'un genre nouveau. Elle est également fondamentale en biochimie, en physico-chimie des matériaux, etc.

Comment se familiariser avec l'agencement des atomes dans les molécules ou, plus généralement, des objets dans l'espace? Les chimistes ont peut-être intérêt à apprendre le dessin ou la peinture, et des notions de perspective leur sont certainement utiles. Naguère, les ingénieurs bénéficiaient de cours de dessin industriel, mais cet enseignement a été progressivement éliminé ; il est absent des enseignements universitaires en sciences exactes. C'est sans doute regrettable.

Naturellement l'esprit peut être soutenu par la matière : les modèles de molécules que l'on réalise à l'aide de boules et de tiges en bois ou en plastique, représentant atomes et liaisons, sont utilisés depuis longtemps ; ils sont aujourd'hui remplacés par des programmes de modélisation moléculaire, mais le but n'a pas changé. La conviction de l'importance de la vision dans l'espace nous a même poussé à créer un jeu qui tient à la fois du *Monopoly* et du *Lego* : au lieu d'acheter des rues, des maisons et des hôtels, les joueurs

leur servent à construire des modèles de molécule de telle ou telle propriété. Nous proposons – enfants et adultes – une idée des architectures moléculaires. Les pythagoriciens avaient écrit devant la porte du Lycée : «Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre». Les laboratoires de chimie pourraient reprendre la devise.

Le chimiste gagne également à posséder l'esprit de finesse, le sens de la beauté d'une molécule, de l'élégance d'une stratégie de synthèse. Cette perception, très élegante, éminemment subjective, permet d'innover : pour faire progresser la science, il faut avoir l'idée de mettre ensemble des choses qui ne l'étaient habituellement pas, de voir des relations nouvelles. De nombreux enfants ont naturellement cet esprit, quand ils jouent : en chimie comme

dans le jeu, la part de l'inventivité est très importante.

D'ailleurs la chimie est aussi un jeu : celui de la fabrication de molécules ayant une géométrie et une réactivité données. Pour acquiescer cette sensibilité à la forme, j'encourage les jeunes à s'arrêter devant les formes, à les admirer, à les analyser. Pourquoi pas, même, à faire de la sculpture ou de la poterie? Le physico-chimiste britannique Michael Faraday n'a-t-il pas dû, à son apprentissage de relieur la capacité de mettre au point les équipements expérimentaux? Ainsi, dans les travaux manuels, on se donne le loisir de tester, de démonter, de percevoir la résistance et la flexibilité des objets. Et cette perception aide le chimiste, qui se mesure à la matière moléculaire, également malléable et transformable.

Toutefois la chimie n'est pas une collection de papillons : les molécules ne sont pas des objets morts, épinglés dans des catalogues. Elles intéressent surtout par leurs capacités à réagir et à se transformer. La compréhension intime des transformations est importante. Je suis venu à la chimie parce que j'étais impressionné de voir que deux molécules A et B, réunies, engendraient parfois une troisième molécule C qui n'était pas simplement un mélange de A et de B. Le chimiste a un sentiment de puissance, prométhéen, qu'il enrichit par son raisonnement. La prévision du résultat d'une certaine réaction chimique et l'invention de nouvelles réactions sont des activités majeures de la chimie, et cela commence par une meilleure compréhension des mécanismes intimes par lesquels ces transformations se font. Devrait-on au fronton des laboratoires, à côté de la première devise, inscrire aussi : «La chimie transforme la matière?»

Tout en mise en contact de molécules amène à se poser la question : qu'obtient-on du résultat de la réaction chimique entre les réactifs? Cette chimie mécanistique est intellectuellement passionnante : on applique l'arsenal des connaissances sur les réactifs, leur réactivité, le milieu, les paramètres thermodynamiques... et l'on essaie de prédire le résultat de la réaction chimique. Quand on a le sentiment qu'une réaction est possible, mais qu'on manque de données pour en être certain, on effectue réellement la réaction et l'on en analyse le résultat : le chimiste doit être aventureux!

La seule connaissance des réactions individuelles ne fait pas un chimiste d'envergure. Comment apprendre à déce-

ler des combinaisons nouvelles? Il y a quelques décennies, le sociologue strasbourgeois Abraham Moles s'était posé ce problème général et il proposait, dans son livre *La création scientifique*, l'usage de tableaux qu'il nommait «matrices d'invention». Dmitri Mendeleïev, quand il créa son *Tableau périodique*, classa les éléments en un tableau, ce qui le conduisit à prédire l'existence d'éléments chimiques qui étaient encore inconnus. De tels tableaux sont utiles, parce qu'ils permettent une étude systématique. Faut-il avoir une molécule nouvelle, comment épister des propriétés nouvelles? Le chimiste étudie cette question en répondant à des questions du type : «Que se passerait-il si je changeais tel ou tel groupe de la molécule?». La rigueur donnée par les matrices d'invention, ou par un autre moyen de ce type, permet une exploration complète des propriétés chimiques.

J'ai l'impression que la philosophie, et non seulement le travail épistémologique de Moles, peut être directement utile au scientifique, dans sa réflexion sur ses recherches : les philosophes essaient de formuler une conception générale du monde. Il me semble que c'est mon intérêt pour les théories de la connaissance qui m'a finalement conduit à me demander, vers 1965-1966, comment un chimiste pourrait contribuer à l'étude du fonctionnement du système nerveux, support de la pensée. Je me suis alors intéressé au transport d'ions à travers les membranes cellulaires, un phénomène qui intervient dans l'influx nerveux, et, en conséquence, à me poser la question de la distinction des ions sodium et des ions potassium, dont les flux participent à la propagation des signaux nerveux. Ces ions étant sphériques, le problème est devenu celui de reconnaître une sphère dans un ensemble de sphères. Sa généralisation a tout naturellement conduit à l'idée de reconnaissance moléculaire.

Toutefois, la reconnaissance résulte d'interactions, en chimie comme ailleurs, et l'on a abordé ainsi au niveau supramoléculaire. Et tout d'un coup, il y a une information présente dans les molécules. La chimie supramoléculaire devient en quelque sorte une façon de mettre en œuvre cette information. Son apport majeur à la chimie est sans doute cette notion d'information portée par la structure moléculaire et traitée au niveau supramoléculaire.

L'étape suivante s'imposait : si l'on sait faire des objets qui se reconnaissent, pourrait-on concevoir des systèmes qui s'auto-organisent en architectures complexes sur la base des informations

qu'ils contiennent? On en arrive aux problèmes de l'organisation de la matière et de son évolution vers une complexité croissante, matière divisée, condensée, organisée, matière vivante, matière pensante. Un vaste programme!

Mes conseils pratiques à un jeune chimiste? Apprends pour comprendre bien sûr, mais, surtout, garde un contact direct avec la matière, fais des expériences pour cultiver cette faculté de transformer la matière. Toutefois, ne reste pas

le nez collé à la paillasse, car ce métier de chimiste est aussi plein de grandes idées. Regarde autour de toi les grandes questions et traduis-les dans ton langage de chimiste. S'il y a un risque de te laisser guider par des idées générales, la paillasse te ramènera au concret, à la réalisation qui laisse sa marque dans la matière. La chimie aide à suivre le précepte de San Antonio : « Dans la vie, il faut choisir, mon prince, s'écouter parler ou se faire entendre ». Sois donc fier

de ce que tu fais, de ce pouvoir sur la matière que te donne la chimie, de cette capacité qu'elle a de créer molécules nouvelles et matériaux nouveaux, qui relève d'une faculté créatrice, semblable à celle de l'art.

**Jean-Marie LEHN** est professeur au Collège de France et directeur du Laboratoire de chimie supramoléculaire ISIS – ULP-CNRS ESA-7006, à Strasbourg.



## L'intelligence en mathématique

ALAIN CONNES

J'éprouve une certaine réticence à parler d'intelligence, car j'ai toujours considéré les mathématiques comme une école quotidienne d'humilité. Je me méfie lorsqu'un mathématicien se vante de ses succès sans mentionner ses échecs. En revanche, je saisis volontiers l'occasion de parler de mathématiques et de la difficulté qu'il y a à décrire de façon rigoureuse l'activité du mathématicien : l'employée de maison d'un mathématicien célèbre, interrogée sur l'activité de celui-ci, répondit qu'il passait son temps dans son bureau, à écrire sur des bouts de papier qu'il jetait ensuite consciencieusement à la poubelle. L'activité du mathématicien pose ainsi un problème spécifique qui a trait à la nature de la réalité mathématique.

Si toute science ne se réduit pas à son objet, le physicien, le chimiste, le géologue ou l'astronome savent quel est l'objet de leur travail : à diverses échelles, ils étudient la structure et l'organisation de la matière. L'existence d'un monde matériel extérieur est un *a priori* simple, qui n'est remis en cause qu'en mécanique quantique. La distinction entre invention et découverte est également claire : on invente des outils nouveaux d'exploration, tel le microscope à effet tunnel ; on découvre les structures, telle la double hélice de l'ADN.

En mathématiques, le problème est différent : l'évidence des considérations précédentes fait place à une interrogation philosophique légitime devant la difficulté qu'il y a, pour un mathématicien, à spécifier, devant un matérialiste pur et

dur, la nature de la réalité mathématique et du travail de mathématicien. Pour situer le problème, il convient d'opposer, d'une part, les « platoniciens », qui se considèrent comme les explorateurs d'un « monde mathématique » dont l'existence n'a fait pour eux aucun doute et dont ils découvrent la structure et, d'autre part, les « formalistes » qui se retranchent derrière une attitude sceptique, les mathématiques n'étant pour eux qu'une suite de déductions logiques dans un système formel, une sorte de langage purifié.

Pour le non-mathématicien, les mathématiques apparaissent trop souvent comme un jeu sans autre objet que celui d'aiguiser l'acuité intellectuelle ; elles sont généralement rencontrées et utilisées comme un langage. Le chimiste ou le biologiste, par exemple, doivent parfois utiliser le langage mathématique pour préciser leur pensée. Cette utilisation du langage mathématique est cependant un raffinement sélectif qui est propre à tout langage, y compris le langage scientifique non mathématique. Pour saisir le sens des mathématiques, en même temps qu'elle fait croire que les mathématiques se réduisent à un langage. Ce point de vue est cohérent avec celui des formalistes, qui a donc *a priori* la symphonie d'un scientifique non mathématicien.

Les mathématiciens ont deux sources vigoureuses d'expérimentation et d'information directes : l'espace physique, source de la géométrie, et les entiers naturels, source de la théorie des nombres. Un nombre entier est premier, tel 1997,

s'il n'a pas d'autre diviseur que 1 et lui-même. Une expérimentation simple avec les nombres, par exemple comprise entre 1 et 1 000, montre que la liste des nombres premiers semble continuer indéfiniment. Une exploration plus poussée, à l'aide d'un ordinateur, n'infirme pas cette impression, mais ne peut en rien la prouver, puisque la vérification d'un tel énoncé nécessiterait une infinité de calculs (c'est ce que l'on appelle un énoncé de type universel).

Le travail du mathématicien consiste à remplacer la constatation expérimentale par une preuve. Pour les nombres premiers, ce travail remonte à Euclide. Que dit le résultat? Qu'à toute personne qui prétendra avoir trouvé le plus grand de tous les nombres premiers, disons  $2^{132\,049} - 1$ , on pourra rétorquer « vous vous trompez » et expliquer une méthode par laquelle on trouvera un nombre premier plus grand. Ce travail se rapporte ainsi à une réalité, tout aussi contraignante que la réalité extérieure ; dit autrement, peu importe que nous laisserions à quelqu'un pour trouver le plus grand nombre premier, nous savons l'entreprise vouée à l'échec.

En énonçant qu'il n'existe pas de plus grand nombre premier, le mathématicien réussit à dévoiler un aspect – ici, l'infinité des nombres premiers – d'une réalité tout aussi mystérieuse et *a priori* incohérente que la réalité qui nous entoure. S'il veut entrevoir comment cette infinité de nombres premiers est répartie parmi les nombres entiers, l'expérimentation peut être largement aussi déroutante que n'importe quelle exploration du monde

extérieur. Par exemple, 1999 est également un nombre premier, de sorte que 1997 et 1999 sont des nombres premiers jumeaux ; existe-t-il une infinité de nombres premiers jumeaux ? On l'ignore. D'autre part, la réalité mathématique a la même «extraordinaire intelligibilité» que la réalité extérieure et, pour ne prendre qu'un exemple, la célèbre conjecture du mathématicien allemand Bernhard Riemann (1826-1866) sur les zéros de la fonction zêta (toujours non démontrée) signifie qu'avec une erreur de l'ordre de la racine carrée de  $n$ , le nombre de nombres premiers inférieurs à  $n$  est donné par une fonction nommée logarithme intégral  $Li(n)$ .

L'essence du travail mathématique est l'élaboration des concepts et des outils qui, éventuellement, rendent accessible la solution de quelques problèmes fondamentaux. En un sens, le mathématicien essaie de percevoir et de comprendre la réalité mathématique primitive, brute, non structurée *a priori*. Que cette réalité ne soit pas localisable dans l'espace-temps a peu d'importance ; elle n'en est pas moins accessible, ne serait-ce qu'expérimentalement, grâce à la réalité physique. Les mathématiques donnent ainsi un accès direct, d'emblée, à la pensée pure, à une unité sans limite. C'est pourquoi, lors d'une prise lorsqu'un jour, pendant les grandes vacances, mon fils âgé de cinq ans vint le trouver après avoir passé une heure sur la plage avec cet air soufriteux caractéristique de la réflexion intense, et lui dit : «Papa, il n'y a pas de plus grand nombre...»

**J**e pense que l'acte créateur, en mathématiques, s'effectue par le langage, lors du découpage conceptuel de la réalité mathématique. Pour créer des mathématiques, on doit d'abord faire la distinction, d'une part, d'une réalité mathématique brute, initialement étiquetée de manière inductive avec une large part d'arbitraire, telle que les entiers dans le système décimal, et, d'autre part, le système formel, de nature axiomatique déductive, que le cerveau humain met au point pour percevoir et appréhender cette réalité mathématique brute.

Un fait empirique de l'arithmétique a bien peu de chances d'être compris s'il ne se formule pas de manière naturelle et esthétique dans le langage du système formel du mathématicien. L'histoire du problème de Fermat n'est devenue réellement accessible qu'à la fin des années 1980, grâce à la théorie des courbes elliptiques. Même quand une formulation conceptuelle a été trouvée, comme pour l'hypothèse de Riemann, le problème peut rester trop difficile, mais le mathématicien a au moins la possibilité de considérer un problème analogue, transplanté en quelque sorte dans une situation

voisine plus simple. La résolution du problème analogue éclaire bien souvent le cas initial et permet d'avancer vers sa solution.

**E**n conclusion, examinons en quel sens les travaux de Kurt Gödel ont mis un point final à la tentation réductionniste des formalistes et comment ils permettent de distinguer la réalité mathématique primitive du système de perception que le cerveau humain élabore pour comprendre et explorer cette réalité. Les formalistes pensent que les mathématiques sont uniquement des constructions hypothético-déductives élaborées par l'homme, et dont le caractère essentiel est d'être exemptes de connotations. Ce point de vue a été systématisé par le mathématicien David Hilbert qui voulait définir clairement et sans ambiguïté ce qu'est une démonstration mathématique. Hilbert a ainsi introduit la notion de système formel. Un tel système est donné par un alphabet fini, une grammaire qui spécifie ce qu'est un énoncé cohérent, un nombre fini de propositions supposées vraies, ou axiomes, et des règles d'inférence logique qui permettent de procéder à des déductions.

Les mathématiciens espéraient réduire les mathématiques à un tel langage formel. Si ce rêve avait abouti, le point de vue exprimé par les formalistes aurait été parfaitement justifié et il aurait été tentant de réduire les mathématiques à un langage. Les travaux de Gödel, aux environs de 1930, ont donné une réponse négative et définitive à ces espoirs de formalisme. On mentionne souvent l'«indécidabilité» démontrée par Gödel (on ne pourra jamais savoir si certains énoncés sont vrais ou faux), mais l'énoncé le plus fort et le plus troublant pour les formalistes est bien le suivant : «Pour tout système déductif formel  $S$  non contradictoire, il existe un énoncé vrai portant sur l'arithmétique des entiers naturels, et qui est indémontrable dans  $S$ ».

Il peut surprendre, au premier abord, qu'un énoncé arithmétique puisse être vrai sans être démontrable. En l'occurrence, il s'agit d'un énoncé universel, c'est-à-dire de la forme «Pour tout entier  $n$ , une certaine propriété  $P(n)$  est satisfaite». Si l'on démontre un tel énoncé, sa véracité en découle, mais il peut très bien être vrai, au sens où, pour toute valeur de  $n$ , on a  $P(n)$ , sans pour autant que  $P(n)$  soit démontrable.

Ainsi un système déductif formel, c'est-à-dire un outil projectif que nous mettons au point grâce à notre cerveau pour percevoir la réalité mathématique, ne peut épuiser même les propriétés des entiers naturels. L'information contenue dans la réalité primitive, brute, des entiers naturels n'est pas de type fini, et elle échappera à toute tentative de réduction aux

déductions d'un langage formel. Ce résultat montre clairement la distinction entre cette réalité mathématique primitive et le système déductif que l'homme élabore pour l'analyser et la comprendre. Il est clair que ce système est une élaboration de notre cerveau, et qu'il a une évolution presque biologique, par sélection et intégration au «corpus culturel» des mathématiques engrangées dans les bibliothèques. Mais si on l'oppose à la réalité mathématique primitive qu'il a pour objet, on y gagne sur le plan conceptuel, en éliminant le côté négatif du théorème de Gödel, et même sur la compréhension de la pratique du mathématicien.

Les mathématiciens ont d'ailleurs, en général, deux manières de procéder : (1) mettre au point des outils, (2) soulever un coin du voile qui recouvre la réalité mathématique primitive. Ainsi un outil nouveau n'acquiert vraiment droit à autre chose qu'à une bienveillante méfiance de la part de la communauté quand il a été essentiel dans ce que les Anglo-Saxons appellent fort justement un *breakthrough*, un passage en force à travers le voile qui nous aveugle.

**I**l n'y a pas de recette générale pour réussir une telle avancée ; ce serait trop simple ! L'expérience montre que chaque mathématicien est un cas particulier. Tout au plus peut-on rappeler quelques règles élémentaires : par exemple, on ne doit jamais se précipiter pour lire une démonstration sans d'abord chercher à la trouver par soi-même. Des astuces aident à se concentrer plus facilement, comme de s'interrompre au milieu d'une démonstration qu'on a mal lue, ou de faire une démonstration. On peut aussi donner l'exemple de John Conway (mathématicien de Princeton) qui a programmé son ordinateur pour que ce dernier lui pose chaque matin une question du style : «Quel jour de la semaine est le 21 janvier 833 ?». Si J. Conway ne répond pas en moins de 30 secondes, l'ordinateur refuse de s'ouvrir.

Il n'est pas clair que les découvertes récentes sur le fonctionnement du cerveau nous soient plus utiles que les enseignements du positivisme de Jacques Hadamard (que je recommande) sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique. Vouloir réduire la réalité mathématique à des états physiques des neurones du cerveau, c'est un peu vouloir réduire la littérature à des réactions entre molécules d'encre et de papier, et le café reste jusqu'à nouvel ordre la meilleure drogue pour démontrer des théorèmes.

**Alain CONNES est professeur à l'Institut des hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette.**



# L'intelligence en biologie

JEAN-DIDIER VINCENT

**P**référer, comme je le fais, que l'intelligence est inséparable de l'affect, de la passion, c'est aussi se donner un guide pratique pour l'exercice de la biologie : pour interpréter, comprendre, penser le vivant, vivons et conservons l'idée que le vivant, comme nous, a une histoire.

J'ai la conviction qu'une intelligence purement formelle explorerait mal le vivant, parce que le sens du vivant échappe à une syntaxe intemporelle ; il n'émerge que de l'histoire individuelle des organismes ou de l'histoire évolutive des espèces. Pour révéler les mécanismes du vivant, le biologiste doit sans cesse passer les données au crible de cette double histoire. La nécessité d'interpréter l'histoire individuelle des organismes suffit à justifier la passion que je réclame : les êtres vivants ne se constitueront pas par les passions, au sens de la jouissance, du plaisir ou de la souffrance ? Leur histoire n'est-elle pas ainsi toute passion ? Même des phénomènes qui semblent aussi mécaniques que les conditions de l'éclosion des passions en œuvre : le chien qui salive à l'écoute d'une cloche « sait » qu'il recevra de la nourriture, objet de plaisir. De ce fait, le biologiste qui analyse le vivant gagne à se fonder sur sa propre humanité, à se ramener donc à ses propres passions pour comprendre et interpréter les observations et les expériences qu'il fait.

En ce sens, l'intelligence du biologiste est aussi celle de l'intelligence de sa propre vie, contrairement à celle du mathématicien, du physicien ou du chimiste, qui étudient des objets inafectés. Le biologiste, lui, a une réflexion incarnée, même quand il étudie des bactéries. Au-delà de la bactérie, il y a toute la vie de la bactérie : son développement, sa croissance, ses mouvements, ses fermentations, les maladies qu'elle subit ou qu'elle fait subir, la mort. C'est une particule subatomique à une stabilité limitée, mais elle n'a pas d'histoire : un électron a des caractéristiques immuables tant qu'il est stable.

La vie est une fable. Le vivant est une histoire, qui s'incarne, et l'intelligence du biologiste est à son mieux

quand le biologiste a une relation avec la souffrance ou avec la vie de l'individu. Un médecin qui soigne un malade, des atomes. D'ailleurs, le mot « biologie », né au début du XIX<sup>e</sup> siècle, est venu remplacer celui de « physiologie », laquelle traite du rapport de l'être vivant avec la nature. La physiologie et la médecine sont synonymes.

**E**n pratique, comment le biologiste peut-il se polluer efficacement avec la complexité du vivant ? Cette question montre bien que la biologie est une science à part : en chimie ou en physique, on peut isoler les systèmes, les simplifier, les réduire. En biologie, on n'a pas souvent ce recours : on ne connaît pas de modèle simplifié de micro-organisme, par exemple. Les résultats d'expériences sont notoirement difficiles à interpréter.

En neurobiologie, par exemple, celui qui étudie la mémoire d'animaux dont il lèse le cerveau ne perturbe pas le système qu'il étudie comme le fait le physicien qui change un seul paramètre. Aussi, lors de l'interprétation des résultats, le biologiste doit-il faire un bilan entre ce qui a été supprimé et ce qui a été gagné lors de la suppression. Il ne peut jamais se contenter de simples soustractions ou additions d'effets ; le système étudié est comme une toile d'araignée qui s'agit de toute part quand on la touche en un point.

Pour s'en tirer, on ne peut, j'y reviens, faire abstraction du sens des phénomènes. Jedis bien sens, et non finalité. Sans la passion qui éclaire le sens, la biologie moléculaire risque de devenir une chimie physique qui ne comprend pas les observations qu'elle fait. Pour interpréter les phénomènes biologiques, le biologiste doit reconnaître que l'organisme est le produit d'une interaction avec son milieu ; il doit savoir que le milieu exerce des contraintes sur l'homme comme sur l'animal, sur la plante ou sur le micro-organisme. Si le milieu exerce, par exemple, des contraintes périodiques, l'organisme se sera adapté à cette périodicité ; un biologiste qui étudierait ainsi une libération d'hormones, telle que la prolactine, ne pourra conduire ses expériences et tirer des conclusions perti-

nentes qu'il tient compte du phénomène de la périodicité de la contrainte exercée par le milieu.

De même, un médecin qui veut déclencher une ovulation chez une femme stérile en lui administrant l'hormone GnRH (la gonadostimuline, libérée par l'hypothalamus, qui stimule l'hypophyse) doit avoir l'intelligence du vivant pour être efficace : d'une part, le terrain doit être préparé (l'ovulation ne peut se faire à n'importe quel moment), et, d'autre part, l'injection doit être accordée sur le rythme de l'organisme, qui est, d'ailleurs, aussi celui du milieu, en raison de la longue adaptation des organismes à leur milieu. L'injection doit être faite à l'heure.

Le temps fait l'action, et l'on doit avoir l'idée que le temps est comme une horloge. Tout le vivant est le produit de l'éclosion ; il n'existe pas d'organisme qui ne soit le produit d'une histoire. Au total, le biologiste aura l'intelligence de son objet s'il rapporte les phénomènes à l'aune de la sélection naturelle, s'il donne aux modèles un cadre spatial et temporel.

**C**omment s'exercer à la biologie ? Comment devenir ce fouineur à l'intelligence biologique ? Comment apprendre à intégrer ? Comment devenir capable de l'enquête ? Les observations précédentes montrent que le biologiste doit apprendre à réunir les fils : le fil chimique tout comme le fil psychologique. Toutefois il doit également vivre, et vivre passionnément, puisque l'analyse des passions sera la clef du mode de vivant.

Jeunes biologistes, vivez fort, expérimentez, discutez de vos résultats, faites vivre les expériences, soyez rigoureux dans de leur conduite mais ensuite revivez-les dans le schéma, l'interprétation, le projet... Méiez-vous de l'enfermement dans le quotidien expérimental. La virtuosité technique est un risque : le biologiste, s'il s'intéresse à l'instrumentation pour elle-même, perd la possibilité de se passionner pour l'objet qui doit être celui de son étude : le vivant.

**Jean-Didier VINCENT est professeur à l'Institut universitaire de France et directeur de l'Institut Alfred Fessard (CNRS).**



# L'intelligence en physique

PIERRE-GILLES DE GENNES

**C**omment devenir un bon physicien ? Chaque nouveau problème apporte son lot de difficultés. Le physicien théoricien a besoin d'intuition et de chance pour naviguer entre le Charybde du formalisme excessif et le Scylla de l'expérimental inextricable.

La préoccupation centrale est la recherche de modèles simples qui décrivent les phénomènes. Attention : le modèle utile n'est pas nécessairement unique. Ainsi, dans les années 1950 s'est posée la question du comportement des noyaux atomiques dans un champ magnétique. Le groupe d'Edward Purcell, à l'Université de l'Illinois, a tout fondé sur les niveaux d'énergie du proton dans un champ magnétique : leur position, leur largeur, etc. À l'Université Stanford, Felix Bloch procéda très différemment : il assimila le spin (ou moment magnétique) des atomes à un petit gyroscope soumis à des couples qui le faisaient précesser (la précession d'une toupie est la rotation de son axe de rotation) et retrouva les résultats de Purcell. Toutefois son modèle lui donnait beaucoup plus : il décrivait les mécanismes transitoires, qui ont ensuite été utilisés pour la mise au point des techniques de résonance magnétique nucléaire. Au total, deux modèles très différents d'une même réalité.

L'étude des polymères nous a montré, aussi, que le bon choix des modèles est parfois conjoncturel. Les polymères sont composés de très longues molécules ; un matériau composé de polymères à l'état fondu ressemble à un plat de spaghettis enchevêtrés. Comment calculer son comportement ? Samuel Edwards, à l'Université de Cambridge, avait remarqué que les polymères faisaient des nœuds, et il avait utilisé la théorie mathématique des nœuds pour déterminer les propriétés physiques des polymères fondus. Bien qu'intéressante, cette approche fut peu féconde.

Plus tard est apparue une description différente, qui considère que chaque chaîne est un serpent qui ondule dans un tube étroit, autour de sa position initiale ; c'est la théorie de la reptation. On comprend aujourd'hui que la description en termes de nœuds était limitée pour plusieurs raisons : premièrement le problème

de la classification des nœuds est un problème mathématiquement inachevé ; deuxièmement les nœuds mathématiques exigent des fils infiniment longs ou refermés sur eux-mêmes, contrairement aux molécules de polymères, qui sont de longueur finie ; troisièmement les nœuds qui déterminent la dynamique des matériaux polymériques.

Au total, la physique a consacré une partie de son temps à tester des représentations. Il fait souvent de mauvais choix, mais, parfois, ceux-ci lui donnent des idées pour progresser : on modélise avec de bonnes idées, mais les brouillons sont utiles.

**D**ans la physique que je rencontre, les idées viennent rarement comme des éclaircissements. Les nuits de Pascal sont exceptionnelles, et les matinales sont lentes. Voici un exemple : la description des solutions de polymères au contact d'une surface solide. Ce problème est important, car les solutions de polymères contenant des particules solides sont omniprésentes : le blanc d'œuf est une solution de polymères ; un pot de peinture contient des pigments et des polymères.

Les physico-chimistes avaient lentement déterminé les particularités de l'absorption des polymères sur les surfaces, et les physiciens théoriciens avaient modélisé l'ensemble des données. Toutefois il allait encore dix ans de réflexion pour qu'apparaisse le modèle qui éclaircit vraiment le problème : on assimile le polymère à une grille dont la maille est de plus en plus serrée quand on se rapproche de la surface. Ce modèle permet l'explication quantitative d'une foule de phénomènes. Il a permis d'obtenir une vision simple. Nous avons eu de la chance.

Le formalisme est parfois un danger (aggravé par l'informatique) : il permet de décrire les phénomènes dans trop de détails, au détriment de la compréhension profonde. Le physicien doit ignorer certains détails. Dans le cas des polymères au contact des surfaces, par exemple, on cherche une représentation qui ne fasse pas intervenir les particularités chimiques des molécules de polymère et des surfaces ; on regarde seulement les formes globales. En revanche, si l'on veut cor-

rectement résoudre le problème technique de recouvrir une surface solide d'une couche de polymère, on devra se préoccuper de la structure tridimensionnelle des chaînes et de leurs liaisons éventuelles avec les molécules de la paroi : ces propriétés dépendront de la constitution chimique précise des chaînes.

**J**e tiens à insister sur le travail à effectuer : le physicien ne se contente pas de rêver à une solution jusqu'à ce qu'elle vienne. Pour obtenir une description simple des phénomènes physiques, il doit avoir une solide culture : celle-ci s'acquiert lentement et laborieusement. Bloch, par exemple, m'a comparé le spin atomique à un gyroscope que grâce à sa connaissance de la mécanique quantique et, notamment, du travail de Julian Schwinger, de l'Université Harvard. On ne trouve pas de notions de physique sans être guidé par des mathématiques puissantes.

C'est également pour cette raison que je recommande à nos étudiants français d'utiliser le cours de Lev Landau, assez mathématique, plutôt que le cours de Richard Feynman. Ce dernier est plus profond que le texte de Landau, mais il s'adresse à des personnes qui ont déjà assimilé le formalisme.

**D**evenir « intelligent » ? Il ne s'agit pas d'être malin : la rapidité d'esprit à la française, la « pointe » de Cyrano de Bergerac, me semble nuire à nos étudiants qui oublient alors parfois de creuser les sujets. Je crois beaucoup à l'échange d'idées, mais cet échange ne doit pas se transformer en duel intellectuel ; il est plus fructueux que s'il est une invitation à une réflexion égoïste. Personnellement, je dois beaucoup à Feynman que je n'ai jamais rencontré, mais dont j'ai lu très tôt deux articles sur la superfluidité de l'hélium. Ces articles qui contenaient peu d'équations, m'ont plus appris par leur style, que des années d'étude. Les enseignants ne devraient-ils pas faire lire des articles de ce genre à tous les étudiants ?

Ce serait en tout cas une contribution à l'élaboration de cette culture. L'inculture est redoutable : il est naïf de croire que n'importe qui peut trouver

de bons modèles physiques sans un entraînement patient.

Inversement l'excès de culture paralyse, tout comme l'excès d'informations! Quand notre groupe s'est intéressé aux polymères, l'information était pléthorique : les physiciens et les chimistes faisaient une multitude d'expériences, de résonance magnétique nucléaire ou de spectroscopie infrarouge, par exemple, qui donnaient des informations excessivement détaillées. Les théoriciens étaient égarés : ils accumulaient les effets physiques simultanés et les paramètres ajustables, de sorte que les modèles qu'ils élaboraient étaient nécessairement obscurs.

Pour simplifier, nous avons décanté l'information, avant d'identifier les données qui ont conduit à des modèles clairs. Je crains fort que l'usage du réseau *Internet* ne crée ainsi un excès d'informations, dont on devra se dégager avant d'identifier les données utiles.

Landau lui-même a souffert d'un excès de culture, à propos de l'antiferromagnétisme. On avait d'abord compris le ferromagnétisme : c'est une situation où les aimantations des atomes voisins tendent à se mettre parallèles. Puis les physiciens s'intéressèrent à d'autres matériaux, qui présentaient des caractéristiques magnétiques inhabituelles. Louis Néel et Landau se sont alors demandé théoriquement quels effets on obtiendrait si les aimantations des atomes voisins préféreraient être antiparallèles, c'est-à-dire dans la même direction, mais de sens opposés. Néel a correctement prévu les effets possibles d'une telle situation : ses descrip-

tions ont été confirmées expérimentalement. Landau, également, avait eu cette idée du couplage antiparallèle, mais il était trop savant pour s'en rendre compte. À deux moments magnétiques (qui est un peu pathologique), il pensa que le couplage antiparallèle ne pouvait conduire à une phase ordonnée... et il manqua la théorie de l'antiferromagnétisme. Méfions-nous des *a priori* théoriques.

**Q**uelle doit être la place respective des physiciens théoriciens et des expérimentateurs? Parfois la théorie guide l'expérimentation : ce fut le cas pour la théorie de la superconductivité, qui inspira beaucoup d'expériences dès le début de son développement. En revanche, la théorie risque toujours de se figer : après l'explication de la superconduction par John Bardeen, Léon Cooper et John Schrieffer, les physiciens s'attachèrent à développer la théorie, et ils n'ont pas prévu l'existence des oxydes de cuprate superconducteurs à haute température.

Pour revenir au rôle des théoriciens, je les vois comme des catalyseurs. Leur proportion n'est pas nécessairement importante, dans les équipes, mais ils jouent un rôle important de «pollinisation» quand ils visitent beaucoup de laboratoires.

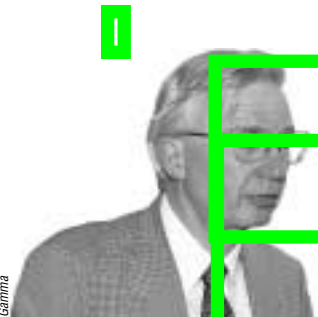
Les grandes lignes d'une forme d'approche à la physique ayant été ainsi considérées, quelles qualités sont-elles utiles? Certaines qualités spécifiques sont un atout : par exemple, en France, deux chercheurs, Jacques Fléchet et Yves Bouligand, sont doués d'une

bonne vision dans l'espace : elle a considérablement facilité la recherche sur les défauts dans les cristaux liquides.

D'autre part, les physiciens théoriciens ont intérêt à suivre couramment le catalogue des nouveaux outils théoriques ; et à évaluer leurs potentialités pour leur recherche personnelle.

Il y a aussi une gymnastique mentale utile à tous : c'est la détermination d'ordres de grandeur, qui permet au physicien de s'assurer qu'il perçoit bien le problème qu'il étudie. C'est un garde-bou qui évite de croire prépondérants des phénomènes de deuxième ordre. On peut s'amuser à chercher des ordres de grandeur à propos de n'importe quoi. On utilise un stylo en matière plastique : quelle est la production annuelle de plastique en France? On joue du piano : peut-on estimer le nombre d'accordeurs de piano à Paris (c'est un problème que le physicien Enrico Fermi posait, jadis)? On disperse des tonnes d'atomes radioactifs sur l'Europe occidentale, à partir de Tchernobyl : combien de molécules chimiques ou biologiques seront détruites par mètre carré? Le jeu des ordres de grandeur n'est pas suffisant, pour faire un bon physicien, mais il est sans doute nécessaire.

**Pierre-Gilles de GENNES est professeur au Collège de France et directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de Paris.**



## L'intelligence du chimiste

JEAN-MARIE LEHN

**L'**intelligence du chimiste? La difficulté de cette question est aggravée par la diversité de la chimie : un chimiste qui cherche à synthétiser des molécules organiques ne met pas en œuvre les mêmes talents qu'un spécialiste d'analyse, par exemple. Toutefois la chimie lui rappellera trois types d'intelligence.

Tout d'abord, une faculté «conceptuelle» qui permet de dégager une règle, une caractéristique générale, d'un ensemble souvent touffu de faits expérimentaux. La grippe se manifeste diffé-

remment chez les divers individus, mais c'est toujours la grippe ; de même, un groupe peut donner tel groupe thiol. Or, à des propriétés différentes selon la nature exacte de la molécule qui contient, mais tous les groupes thiols ont une réactivité commune. Savoir identifier ces propriétés communes ou savoir dégager des règles qui expliquent le mécanisme des réactions, dans la forêt des faits expérimentaux : voilà une capacité que le chimiste gagne à acquérir.

La deuxième faculté importante est l'observation : un bon chimiste doit savoir

observer, ne pas passer à côté de détails qui peuvent se révéler importants, être attentif et ne pas rejeter l'inattendu par lequel les faits veulent en quelque sorte nous dire quelque chose.

Enfin, le chimiste doit être capable de percevoir l'organisation, l'organisation spatiale d'abord – c'est une évidence, car les molécules sont des constructions dans l'espace – et aussi l'organisation logique : la logique des séquences réactionnelles. Une synthèse est une longue séquence de réactions dans laquelle la stratégie est importante ; il faut savoir se représenter

l'ensemble élaborer des voies d'approche originales et conserver l'idée du but final.

Examinons plus en détail ces trois formes d'intelligence.

La capacité de voir dans l'espace, évoquée en dernier, est celle qui doit sans doute être acquise en premier : les molécules étant des assemblages d'atomes, leurs propriétés résultent de la disposition des atomes et du maillage des liaisons chimiques. Cette perception, importante en chimie moléculaire, s'impose plus encore quand on se préoccupe de chimie supramoléculaire, c'est-à-dire d'assemblages complexes de molécules qui s'asortissent de propriétés d'un genre nouveau. Elle est également fondamentale en biochimie, en physico-chimie des matériaux, etc.

Comment se familiariser avec l'agencement des atomes dans les molécules ou, plus généralement, des objets dans l'espace? Les chimistes ont peut-être intérêt à apprendre le dessin ou la peinture, et des notions de perspective leur sont certainement utiles. Naguère, les ingénieurs bénéficiaient de cours de dessin industriel, mais cet enseignement a été progressivement éliminé ; il est absent des enseignements universitaires en sciences exactes. C'est sans doute regrettable.

Naturellement l'esprit peut être soutenu par la matière : les modèles de molécules que l'on réalise à l'aide de boules et de tiges en bois ou en plastique, représentant atomes et liaisons, sont utilisés depuis longtemps ; ils sont aujourd'hui remplacés par des programmes de modélisation moléculaire, mais le but n'a pas changé. La conviction de l'importance de la vision dans l'espace nous a même poussé à créer un jeu qui tient à la fois du *Monopoly* et du *Lego* : au lieu d'acheter des rues, des maisons et des hôtels, les joueurs

leur servent à construire des modèles de molécule de telle ou telle propriété. Nous proposons – enfants et adultes – une idée des architectures moléculaires. Les pythagoriciens avaient écrit devant la porte du Lycée : «Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre». Les laboratoires de chimie pourraient reprendre la devise.

Le chimiste gagne également à posséder l'esprit de finesse, le sens de la beauté d'une molécule, de l'élégance d'une stratégie de synthèse. Cette perception, très élegante, éminemment subjective, permet d'innover : pour faire progresser la science, il faut avoir l'idée de mettre ensemble des choses qui ne l'étaient habituellement pas, de voir des relations nouvelles. De nombreux enfants ont naturellement cet esprit, quand ils jouent : en chimie comme

dans le jeu, la part de l'inventivité est très importante.

D'ailleurs la chimie est aussi un jeu : celui de la fabrication de molécules ayant une géométrie et une réactivité données. Pour acquiescer cette sensibilité à la forme, j'encourage les jeunes à s'arrêter devant les formes, à les admirer, à les analyser. Pourquoi pas, même, à faire de la sculpture ou de la poterie? Le physico-chimiste britannique Michael Faraday n'a-t-il pas dû, à son apprentissage de relieur la capacité de mettre au point les équipements expérimentaux? Avec les travaux manuels, on se donne le loisir de tester, de démonter, de percevoir la résistance et la flexibilité des objets. Et cette perception aide le chimiste, qui se mesure à la matière moléculaire, également malléable et transformable.

Toutefois la chimie n'est pas une collection de papillons : les molécules ne sont pas des objets morts, épinglés dans des catalogues. Elles intéressent surtout par leurs capacités à réagir et à se transformer. La compréhension intime des transformations est importante. Je suis venu à la chimie parce que j'étais impressionné de voir que deux molécules A et B, réunies, engendraient parfois une troisième molécule C qui n'était pas simplement un mélange de A et de B. Le chimiste a un sentiment de puissance, prométhéen, qu'il enrichit par son raisonnement. La prévision du résultat d'une certaine réaction chimique et l'invention de nouvelles réactions sont des activités majeures de la chimie, et cela commence par une meilleure compréhension des mécanismes intimes par lesquels ces transformations se font. Devrait-on au fronton des laboratoires, à côté de la première devise, inscrire aussi : «La chimie transforme la matière?»

Tout en mise en contact de molécules amène à se poser la question : qu'obtient-on du résultat de la réaction chimique entre les réactifs? Cette chimie mécanistique est intellectuellement passionnante : on applique l'arsenal des connaissances sur les réactifs, leur réactivité, le milieu, les paramètres thermodynamiques... et l'on essaie de prédire le résultat de la réaction chimique. Quand on a le sentiment qu'une réaction est possible, mais qu'on manque de données pour en être certain, on effectue réellement la réaction et l'on en analyse le résultat : le chimiste doit être aventureux!

La seule connaissance des réactions individuelles ne fait pas un chimiste d'envergure. Comment apprendre à déce-

ler des combinaisons nouvelles? Il y a quelques décennies, le sociologue strasbourgeois Abraham Moles s'était posé ce problème général et il proposait, dans son livre *La création scientifique*, l'usage de tableaux qu'il nommait «matrices d'invention». Dmitri Mendeleïev, quand il créa son *Tableau périodique*, classa les éléments en un tableau, ce qui le conduisit à prédire l'existence d'éléments chimiques qui étaient encore inconnus. De tels tableaux sont utiles, parce qu'ils permettent une étude systématique. Faut-il avoir une molécule nouvelle, comment épister des propriétés nouvelles? Le chimiste étudie cette question en répondant à des questions du type : «Que se passerait-il si je changeais tel ou tel groupe de la molécule?». La rigueur donnée par les matrices d'invention, ou par un autre moyen de ce type, permet une exploration complète des propriétés chimiques.

J'ai l'impression que la philosophie, et non seulement le travail épistémologique de Moles, peut être directement utile au scientifique, dans sa réflexion sur ses recherches : les philosophes essaient de formuler une conception générale du monde. Il me semble que c'est mon intérêt pour les théories de la connaissance qui m'a finalement conduit à me demander, vers 1965-1966, comment un chimiste pourrait contribuer à l'étude du fonctionnement du système nerveux, support de la pensée. Je me suis alors intéressé au transport d'ions à travers les membranes cellulaires, un phénomène qui intervient dans l'influx nerveux, et, en conséquence, à me poser la question de la distinction des ions sodium et des ions potassium, dont les flux participent à la propagation des signaux nerveux. Ces ions étant sphériques, le problème est devenu celui de reconnaître une sphère dans un ensemble de sphères. Sa généralisation a tout naturellement conduit à l'idée de reconnaissance moléculaire.

Toutefois, la reconnaissance résulte d'interactions, en chimie comme ailleurs, et l'on a abordé ainsi au niveau supramoléculaire. Et tout d'un coup, il y a une information présente dans les molécules. La chimie supramoléculaire devient en quelque sorte une façon de mettre en œuvre cette information. Son apport majeur à la chimie est sans doute cette notion d'information portée par la structure moléculaire et traitée au niveau supramoléculaire.

L'étape suivante s'imposait : si l'on sait faire des objets qui se reconnaissent, pourrait-on concevoir des systèmes qui s'auto-organisent en architectures complexes sur la base des informations

qu'ils contiennent? On en arrive aux problèmes de l'organisation de la matière et de son évolution vers une complexité croissante, matière divisée, condensée, organisée, matière vivante, matière pensante. Un vaste programme!

Mes conseils pratiques à un jeune chimiste? Apprends pour comprendre bien sûr, mais, surtout, garde un contact direct avec la matière, fais des expériences pour cultiver cette faculté de transformer la matière. Toutefois, ne reste pas

le nez collé à la paillasse, car ce métier de chimiste est aussi plein de grandes idées. Regarde autour de toi les grandes questions et traduis-les dans ton langage de chimiste. S'il y a un risque de te laisser guider par des idées générales, la paillasse te ramènera au concret, à la réalisation qui laisse sa marque dans la matière. La chimie aide à suivre le précepte de San Antonio : « Dans la vie, il faut choisir, mon prince, s'écouter parler ou se faire entendre ». Sois donc fier

de ce que tu fais, de ce pouvoir sur la matière que te donne la chimie, de cette capacité qu'elle a de créer molécules nouvelles et matériaux nouveaux, qui relève d'une faculté créatrice, semblable à celle de l'art.

**Jean-Marie LEHN** est professeur au Collège de France et directeur du Laboratoire de chimie supramoléculaire ISIS – ULP-CNRS ESA-7006, à Strasbourg.



## L'intelligence en mathématique

ALAIN CONNES

J'éprouve une certaine réticence à parler d'intelligence, car j'ai toujours considéré les mathématiques comme une école quotidienne d'humilité. Je me méfie lorsqu'un mathématicien se vante de ses succès sans mentionner ses échecs. En revanche, je saisis volontiers l'occasion de parler de mathématiques et de la difficulté qu'il y a à décrire de façon rigoureuse l'activité du mathématicien : l'employée de maison d'un mathématicien célèbre, interrogée sur l'activité de celui-ci, répondit qu'il passait son temps dans son bureau, à écrire sur des bouts de papier qu'il jetait ensuite consciencieusement à la poubelle. L'activité du mathématicien pose ainsi un problème spécifique qui a trait à la nature de la réalité mathématique.

Si toute science ne se réduit pas à son objet, le physicien, le chimiste, le géologue ou l'astronome savent quel est l'objet de leur travail : à diverses échelles, ils étudient la structure et l'organisation de la matière. L'existence d'un monde matériel extérieur est un *a priori* simple, qui n'est remis en cause qu'en mécanique quantique. La distinction entre invention et découverte est également claire : on invente des outils nouveaux d'exploration, tel le microscope à effet tunnel ; on découvre les structures, telle la double hélice de l'ADN.

En mathématiques, le problème est différent : l'évidence des considérations précédentes fait place à une interrogation philosophique légitime devant la difficulté qu'il y a, pour un mathématicien, à spécifier, devant un matérialiste pur et

dur, la nature de la réalité mathématique et du travail de mathématicien. Pour situer le problème, il convient d'opposer, d'une part, les « platoniciens », qui se considèrent comme les explorateurs d'un « monde mathématique » dont l'existence n'a fait pour eux aucun doute et dont ils découvrent la structure et, d'autre part, les « formalistes » qui se retranchent derrière une attitude sceptique, les mathématiques n'étant pour eux qu'une suite de déductions logiques dans un système formel, une sorte de langage purifié.

Pour le non-mathématicien, les mathématiques apparaissent trop souvent comme un jeu sans autre objet que celui d'aiguiser l'acuité intellectuelle ; elles sont généralement rencontrées et utilisées comme un langage. Le chimiste ou le biologiste, par exemple, doivent parfois utiliser le langage mathématique pour préciser leur pensée. Cette utilisation du langage mathématique est cependant un raffinement sélectif qui est propre à tout langage, y compris le langage scientifique non mathématique. Pour saisir le sens des mathématiques, en même temps qu'elle fait croire que les mathématiques se réduisent à un langage. Ce point de vue est cohérent avec celui des formalistes, qui a donc *a priori* la symphonie d'un scientifique non mathématicien.

Les mathématiciens ont deux sources vigoureuses d'expérimentation et d'information directes : l'espace physique, source de la géométrie, et les entiers naturels, source de la théorie des nombres. Un nombre entier est premier, tel 1997,

s'il n'a pas d'autre diviseur que 1 et lui-même. Une expérimentation simple avec les nombres, par exemple comprise entre 1 et 1 000, montre que la liste des nombres premiers semble continuer indéfiniment. Une exploration plus poussée, à l'aide d'un ordinateur, n'infirme pas cette impression, mais ne peut en rien la prouver, puisque la vérification d'un tel énoncé nécessiterait une infinité de calculs (c'est ce que l'on appelle un énoncé de type universel).

Le travail du mathématicien consiste à remplacer la constatation expérimentale par une preuve. Pour les nombres premiers, ce travail remonte à Euclide. Que dit le résultat? Qu'à toute personne qui prétendra avoir trouvé le plus grand de tous les nombres premiers, disons  $2^{132\,049} - 1$ , on pourra rétorquer « vous vous trompez » et expliquer une méthode par laquelle on trouvera un nombre premier plus grand. Ce travail se rapporte ainsi à une réalité, tout aussi contraignante que la réalité extérieure ; dit autrement, peu importe que nous laisserions à quelqu'un pour trouver le plus grand nombre premier, nous savons l'entreprise vouée à l'échec.

En énonçant qu'il n'existe pas de plus grand nombre premier, le mathématicien réussit à dévoiler un aspect – ici, l'infinité des nombres premiers – d'une réalité tout aussi mystérieuse et *a priori* incohérente que la réalité qui nous entoure. S'il veut entrevoir comment cette infinité de nombres premiers est répartie parmi les nombres entiers, l'expérimentation peut être largement aussi déroutante que n'importe quelle exploration du monde

extérieur. Par exemple, 1999 est également un nombre premier, de sorte que 1997 et 1999 sont des nombres premiers jumeaux ; existe-t-il une infinité de nombres premiers jumeaux ? On l'ignore. D'autre part, la réalité mathématique a la même «extraordinaire intelligibilité» que la réalité extérieure et, pour ne prendre qu'un exemple, la célèbre conjecture du mathématicien allemand Bernhard Riemann (1826-1866) sur les zéros de la fonction zêta (toujours non démontrée) signifie qu'avec une erreur de l'ordre de la racine carrée de  $n$ , le nombre de nombres premiers inférieurs à  $n$  est donné par une fonction nommée logarithme intégral  $Li(n)$ .

L'essence du travail mathématique est l'élaboration des concepts et des outils qui, éventuellement, rendent accessible la solution de quelques problèmes fondamentaux. En un sens, le mathématicien essaie de percevoir et de comprendre la réalité mathématique primitive, brute, non structurée *a priori*. Que cette réalité ne soit pas localisable dans l'espace-temps a peu d'importance ; elle n'en est pas moins accessible, ne serait-ce qu'expérimentalement, grâce à la réalité physique. Les mathématiques donnent ainsi un accès direct, d'emblée, à la pensée pure, à une unité sans limite. C'est ce qui a permis la prise lorsqu'un jour, pendant les grandes vacances, mon fils âgé de cinq ans vint le trouver après avoir passé une heure sur la plage avec cet air soufriteux caractéristique de la réflexion intense, et lui dit : «Papa, il n'y a pas de plus grand nombre...»

**J**e pense que l'acte créateur, en mathématiques, s'effectue par le langage, lors du découpage conceptuel de la réalité mathématique. Pour créer des mathématiques, on doit d'abord faire la distinction entre, d'une part, une réalité mathématique brute, initialement étiquetée de manière inductive avec une large part d'arbitraire, telle que les entiers dans le système décimal, et, d'autre part, le système formel, de nature axiomatique déductive, que le cerveau humain met au point pour percevoir et appréhender cette réalité mathématique brute.

Un fait empirique de l'arithmétique a bien peu de chances d'être compris s'il ne se formule pas de manière naturelle et esthétique dans le langage du système formel du mathématicien. L'histoire du problème de Fermat n'est devenue réellement accessible qu'à la fin des années 1980, grâce à la théorie des courbes elliptiques. Même quand une formulation conceptuelle a été trouvée, comme pour l'hypothèse de Riemann, le problème peut rester trop difficile, mais le mathématicien a au moins la possibilité de considérer un problème analogue, transplanté en quelque sorte dans une situation

voisine plus simple. La résolution du problème analogue éclaire bien souvent le cas initial et permet d'avancer vers sa solution.

**E**n conclusion, examinons en quel sens les travaux de Kurt Gödel ont mis un point final à la tentation réductionniste des formalistes et comment ils permettent de distinguer la réalité mathématique primitive du système de perception que le cerveau humain élabore pour comprendre et explorer cette réalité. Les formalistes pensent que les mathématiques sont uniquement des constructions hypothético-déductives élaborées par l'homme, et dont le caractère essentiel est d'être exemptes de connotations. Ce point de vue a été systématisé par le mathématicien David Hilbert qui voulait définir clairement et sans ambiguïté ce qu'est une démonstration mathématique. Hilbert a ainsi introduit la notion de système formel. Un tel système est donné par un alphabet fini, une grammaire qui spécifie ce qu'est un énoncé cohérent, un nombre fini de propositions supposées vraies, ou axiomes, et des règles d'inférence logique qui permettent de procéder à des déductions.

Les mathématiciens espéraient réduire les mathématiques à un tel langage formel. Si ce rêve avait abouti, le point de vue exprimé par les formalistes aurait été parfaitement justifié et il aurait été tentant de réduire les mathématiques à un langage. Les travaux de Gödel, aux environs de 1930, ont donné une réponse négative et définitive à ces espoirs de formalisme. On mentionne souvent l'«indécidabilité» démontrée par Gödel (on ne pourra jamais savoir si certains énoncés sont vrais ou faux), mais l'énoncé le plus fort et le plus troublant pour les formalistes est bien le suivant : «Pour tout système déductif formel  $S$  non contradictoire, il existe un énoncé vrai portant sur l'arithmétique des entiers naturels, et qui est indémontrable dans  $S$ ».

Il peut surprendre, au premier abord, qu'un énoncé arithmétique puisse être vrai sans être démontrable. En l'occurrence, il s'agit d'un énoncé universel, c'est-à-dire de la forme «Pour tout entier  $n$ , une certaine propriété  $P(n)$  est satisfaite». Si l'on démontre un tel énoncé, sa véracité en découle, mais il peut très bien être vrai, au sens où, pour toute valeur de  $n$ , on a  $P(n)$ , sans pour autant que  $P(n)$  soit démontrable.

Ainsi un système déductif formel, c'est-à-dire un outil projectif que nous mettons au point grâce à notre cerveau pour percevoir la réalité mathématique, ne peut épuiser même les propriétés des entiers naturels. L'information contenue dans la réalité primitive, brute, des entiers naturels n'est pas de type fini, et elle échappera à toute tentative de réduction aux

déductions d'un langage formel. Ce résultat montre clairement la distinction entre cette réalité mathématique primitive et le système déductif que l'homme élabore pour l'analyser et la comprendre. Il est clair que ce système est une élaboration de notre cerveau, et qu'il a une évolution presque biologique, par sélection et intégration au «corpus culturel» des mathématiques engrangées dans les bibliothèques. Mais si on l'oppose à la réalité mathématique primitive qu'il a pour objet, on y gagne sur le plan conceptuel, en éliminant le côté négatif du théorème de Gödel, et même sur la compréhension de la pratique du mathématicien.

Les mathématiciens ont d'ailleurs, en général, deux manières de procéder : (1) mettre au point des outils, (2) soulever un coin du voile qui recouvre la réalité mathématique primitive. Ainsi un outil nouveau n'acquiert vraiment droit à autre chose qu'à une bienveillante méfiance de la part de ceux qui ont été essentiels dans ce que les Anglo-Saxons appellent fort justement un *breakthrough*, un passage en force à travers le voile qui nous aveugle.

**I**l n'y a pas de recette générale pour réussir une telle avancée ; ce serait trop simple ! L'expérience montre que chaque mathématicien est un cas particulier. Tout au plus peut-on rappeler quelques règles élémentaires : par exemple, on ne doit jamais se précipiter pour lire une démonstration sans d'abord chercher à la trouver par soi-même. Des astuces aident à se concentrer plus facilement, comme de s'interrompre au travail de réflexion qu'on mûrit l'une démonstration. On peut aussi donner l'exemple de John Conway (mathématicien de Princeton) qui a programmé son ordinateur pour que ce dernier lui pose chaque matin une question du style : «Quel jour de la semaine est le 21 janvier 1833 ?». Si J. Conway ne répond pas en moins de 30 secondes, l'ordinateur refuse de s'ouvrir.

Il n'est pas clair que les découvertes récentes sur le fonctionnement du cerveau nous soient plus utiles que les enseignements du positivisme de Jacques Hadamard (que je recommande) sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique. Vouloir réduire la réalité mathématique à des états physiques des neurones du cerveau, c'est un peu vouloir réduire la littérature à des réactions entre molécules d'encre et de papier, et le café reste jusqu'à nouvel ordre la meilleure drogue pour démontrer des théorèmes.

**Alain CONNES est professeur à l'Institut des hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette.**



# L'intelligence en biologie

JEAN-DIDIER VINCENT

**P**référer, comme je le fais, que l'intelligence est inséparable de l'affect, de la passion, c'est aussi se donner un guide pratique pour l'exercice de la biologie : pour interpréter, comprendre, penser le vivant, vivons et conservons l'idée que le vivant, comme nous, a une histoire.

J'ai la conviction qu'une intelligence purement formelle explorerait mal le vivant, parce que le sens du vivant échappe à une syntaxe intemporelle ; il n'émerge que de l'histoire individuelle des organismes ou de l'histoire évolutive des espèces. Pour révéler les mécanismes du vivant, le biologiste doit sans cesse passer les données au crible de cette double histoire. La nécessité d'interpréter l'histoire individuelle des organismes suffit à justifier la passion que je réclame : les êtres vivants ne se constitueront pas par les passions, au sens de la jouissance, du plaisir ou de la souffrance ? Leur histoire n'est-elle pas ainsi toute passion ? Même des phénomènes qui semblent aussi mécaniques que les conditions de l'éclosion des passions en œuvre : le chien qui salive à l'écoute d'une cloche « sait » qu'il recevra de la nourriture, objet de plaisir. De ce fait, le biologiste qui analyse le vivant gagne à se fonder sur sa propre humanité, à se ramener donc à ses propres passions pour comprendre et interpréter les observations et les expériences qu'il fait.

En ce sens, l'intelligence du biologiste est aussi celle de l'intelligence de sa propre vie, contrairement à celle du mathématicien, du physicien ou du chimiste, qui étudient des objets inafectés. Le biologiste, lui, a une réflexion incarnée, même quand il étudie des bactéries. Car derrière la bactérie, il y a toute la vie de la bactérie : son développement, sa croissance, ses mouvements, les fermentations, les maladies qu'elle subit ou qu'elle fait subir, la mort. C'est une particule subatomique à une stabilité limitée, mais elle n'a pas d'histoire : un électron a des caractéristiques immuables tant qu'il est stable.

La vie est une fable. Le vivant est une histoire, qui s'incarne, et l'intelligence du biologiste est à son mieux

quand le biologiste a une relation avec la souffrance ou avec la vie de l'individu. Un médecin qui soigne un malade, un des atomes. D'ailleurs, le mot « biologie », né au début du XIX<sup>e</sup> siècle, est venu remplacer celui de « physiologie », laquelle traite du rapport de l'être vivant avec la nature. La physiologie et la médecine sont synonymes.

**E**n pratique, comment le biologiste peut-il se polluer efficacement avec la complexité du vivant ? Cette question montre bien que la biologie est une science à part : en chimie ou en physique, on peut isoler les systèmes, les simplifier, les réduire. En biologie, on n'a pas souvent ce recours : on ne connaît pas de modèle simplifié de micro-organisme, par exemple. Les résultats d'expériences sont notoirement difficiles à interpréter.

En neurobiologie, par exemple, celui qui étudie la mémoire d'animaux dont il lèse le cerveau ne perturbe pas le système qu'il étudie comme le fait le physicien qui change un seul paramètre. Aussi, lors de l'interprétation des résultats, le biologiste doit-il faire un bilan entre ce qui a été supprimé et ce qui a été gagné lors de la suppression. Il ne peut jamais se contenter de simples soustractions ou additions d'effets ; le système étudié est comme une toile d'araignée qui s'agit de toute part quand on la touche en un point.

Pour s'en tirer, on ne peut, j'y reviens, faire abstraction du sens des phénomènes. Jedis bien sens, et non finalité. Sans la passion qui éclaire le sens, la biologie moléculaire risque de devenir une chimie physique qui ne comprend pas les observations qu'elle fait. Pour interpréter les phénomènes biologiques, le biologiste doit reconnaître que l'organisme est le produit d'une interaction avec son milieu ; il doit savoir que le milieu exerce des contraintes sur l'homme comme sur l'animal, sur la plante ou sur le micro-organisme. Si le milieu exerce, par exemple, des contraintes périodiques, l'organisme se sera adapté à cette périodicité ; un biologiste qui étudierait ainsi une libération d'hormones, telle que la prolactine, ne pourra conduire ses expériences et tirer des conclusions perti-

nentes qu'il tient compte du phénomène de la périodicité de la contrainte exercée par le milieu.

De même, un médecin qui veut déclencher une ovulation chez une femme stérile en lui administrant l'hormone GnRH (la gonadostimuline, libérée par l'hypothalamus, qui stimule l'hypophyse) doit avoir l'intelligence du vivant pour être efficace : d'une part, le terrain doit être préparé (l'ovulation ne peut se faire à n'importe quel moment), et, d'autre part, l'injection doit être accordée sur le rythme de l'organisme, qui est, d'ailleurs, aussi celui du milieu, en raison de la longue adaptation des organismes à leur milieu. L'injection d'urgence.

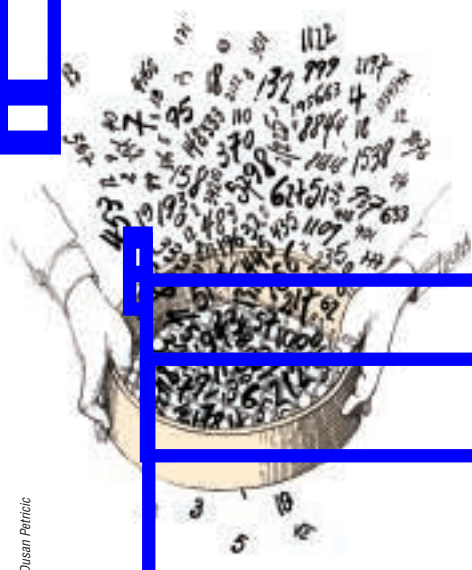
Le temps fait l'action, et l'on doit avoir l'idée que le sens du vivant est comme une histoire. Tout le vivant est le produit de l'éclosion ; il n'existe pas d'organisme qui ne soit le produit d'une histoire. Au total, le biologiste aura l'intelligence de son objet s'il rapporte les phénomènes à l'aune de la sélection naturelle, s'il donne aux modèles un cadre spatial et temporel.

**C**omment s'exercer à la biologie ? Comment devenir ce fouineur à l'intelligence biologique ? Comment apprendre à intégrer ? Comment devenir capable de l'enquête ? Les observations précédentes montrent que le biologiste doit apprendre à réunir les fils : le fil chimique tout comme le fil psychologique. Toutefois il doit également vivre, et vivre passionnément, puisque l'analyse des passions sera la clef du monde vivant.

Jeunes biologistes, vivez fort, expérimentez, discutez de vos résultats, faites vivre les expériences, soyez rigoureux dans de leur conduite mais ensuite revivez-les dans le schéma, l'interprétation, le projet... Méiez-vous de l'enfermement dans le quotidien expérimental. La virtuosité technique est un risque : le biologiste, s'il s'intéresse à l'instrumentation pour elle-même, perd la possibilité de se passionner pour l'objet qui doit être celui de son étude : le vivant.

**Jean-Didier VINCENT est professeur à l'Institut universitaire de France et directeur de l'Institut Alfred Fessard (CNRS).**





Dusan Petric

# Champernowne, et quelques autres

JEAN-PAUL DELAHAYE

**Les décimales infinies des irrationnels recèlent des mystères qui résistent à toutes les attaques.**

**L**es nombres réels qui ne sont pas des fractions de nombres entiers (et que l'on appelle les irrationnels, par exemple  $\sqrt{2}$ ) s'écrivent sans répétition périodique de leurs décimales, et c'est leur caractérisation la plus simple. Par exemple,  $2/13$  est rationnel, et donc périodique,  $2/13 = 0,153846153846...$  En revanche,  $\sqrt{2}$ , irrationnel, n'est donc pas périodique, ce que l'on constate en observant ses décimales 1,41421356..., aussi loin que l'on aille. Les Grecs ont démontré que  $\sqrt{2}$  ne peut être exprimé sous forme de fraction.

Cela ne signifie pas que les décimales d'un nombre irrationnel sont toujours irrégulières, car il existe bien des régularités autres que la périodicité. Le nombre de Champernowne, inventé par le mathématicien anglais D. Champernowne en 1933, engendré par une règle simple (la suite des entiers en base 10), est très régulier et prévisible, mais l'ordre de ses décimales n'est pas périodique : 0,1234567891011121314151617181920...

Le nombre de Champernowne est irrationnel (ce n'est pas le rapport exact de deux nombres entiers). Ce nombre est même transcendant, c'est-à-dire qu'il n'est solution d'aucune équation polynomiale à coefficients entiers, comme l'est  $\sqrt{2}$ , qui, par définition, vérifie :  $x^2 - 2 = 0$ .

Cette transcendance du nombre de Champernowne a été démontrée sur un lit d'hôpital en 1937, par le mathématicien allemand Kurt Mahler : à la suite d'une opération, il avait reçu des injections de morphine et voulait se prouver que son cerveau était intact.

Les nombres qui sont solutions d'une équation polynomiale à coefficients entiers sont dits nombres algébriques : certains s'écrivent avec des radicaux, comme  $\sqrt{3}$ ,  $\sqrt[5]{7}$ ,  $\sqrt[3]{(1+\sqrt{7})}$  : on les appelle nombres algébriques exprimables par radicaux. En revanche, certains nombres algébriques ne sont pas exprimables par radicaux : on sait, par exemple, que les solutions de l'équation  $2x^5 - 5x^4 + 5 = 0$

ne le sont pas. Toutes les solutions d'équations polynomiales à coefficients entiers de degré inférieur ou égal à 4 sont exprimables par radicaux, alors que, dès qu'une équation polynomiale a un degré supérieur à 4, ses solutions ne sont, le plus souvent, plus exprimables par radicaux.

La classification habituelle des nombres réels, étudiée soigneusement au XIX<sup>e</sup> siècle, en allant des plus simples aux plus compliqués, se présente comme suit : nombres entiers/nombres rationnels/nombres algébriques exprimables par radicaux/nombres algébriques non exprimables par radicaux/nombres transcendants.

Cette classification ne prend en compte que la nature « équationnelle » des nombres : sont-ils solutions d'équations simples ? Dans le cas des entiers et des rationnels, connaître la nature équationnelle fournit une indication sur la nature des décimales : les entiers n'ont pas de décimales, après la virgule, les rationnels ont des décimales qui se répè-

tent périodiquement. Cette correspondance entre propriétés équationnelles et propriétés des décimales se prolonge-t-elle plus loin, et, si c'est le cas, de quelle façon ? Ces questions sont étonnamment difficiles.

Le nombre de Champernowne est le premier indice de cette difficulté : il est le plus compliqué possible dans la classification « équationnelle » des nombres (puisque l'est transcendant), tout en ayant un développement décimal simple et facile à écrire jusqu'à l'infini. Il suggère que, s'il y a une classification naturelle des nombres en fonction de la régularité de leur développement (décimal ou autre), alors ses liens avec la classification « équationnelle » ne se réduisent pas à une mise en parallèle directe.

Nous découvrirons une classification fondée sur les développements des nombres et nous verrons qu'elle conduit à une multitude de questions naturelles qui défient toujours les mathématiciens.

## NOMBRES ÉQUIRÉPARTIS

Les nombres équirépartis sont, par définition, ceux dont les chiffres vérifient l'égalisation des proportions. La fréquence des «0» dans leurs  $n$  premiers chiffres tend vers 0,1 lorsque  $n$  tend vers l'infini, ainsi que la fréquence des «1», des «2», etc.

Connait-on explicitement des nombres équirépartis ? Oui, en voilà deux :

$R_1 = 0,12345678901234567890...$   
(la suite 1234567890 répétée sans cesse).  
 $R_2 = 0,12333445566778899001122...$   
(la suite 12233344556677889900 répétée sans cesse).

Ces deux nombres, puisqu'ils ont des décimales périodiques, sont rationnels. Ce sont les fractions :

$R_1 = 137174210 / 1111111111...$  et  $R_2 = 113367116734120100/1010101010101010$ . Il est à la fois presque évident et démontrable que, si l'on tire des chiffres au hasard avec un dé équilibré à dix faces (chaque face a une chance sur dix d'être tirée à



**1. Paul Erdős, en 1996, explique au mathématicien Albert Nijenhuis, qui se prépare à payer, pourquoi il a perdu son pari mathématique.**

chaque lancer) et que l'on construit avec les résultats un nombre réel, alors celui-ci est équiréparti. Le désordre total entraîne l'équirépartition.

Or les nombres  $R_1$  et  $R_2$ , ainsi qu'une multitude d'autres construits sur le même principe, prouvent qu'un nombre équiréparti n'est pas toujours désordonné. Les nombres équirépartis peuvent donc être réguliers (comme  $R_1$  ou  $R_2$ ) ou irréguliers (comme ceux résultant d'un tirage équilibrable infini de leurs chiffres). De même, les nombres équirépartis peuvent être rationnels ( $R_1$  et  $R_2$ ) ou irrationnels (comme le nombre de Champernowne qui est transcendant, donc irrationnel). La propriété d'équirépartition des décimales d'un nombre n'indique rien sur sa place dans la classification équationnelle.

Lorsqu'on examine les décimales du nombre de Champernowne, il semble choquant qu'elles soient équiréparties, car dans le début du développement la proportion des «1» est très supérieure à celle des «0» : il y a par exemple huit «1» parmi les 20 premiers chiffres de Champernowne. Pourtant, à l'aide du raisonnement, les mathématiciens ont démontré que cet avantage au profit des «1» s'estompe ensuite. Les fréquences des chiffres de Champernowne s'égalisent à l'infini.

## DES CONSTANTES MATHÉMATIQUES MARQUABLES

Il existe quelques variantes du nombre de Champernowne qui méritent qu'on y réfléchisse. Par exemple, le nombre Pair  $= 0,2468101214161820222426...$  constitué par la suite des nombres pairs.

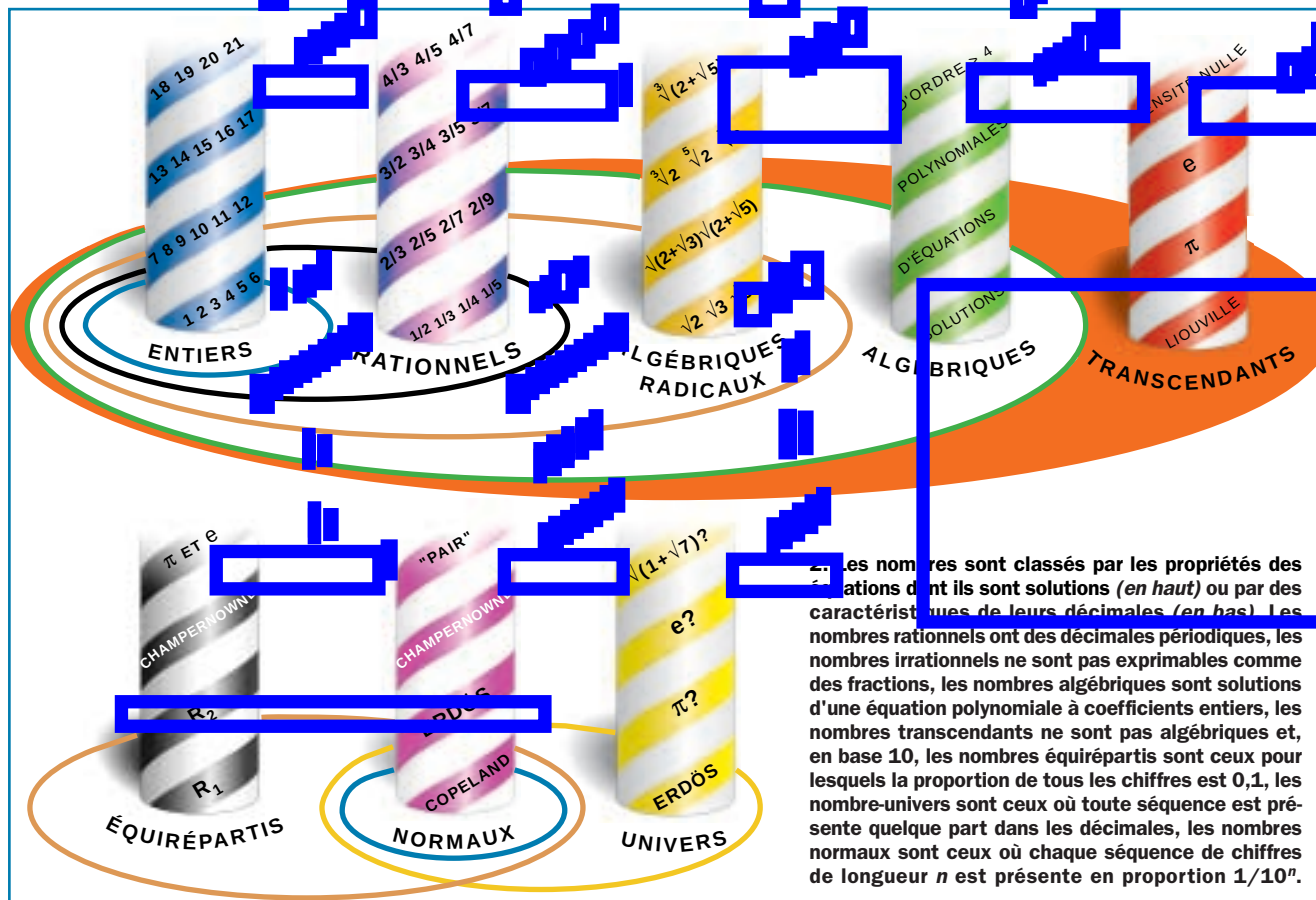
Contrairement aux apparences, ce nombre est aussi équiréparti. L'égalisation des proportions est plus choquante encore que dans le cas de Champernowne car un nombre pair se termine nécessairement par un chiffre pair : 0, 2, 4, 6 ou 8, et en conséquence les chiffres pairs sont favorisés. Cependant, quand on va loin dans la suite, et que les nombres pairs ajoutés les uns après les autres deviennent très longs, cet avantage s'amoitit (le dernier chiffre de chaque nombre pair finissant par être noyé parmi les autres) pour disparaître à l'infini.

Voici un nombre nettement plus complexe, car fondé sur la suite très irrégulière et très mystérieuse des nombres premiers. Erdős  $= 0,235711131719...$  constitue la suite des nombres premiers 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17... Ce nombre doit son nom au mathématicien Paul Erdős, qui a insisté, dans un article écrit avec le mathématicien Arthur Copeland, que ce nombre était équiréparti. Le mot de ce nombre est le nombre de Copeland.

0,4689... 0,2141516182021222425..., constitué des nombres composés – non premiers – les uns à la suite des autres. Là encore, grâce au travail d'Erdős et de Copeland, on sait que ce nombre est équiréparti.

Paul Erdős est un des mathématiciens les plus célèbres et étonnants de notre siècle. Né en Hongrie en 1913 et mort en 1996, il a fait preuve d'une productivité extraordinaire, s'intéressant à une multitude de sujets qu'il a enrichis de quelques merveilles. Il a publié avec des mathématiciens de toutes nationalités, qu'il rencontrait lors du périple mondial permanent qu'a été sa vie. Il ne possédait pas d'adresse (c'était au sens propre un SDF!) et trouvait pénible de rester plus de 15 jours dans la même ville. On disait de Paul Erdős que pour le rencontrer, il suffisait de rester là où l'on était et d'attendre qu'il passe. Il a signé, avec 458 chercheurs, 1 500 publications ce qui, dans le domaine

des mathématiques pures, est un record absolu. Son premier résultat, qu'il établit à l'âge de 16 ans, fut la preuve, par une méthode directe, qu'entre les nombres  $n$  et  $2n$  il y a toujours au moins un nombre premier. Il a travaillé jusqu'à ses derniers jours, il nous a donné des résultats astucieux et profonds qui fascineront longtemps encore la communauté des mathématiciens.



Les nombres sont classés par les propriétés des équations dont ils sont solutions (en haut) ou par les caractéristiques de leurs décimales (en bas). Les nombres rationnels ont des décimales périodiques, les nombres irrationnels ne sont pas exprimables comme des fractions, les nombres algébriques sont solutions d'une équation polynomiale à coefficients entiers, les nombres transcendants ne sont pas algébriques et, en base 10, les nombres équirépartis sont ceux pour lesquels la proportion de tous les chiffres est 0,1, les nombre-univers sont ceux où toute séquence est présente quelque part dans les décimales, les nombres normaux sont ceux où chaque séquence de chiffres de longueur  $n$  est présente en proportion  $1/10^n$ .

## LES 1 000 PREMIÈRES DÉCIMALES DE QUELQUES NOMBRES

À chaque fois, on a compté le nombre de "0", de "1", ... de "9" dans les 1 000 premières décimales. Les écarts avec ce qu'on attend d'un nombre équiréparti ne sont pas significatifs. En menant les calculs plus loin, l'égalisation entre l'utilisation de chaque chiffre devient encore plus nette. Toutes ces constantes numériques sont donc vraisemblablement des nombres équirépartis. Toutefois, on ne sait le prouver pour aucune.

 $\pi$ 

|     |     |     |    |    |    |    |     |     |
|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| 1   | 2   | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8   | 9   |
| 116 | 103 | 103 | 93 | 97 | 94 | 95 | 101 | 105 |

 $e$ 

|    |    |     |    |    |    |    |     |     |
|----|----|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| 1  | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8   | 9   |
| 96 | 98 | 109 | 99 | 85 | 99 | 99 | 103 | 112 |

 $\sqrt{2}$ 

|    |     |    |     |     |    |     |     |    |
|----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|
| 1  | 2   | 3  | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9  |
| 99 | 108 | 82 | 100 | 104 | 90 | 104 | 113 | 92 |

 $\sqrt{3}$ 

|    |     |    |    |    |     |    |     |     |
|----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 1  | 2   | 3  | 4  | 5  | 6   | 7  | 8   | 9   |
| 97 | 100 | 97 | 84 | 92 | 102 | 98 | 125 | 108 |

 $\sqrt[3]{2}$ 

|    |     |    |    |     |     |     |    |     |
|----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| 1  | 2   | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   | 8  | 9   |
| 95 | 106 | 78 | 94 | 100 | 104 | 101 | 93 | 111 |

Les 78 "3" de  $\sqrt{2}$  semblent un peu faibles, mais, en calculant 2 000 décimales de racine cubique de 2, on trouve :

|     |    |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| 197 | 20 | 170 | 180 | 227 | 220 | 207 | 207 | 187 |

Dans le deuxième millier de décimales, il y a eu 101 fois le "3". Rien d'anormal donc.

Le nombre suivant qui retiendra notre attention est plus ancien que les précédents : c'est le nombre de *Liouville*, égal à :

0,1100...100000000000000000001000...  
(des «1» en position  $n!$ , c'est-à-dire en position 1, 2, 6, 24, 120, ...)

Ce nombre est intéressant car c'est un nombre régulier, simple, non équiréparti : à l'infini, la proportion des «0» devient 100 pour cent. Pourtant, le nombre de *Liouville* est transcendant, c'est même le premier nombre dont un mathématicien (Joseph Liouville, en 1844) ait réussi à prouver la transcendance, avant qu'on établisse celle de  $e = 2,718281...$  et celle de  $\pi = 3,1415926...$

Le nombre de *Liouville* montre qu'on peut être transcendant sans être équiréparti, ce qu'on était pas évident *a priori* : ainsi on ignore si  $\pi$  et  $e$  sont équirépartis ou pas (on pense qu'ils le sont sans avoir su faire autre chose que de le constater sur les quelques milliards de décimales qui ont été calculées). Le jour où on le démontrera, on aura prouvé que Dieu, qui a créé  $\pi$ , joue aux dés...

Au total, un nombre transcendant peut être équiréparti ou non ; un nombre équiréparti peut être transcendant ou non ; un nombre rationnel peut être équiréparti

ou non, et un nombre équiréparti peut être rationnel ou non. Par exemple,  $\sqrt{2}$  est transcendant, pour *Erdős* et *Copeland*, on le soupçonne sans avoir su le démontrer. De plus, les quatre nombres *Champernowne*, *Pair*, *Erdős*, *Copeland* ont une autre propriété fascinante : ce sont des nombres-univers.

## LES NOMBRES-UNIVERS

Les nombres-univers sont, par définition, les nombres qui contiennent toutes les suites possibles de chiffres : quelque part vous trouverez 421, quelque part vous trouverez 2 998, mais aussi 314159 ou 1111111111. Ces nombres sont omnis-ciens et universels : ainsi, pour frapper l'imagination, la photo de la pyramide de Louvre enregistrée sous format numérique (comme le fait un appareil de photo numérique) est une suite finie de chiffres et donc, par définition, elle est dans tout nombre-univers, de même bien sûr que le roman (mis sous format numérique) que vous rêvez d'écrire quand vous serez à la retraite. Tout l'univers réel ou imaginaire se trouve dans un nombre-univers, qui est bien entendu irrationnel, car le développement d'un nombre péri-

dique ne contient pas toutes les suites possibles de chiffres.

Quel nombre de *Champernowne* soit un nombre-univers est assez facile à voir, puisqu'il est composé de la suite de tous les nombres entiers : 421 apparaît inévitablement dans ses décimales (quand on écrit l'entier 421), de même que pour 1 000 (quand on écrit 1 000) ou 02 469 (quand on écrit 102 468), etc. Pour *Pair*, *Erdős*, *Copeland*, des raisonnements du même type montrent qu'il s'agit aussi de nombres-univers. Les nombres  $\pi$  et  $e$  ne peuvent être ajoutés avec certitude à cette liste, car aujourd'hui, même si l'on soupçonne qu'ils sont bien des nombres-univers, personne n'a su l'établir rigoureusement.

Les quatre nombres cités ici dont on a prouvé qu'ils étaient univers (*Champernowne*, *Pair*, *Erdős*, *Copeland*) le sont de manière robuste dans le sens suivant : si vous en prenez un et que vous changez un nombre fini (aussi grand soit-il) de ses décimales, vous obtenez un nouveau nombre-univers. En effet, si la séquence 421 est concernée par le changement fini, cela ne peut pas être le cas de toutes les séquences 4 210, 42 100, 421 000, etc., qui sont présentes ailleurs, et donc 421 (ou toute autre séquence) reste dans le nombre modifié.

Existe-il un rapport simple entre la propriété d'équirépartition et celle d'universalité ? Non, certains nombres équirépartis sont des nombres-univers (*Champernowne*), d'autres non ( $R_1$  ou  $R_2$ ), et certains nombres-univers sont équirépartis (*Champernowne*) et d'autres non (le nombre *Densité-nulle* défini plus loin).

Existe-t-il un rapport simple entre la propriété d'être transcendant et la propriété d'être un nombre-univers ? La réponse à cette question est incomplète. On sait que certains nombres transcendants sont univers (*Champernowne*), d'autres non (*Liouville*). En revanche, on ignore s'il existe des nombres-univers non transcendants (nous reviendrons plus loin sur ce point dans nos connaissances).

## LA ROBUSTESSE

Les nombres *Champernowne*, *Pair*, *Erdős* et *Copeland* possèdent une «robustesse» plus grande encore que celle mentionnée plus haut. Non seulement, ils restent univers quand on change un nombre fini de leurs chiffres, mais ils résistent aussi «aux changements infinis de l'écriture» : si vous modifiez les décimales de l'un d'eux en toutes les positions qui sont des nombres carrés 1, 4, 9, ...,  $n^2$ , etc., il reste un nombre-univers. À la place des positions carrées, vous pouvez changer leurs décimales en toutes les positions correspondant à un ensemble infini  $A$  se

«raréfiant à l'infini», c'est-à-dire tel que le nombre d'éléments de  $A$  inférieur à  $n$  divisé par  $n$ , tend vers 0 à l'infini (l'ensemble des nombres premiers ou celui des puissances de 2 sont des exemples de tels ensembles se raréfiant à l'infini).

Le nombre suivant, *Densité-nulle*, égal à 0,10200...0000004..., est un mélange entre *Champernowne* et *Liouville* : il nous permettra de répondre à quelques questions simples. Il est constitué des entiers en écriture décimale les uns derrière les autres, séparés de 1! fois «0», puis 2! fois «0», etc.

Ce nombre est un nombre-univers transcendant, mais n'est pas équiréparti, car la densité des «0» tend vers l'unité, alors que la densité des autres chiffres tend vers 0. Par ailleurs, ce nombre-univers n'est pas robuste : «aux changements infinis se raréfiant», car, en transformant les chiffres autres que «0» en «0», vous n'effectuez des modifications qu'en des positions se raréfiant à l'infini et obtenez cependant un nombre constitué uniquement de «0», qui n'est plus un nombre-univers. Cela prouve que tous les nombres-univers ne sont pas aussi robustes que les quatre cités ci-dessus. Remarquons aussi que *Densité-nulle* montre qu'on peut tout contenir et malgré cela n'être composé pratiquement que de «0», même dans un nombre submergé de «0», il y a encore la place pour tout l'univers.

La grande robustesse aux changements des quatre nombres-univers *Champernowne*, *Pair*, *Erdős*, *Copeland* provient d'une propriété en apparence extraordinaire, la normalité, qui est une sorte de synthèse de l'équirépartition et de l'universalité.

## LES NOMBRES NORMAUX

Un nombre est normal en base 10 si son développement décimal possède la propriété suivante :

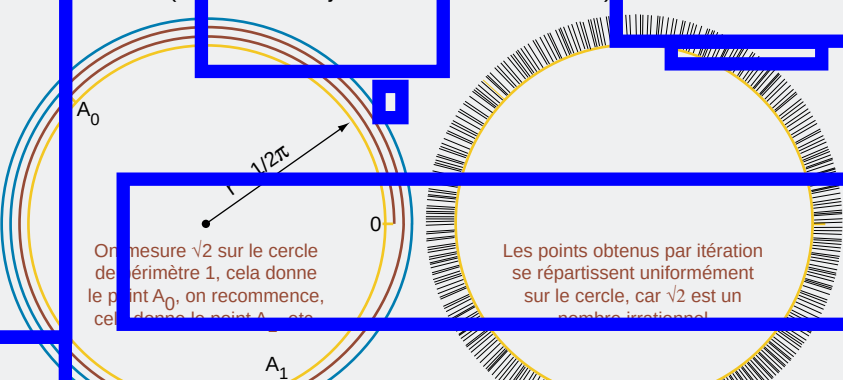
- les 10 chiffres apparaissent en proportions équilibrées (10 pour cent de chaque) ;
- les 100 paires possibles de chiffres consécutifs (00, 01, 02, ..., 99) apparaissent aussi en proportions équilibrées (chacune apparaît avec une fréquence de 1 pour cent) ;
- les 1000 triplets de chiffres consécutifs (000, 001, ..., 999) apparaissent en proportions équilibrées (chaque apparaît avec une fréquence de 0,1 pour cent) ; etc.

Non seulement dans un nombre normal vous trouvez tout (donc un nombre normal est un nombre-univers), mais tout y sera parfaitement équilibré (un nombre normal est donc un nombre équiréparti). La séquence 37 apparaîtra en moyenne autant de fois que la séquence 72, c'est-à-dire une fois sur 100 ; la séquence

## TOUS LES NOMBRES IRRATIONNELS SONT PRESQUE DES NOMBRES-UNIVERS

Le mathématicien Hermann Weyl a fourni en 1916 une caractérisation remarquable des nombres irrationnels qui n'est pas sans rapport avec la notion de nombre-univers.

On trace un cercle de périmètre unité, et donc de rayon  $1/2\pi$ . On fixe une origine sur ce cercle. On se déplace à partir de l'origine sur le périmètre et, à chaque fois qu'on a parcouru une longueur de  $x$ , on marque un point sur le cercle. D'après le résultat de H. Weyl, si  $x$  est irrationnel, les marques que l'on fait sont en nombre infini et se répartissent uniformément sur le cercle (comme s'il s'agissait de points choisis au hasard). Si  $x$  est rationnel, les marques sont en nombre fini (on s'arrête toujours aux mêmes endroits).



Une conséquence de ce résultat est que si  $x$  est irrationnel et si  $s$  est une séquence donnée de chiffres (par exemple 43214), alors il existe un multiple de  $x$  qui possède cette séquence dans sa représentation décimale. En quelque sorte, pris globalement, les multiples d'un irrationnel ont la propriété qui définit un nombre-univers.

En 1998 a paraître avec une fréquence de 212000, comme la séquence 8 642, etc.

Les contraintes qu'on impose à ces nombres sont si nombreuses qu'on peut se demander si elles sont compatibles, c'est-à-dire s'il existe un nombre dont on puisse prouver qu'il est normal.

Les nombres  $e$  et  $\pi$  sont, comme d'habitude, de bons candidats d'après les chiffres qu'on en connaît, mais, comme d'habitude aussi, rien n'a été démontré sur leur normalité. Heureusement, *Champernowne*, *Pair*, *Erdős*, *Copeland* sont plus faciles à manipuler, et on a prouvé qu'ils étaient normaux.

Cette propriété d'équirépartition des décimales d'un nombre, comme les deux précédentes, ne semble pas interférer avec celle d'être transcendant. *Liouville* et *Densité-nulle* sont transcendants sans être normaux, alors que *Champernowne* et *Pair* sont transcendants et normaux.

## LES IRRATIONNELS ALGÈBRIQUES

Si l'on fait le bilan des relations indiquées entre les propriétés équationnelles des nombres et les propriétés de leurs décimales, on remarque que (sauf pour les nombres entiers et rationnels, où tout

est très simple) tout semble possible : dès qu'un nombre est irrationnel, son niveau de complexité équationnelle ne paraît pas interagir sur le niveau de complexité de ses décimales, ni l'inverse. Cette absence d'interaction ne doit pas être considérée comme définitive, car elle résulte d'un certain nombre d'ignorances. La normalité et la profondeur de ces ignorances apparaissent notamment quand on considère le cas des nombres irrationnels algébriques (comme  $\sqrt{2}$ ) : que se soit à propos de la propriété d'équirépartition, d'universalité ou de normalité, le savoir mathématique concernant les nombres algébriques irrationnels est, aujourd'hui encore, rigoureusement nul.

En effet, d'après ce que nous savons pour l'instant, il se peut que :

- tout nombre algébrique irrationnel soit normal ;
- qu'aucun nombre algébrique irrationnel ne soit normal,
- que certains nombres algébriques irrationnels soient normaux et que d'autres ne le soient pas.

Pour l'équirépartition, la situation est la même, ainsi que pour l'universalité. Quant à des propriétés des décimales qui permettraient de distinguer les nombres algébriques exprimables par radicaux et

## RÉGULARITÉ DES DÉCIMALES ET TRANSCENDANCE

Les mathématiciens J. Loxton et A. van der Poorten ont récemment établi le remarquable résultat suivant : un nombre automatique est, ou bien rationnel, ou bien transcendant.

Un nombre  $x$  est dit automatique s'il existe un procédé de calcul ne nécessitant qu'une mémoire finie pour calculer le chiffre numéro  $n$  du développement de  $x$  en fonction du développement de  $n$  (voir exemple plus bas). Les nombres automatiques sont les nombres dont le calcul du développement peut se faire par un moyen élémentaire.

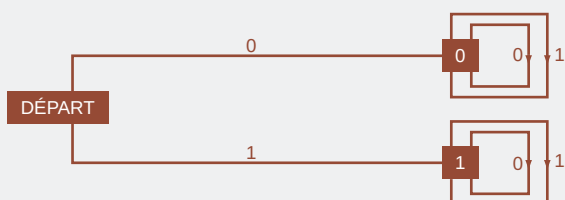
Le résultat de J. Loxton et A. van der Poorten signifie que, si un nombre possède un développement simple à calculer, alors il est, soit équationnellement simple (c'est un rationnel), soit équationnellement complexe (c'est un nombre transcendant). En conséquence, les nombres algébriques irrationnels (par exemple  $\sqrt{3}$ ,  $\sqrt{2}$ ) ont nécessairement des développements

complexes. On est encore loin d'établir que les nombres algébriques irrationnels sont équirépartis, univers ou normaux (ce que certains conjecturent), mais le résultat va dans cette direction.

### Deux nombres automatiques

Voici deux exemples de nombres automatiques, l'un rationnel, l'autre transcendant.

Le nombre rationnel  $2/3$  qui s'écrit  $0,101010101\dots$  en base 2, est un nombre automatique, car pour connaître le chiffre en position  $n$  du développement binaire de  $2/3$ , il suffit d'utiliser l'automate suivant :



AUTOMATE POUR LA SUITE  $2/3 = 0,1010101010\dots$

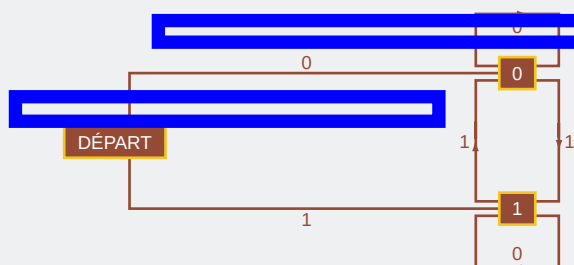
On se place sur le graphe de l'automate en position départ, puis on lit un à un, de droite à gauche, les chiffres de  $n$  écrit en base 2 en suivant la flèche correspondant au chiffre lu. On se déplace ainsi d'un nœud du graphe à l'autre jusqu'à avoir lu entièrement le développement de  $n$ . Le nom du nœud auquel on est arrivé indique alors le chiffre numéro  $n$  du développement de  $x$ .

Exemple : pour connaître le chiffre 6 de  $2/3$ , on écrit 6 en base 2, c'est 110, on se place au nœud [départ], on suit les flèches marquées 0, 1, 1, ce qui nous conduit au nœud [0] : le sixième chiffre de  $2/3$  en base 2 est un 0.

Le nombre de Thue-Morse est un nombre automatique non périodique, donc il est transcendant (d'après le résultat de J. Loxton et A. van der Poorten).

Thue-Morse =  $0,1101001100101101001011001101001\dots$

Ce nombre est constitué des éléments de la suite de Thue-Morse placés les uns derrière les autres. Le  $n$ -ième chiffre est un "1" si l'écriture de  $n$  en base 2 comporte un nombre impair de "1" ; sinon c'est un zéro. Le nombre 5, par exemple, s'écrit 101 en base deux, donc le chiffre placé en position 5 après la virgule dans Thue-Morse sera un 0 (101 comporte un nombre pair de 1). La suite des chiffres de Thue-Morse peut aussi être définie en partant de 0 puis en accolant le complément, 1, ce qui donne 01, puis en recommençant à accoler le complément indéfiniment (0110, 01101001, 011010011010110, etc.) Voici l'automate du nombre de Thue-Morse :



AUTOMATE POUR LA SUITE DE THUE-MORSE =  $0,110100110010110\dots$

ceux qui ne le sont pas, personne aujourd'hui n'en a, non plus, la moindre idée.

Quelques résultats un peu compliqués et épineux fournissent l'indice que certaines relations pourraient avoir cours : il se pourrait d'ailleurs que tout nombre algébrique irrationnel soit équiréparti, univers et normal. Les calculs numériques sur  $\sqrt{2}$  n'en montrent la possibilité.

Le résultat récent de J. Loxton et A. van der Poorten est qu'un nombre automatique est soit rationnel, soit transcendant : il n'en existe pas d'autres hypothèses que tout nombre dont les décimales sont régulières est, soit équationnellement très simple (c'est-à-dire rationnel), soit équationnellement très compliqué (c'est-à-dire transcendant). Le fait que Champernowne et Sierpinski soient transcendants ne serait alors que la conséquence de la régularité de leurs décimales conjointe avec leur non-périodicité.

La recherche des ponts entre les propriétés équationnelles (qui sont indépendantes de la base de numération) et les propriétés liées aux chiffres des nombres (liées à la base de numération) semble d'une grande difficulté. La situation est comparable à celle de la conjecture de Goldbach, qui indique que tout nombre pair est somme de deux nombres premiers (conjecture toujours non démontrée) : la propriété d'être un nombre premier est une propriété multiplicative (liée à la multiplication) ; celle d'être une somme de deux nombres premiers est avant tout une propriété additive (liée à l'addition). Démontrer la conjecture de Goldbach nécessite donc d'établir un pont entre deux zones éloignées de l'univers mathématique, ce qui est difficile, comme l'est la construction d'un pont entre les propriétés équationnelles et les propriétés des développements des nombres. Les mathématiciens regardent les objets du monde abstraits sous divers angles, ils essaient de les mettre en relation et parfois, malgré leur désir acharné d'y parvenir, ils s'avouent temporairement impuissants.

**D.G. CHAMPERNOWNE, *The Construction of Decimal Normal in the Scale of Ten*, in *J. London Math. Soc.*, 8, pp. 254-260, 1933.**

**A. COPELAND et P. ERDÖS, *Note on Normal Numbers*, in *Bulletin American Mathematical Society*, 52, pp. 581-586, 1946.**

**J.-P. DELAHAYE, *Le fascinant nombre  $\pi$* , Éditions Pour La Science-Belin, 1997.**

**V. KLEE et S. WAGON, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory*, Math. Association of America, Dolciani Math. Expositions, n° 11, 1993.**

**J.H. LOXTON et A. J. van der POORTEN, *Arithmetic Properties of Automata...* *J. reine angew. Math.* 392, pp. 57-69, 1988.**



# histoire des sciences

## Le darwinisme social en France (1859-1918). Fascination et rejet d'une idéologie

Jean-Marc Bernardini. CNRS Éditions, 1997.

Deux dates symboliques limitent la période de cette étude historique du darwinisme social en France : la première, 1859, est celle de la parution de *L'origine des espèces*, l'ouvrage magistral de Charles Darwin (1809-1882) ; la seconde marque la fin de la Première Guerre mondiale. Si la révolution darwinienne correspond au renversement du dogme de la fixité des espèces et à la démonstration de leur évolution par la sélection naturelle, le darwinisme social, de réputation sulfureuse, demeure difficile à cerner.

En effet, « défini comme l'extension aux sociétés humaines des lois darwiniennes de la lutte pour l'existence et de la sélection naturelle », ce n'est plus une théorie scientifique, mais une idéologie, qui peut susciter l'adhésion, la fascination ou le rejet. Serait-ce uniquement l'apologie de la force brutale, du cynisme d'une société qui favorise les meilleurs et élimine les moins favorisés, y compris par des mesures eugénistes coercitives ? Le darwinisme social peut aussi présenter des caractéristiques modérées, de sorte qu'il a pu séduire des représentants de tous les bords politiques, philosophiques, littéraires, religieux ou scientifiques. Combien d'opinions, de prises de position ambiguës et changeantes ont été prononcées et écrites au nom du darwinisme social !

Pourquoi Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) n'a-t-il pas engendré un tel déferlement d'opinions, alors qu'il a proclamé le transformisme des espèces, dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle ? Sans doute parce qu'il n'a jamais rédigé un texte comparable à *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle* (1871). Dans cet ouvrage, Dar-

win hiérarchise le monde vivant : à partir d'une forme ancestrale unique, il classe les animaux en inférieurs et supérieurs, les races humaines en inférieures et supérieures (sans oublier les femmes et les hommes). Le sommet de l'édifice est naturellement l'homme blanc de la civilisation occidentale.

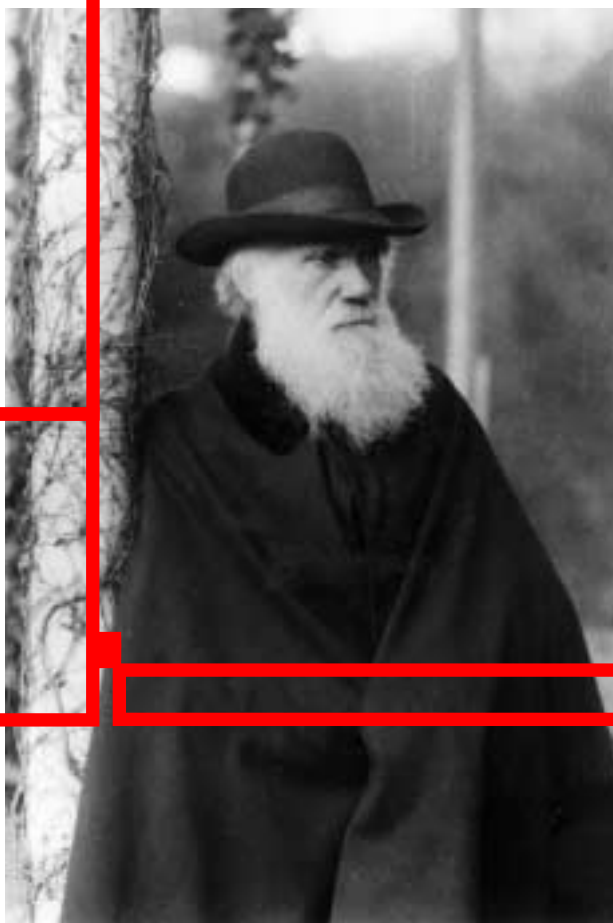
Darwin croit en l'évolution et en l'amélioration de l'homme, mais il comprend l'inefficacité de la sélection naturelle dans une société où l'on pratique la charité et l'aide médicale aux défavorisés. Il accepte ce constat, et refuse la violence et l'élimination. Il est donc le fondateur du darwinisme social, dans sa version modérée. Lui reprocher les dérives engendrées par ses écrits serait abusif, même s'il en a fourni les arguments, bien relayés par le philosophe Herbert Spencer (1820-1903) et l'eugéniste Francis Galton (1822-1911). Le dernier cousin de Darwin, propose des solutions concrètes pour lutter contre la « dégénérescence de la race ».

De 1859 à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on assiste, en France, à l'imprégnation de ce que Jean-Marc Bernardini qualifie de « culture darwinienne », puis du darwinisme social, qui s'instaure à partir des années 1870. L'évolutionnisme est asso-

cié au matérialisme, à l'athéisme et à la morale républicaine, qui propose la science comme substitut à la religion. Les sciences biologiques sont repliées sur leurs débats internes, tandis que les sciences sociales cherchent la légitimation de disciplines émergentes comme la sociologie ou l'économie politique. La science du darwinisme grandit et bénéficie d'un réseau efficace de scientifiques et d'hommes politiques, d'écrivains ou d'historiens : Ernest Renan (1823-1892), Hippolyte Taine (1828-1893), Edgar Quinet (1803-1875) ou Émile Zola (1840-1902) qui, dans *Le roman expérimental*, scutur Étienne et l'anarchiste Souvarine à propos de Darwin et du combat pour l'existence.

Évidemment l'Église réagit, avant d'admettre un transformisme limité au monde animal et végétal, sans aller jusqu'à l'homme (en tout cas, pas au-delà de son enveloppe charnelle). La période est marquée par un balancement des idées entre le darwinisme social et un néo-lamarckisme qui accorde une importance primordiale au milieu (on insiste beaucoup sur le rôle de l'éducation). La vie de la nation interagit avec cette réflexion philosophique à l'occasion de la guerre contre la Prusse, en 1870, de la Commune, en 1871, du colonialisme (parfaite illustration des lois darwiniennes, on considère alors ce dernier comme une fatalité, la force ou la capacité des races vigoureuses à s'étendre hors de leurs frontières), du solidarisme, dans les années 1890 (avec des idées fortes d'association, de coopération, d'assistance, d'aide mutuelle comme moyens d'adoucir la lutte), et de la concurrence industrielle.

Puis, au début du XX<sup>e</sup> siècle, la fascination cesse brusquement, et le darwinisme social devient haïssable. C'est le mondain Ferdinand Brunetière (1849-1900), critique littéraire à la *Revue des Deux Mondes* et membre de l'Académie française, qui lance le pavé dans la mare : il ne remet pas en question le transformisme, mais il dénonce la « faillite de la science », incapable d'élucider l'origine de l'homme et de prévoir, incapable de proposer une morale, dans la religion, il prône un retour à la religion. On dénonce alors les excès du darwinisme, parfaitement illustrés par Georges Vacher de Lapouge (1854-1936), dont l'aryanisme darwinien exacerbé illustre toute l'horreur des dérives racistes.



Charles Darwin proposa d'étendre aux sociétés humaines les lois de la lutte pour l'existence et de la sélection naturelle.

Le darwinisme social étant associé aux nations anglaise et allemande, le pays se réfugie dans le chauvinisme et se crispe sur un néo-lamarckisme qui, après le conflit de 1914-1918, handicaperait la biologie française.

Dans ce livre, qu'il est illusoire de vouloir résumer en quelques lignes, les idées sont essentielles et sensibles. J.-M. Bernardini démontre avec rigueur, avec clarté, preuves abondantes à l'appui, combien la France peut être à la fois brillante intellectuellement et bloquée par l'adhésion tardive à des théories dépassées, au moment où il faudrait passer aux suivantes. Ignorer le lamarckisme au début du 20<sup>e</sup> siècle est un défaut, le reconnaître un siècle plus tard en écartant le darwinisme devenait de l'aveuglement. C'est dire que la lecture de ce livre est fondamentale pour comprendre notre 20<sup>e</sup> siècle finissant, à la fois dans son évolution scientifique et idéologique.

Michèle FEBVRE



Mesure des terres agricoles dans l'Égypte ancienne.

## Technique

### La mesure

Jean Perlejon. Éditions Flammarion, 1998.

Ce petit livre se donne 128 pages de petit format, conformément à l'idée de la collection (Dominos), pour présenter la mesure. Redoutable sujet : en métrologie, comme en chimie analytique, l'objet central est la méthode plutôt que les fruits qu'elle porte. Or, la méthode, c'est l'intendance, et celle-ci suit toujours, dit-on. Les grands esprits devraient-ils alors se préoccuper de mesure ? Le physicien William Thomson Kelvin donna des lettres de noblesse à la mesure lors d'une conférence, en 1883 : «Je dis souvent que, lorsqu'on peut mesurer ce dont on parle et l'exprimer en chiffres, on en sait quelque chose ; en revanche, si on ne peut l'exprimer en chiffres, on en a un bien piètre connaissance.» Et Philolaos (V<sup>e</sup> siècle avant notre ère) : «Tout être sensible a un nombre ; sans celui-ci, on ne saura rien concevoir ni rien connaître.» Ou encore Galilée : «La science nouvelle met en lumière, à travers les relations de la causalité empirique, une proportionnalité constante, la loi, et cela dans la mesure où elle donne à ces rapports empiriques une expression quantitative et géométrique.

Le monde, ce monde divers, aux accents et aux apparences innombrables, se révèle alors comme un tout harmonieux où chaque partie répond à l'autre.»

Toutes ces citations proviennent de cet ouvrage qui sait si bien remettre en culture des idées techniques. Il y a de tout : de la philosophie de la mesure, nous l'avons vu, mais aussi de l'histoire, qui nous montre l'état de l'art avant le système métrique : «Prenez 16 hommes, des petits et des grands, au moment où ils sortent de l'église, et demandez-leur de poser un pied après l'autre ; et la longueur ainsi obtenue fournira une règle juste et commune pour mesurer les champs.»

Mieux encore, l'auteur va jusqu'à relire Sigmund Freud, qui se préoccupe de méthode dans sa *Métapsychologie* : «Nous avons souvent entendu formuler l'exigence suivante : une science doit être construite sur des concepts fondamentaux clairs et nettement définis. En réalité, aucune science, même la plus exacte, ne commence par de telles définitions. Le véritable commencement de toute activité scientifique consiste plutôt dans la description de phénomènes qui sont ensuite rassemblés, ordonnés et insérés dans des relations. Dans la description, déjà, on ne peut éviter d'appliquer au matériel certaines idées abstraites que l'on puise ici ou là, et certainement pas dans la seule expérience actuelle. Ce n'est qu'après un examen plus approfondi du domaine de phénomènes consi-

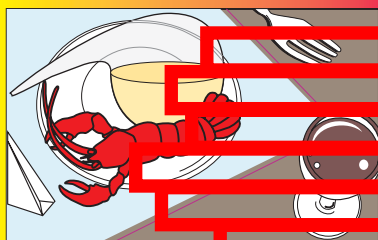
dérés que l'on peut alors saisir plus précisément les concepts scientifiques fondamentaux qu'il requiert et les modifier progressivement pour les rendre largement utilisables, ainsi que libres de toute contradiction. C'est alors qu'il peut être temps de les enfermer dans des définitions.» René Thom le rejoint : «Si l'on n'a pas le concept d'un objet, on ne le reconnaîtra pas.»

Et, pour finir notre présentation de ce livre par les hommes qu'il invoque, mentionnons Binet, père du «quotient intellectuel», qui prétendait avec une suffisance excessive : «L'intelligence, c'est ce que mesure mon test.» À quoi Albert Jacquard répond fort justement : «Il serait important de savoir ce que mesure ce fameux QI. La réponse est qu'il ne mesure rigoureusement rien. Or on gâche des enfants en raison de leur QI. On peut leurrer toute une population en donnant des nombres, parce que le nombre apparaît comme une vérité scientifique. Chacun se laisse persuader de savoir quelque chose. On camoufle la misère conceptuelle par un nombre. Le jour où les mesures ne compteront plus des décimales, il sera encore plus crédible. Il ne mesure rien qui préexiste à sa mesure. On mesure, avec un certain nombre de techniques, une chose dont on ignore si elle existe réellement.»

La mesure, ses méthodes, ses limites, son intelligence : voilà tout ce que vous trouverez dans ce petit livre épatant.

Michel RICHTER

FRANCE INFO

et  
POUR LA SCIENCEvous invitent  
à écouter la chronique  
de Marie-Odile MonchicourtInfo  
SciencesTous les jours  
sur **France Info**  
à 15 heures 41,  
17 heures 10,  
20 heures 12,  
22 heures 12,  
et 23 heures 42Les prochains  
résultats présentés  
dans la rubrique  
Science et Gastronomie  
seront annoncés sur  
**France Info**  
le 22 décembre 1998.

FRANCE

info

## Mathématiques

## Analyse mathématique

Roger Godement (tome 1 : 432  
pages ; tome 2 : 474 pages).  
Éditions Springer, 1998.

**S**ur le tard, de nombreux mathématiciens de grande envergure semblent éprouver le besoin d'écrire des monographies à l'usage des débutants. Au moment même où l'algébriste Pierre Gabriel, successeur du prestigieux van der Waerden, à Zurich, nous donne un ouvrage qui se veut explicitement d'enseignement, destiné à donner le goût des mathématiques aux adolescents et à les guider pas à pas, des humbles constructions géométriques à la règle et au compas jusqu'aux mathématiques les plus abstraites, Roger Godement propose un travail comparable, mais limité à l'analyse.

Dans les deux cas, les auteurs prennent leur temps et agrémentent constamment leur texte de digressions historiques emplies d'anecdotes sur la vie des mathématiciens anciens ou contemporains. Dans les deux cas, aussi, le lecteur averti comprend que l'auteur livre avec sincérité les cheminement intérieurs par lesquels il a lui-même compris tel ou tel pan de l'édifice mathématique, et dont la confluence a finalement déterminé sa ferme vocation pour cette «reine des sciences». Chacun des deux auteurs nous fait ainsi entendre sa «petite musique». Celle de P. Gabriel vient de loin, prend ses sources jusque dans l'Antiquité et remonte en vastes fresques tourbillonnantes jusqu'aux mathématiciens d'aujourd'hui ; à travers les petites et les grandes de la vie des mathématiciens, il nous plonge dans le maelström de l'histoire européenne, avec ses drames, ses oppressions, ses guerres, ses déchirements. Il nous montre comment la pensée mathématique est née et s'est frayé un chemin dans ces brassages inouïs, comment la flamme a traversé ces tempêtes sans jamais s'éteindre. Quand on referme le livre de P. Gabriel, l'impression générale qui reste est celle d'un amour sonore, mais profond et total, pour ce qu'ont réalisé les peuples répartis de part et d'autre du Rhin.

La petite musique de R. Godement est autre ; elle est plus spécifiquement française. Lui aussi décortique les notions bien connues aujourd'hui, mais qui, à leur découverte, étaient loin de paraître simples. Plus que P. Gabriel, il se risque volontiers à l'exégèse de textes originaux

et s'efforce d'en tirer des leçons pour «ici et maintenant». Par exemple, dans le tome 1 il analyse longuement certaines démonstrations fausses du grand Cauchy, en montrant l'endroit exact du texte où réside la faille, et en reliant cette faille aux difficultés rencontrées de nos jours par les étudiants pour assimiler la convergence uniforme. On a presque l'impression que R. Godement parle à un jeune étudiant qu'il veut protéger et guider, en prenant tout son temps. Ce qu'il écrit, c'est le cours qu'il aurait aimé faire, sans contraintes temporelles ni matérielles, à un auditoire d'une vingtaine de jeunes gens passionnés par les mathématiques.

Au lieu de cela, comme il le dit, «dans le système très économique en vigueur en France», il n'a «pu parler que dans des amphithéâtres devant 20 à 400 étudiants». Ce livre est ainsi une sorte de réponse à cette immense frustration. Il serait trop long d'entrer dans les détails, mais le débutant trouvera à la fin du tome 1, par exemple, une patiente marche vers la notion d'indice dans le plan (le nombre de tours accomplis en tournant autour d'un point) et, en seconde partie du tome 2, une approche élémentaire de la théorie des fonctions holomorphes à partir des théorèmes les plus simples de la théorie des séries de Fourier, qui permet une initiation assez poussée en différant aussi loin que possible le recours à l'homotopie. C'est là une idée de l'auteur qui lui a toujours tenu à cœur : je me souviens qu'il la défendait déjà devant ses étudiants de Jussieu en 1966.

Ce qui est spécifiquement français, dans le livre de R. Godement, c'est une certaine tonalité générale de complainte triste. Au-delà des phrases volontairement provocatrices («ce pensionnat militaire de l'axe» désigne l'École polytechnique par exemple), que seuls les esprits superficiels ressentiront comme brutales, R. Godement s'y dévoile comme un homme d'une grande tendresse. Dans sa préface il jette à son épouse disparue quelques mots sobres et émouvants, telles de dernières fleurs. Les récurrentes évocations des ravages de la guerre dans son Habsbourg natal, où il découvrit les mathématiques en lisant Baire, feront mal à tout homme de cœur. Ne nous y trompons pas : R. Godement, avec ses phrases à l'empoeuse, à la fois parfois cocasses, c'est le paysan bourru et un peu gauche qui qu'il se définit lui-même quand il rencontre sa future épouse, et c'est tout cela, c'est pour cacher (mais) sa tendresse. Comme R. Godement est un homme libre (ne conseille-t-il pas à son protégé «de ne pas se laisser dominer par les idées dominantes»?), loin de suggérer à quiconque un embrigadement quelconque, il martèle ses phrases bourruées pour dénon-



D.R.

L'École polytechnique, où la science rejoint l'armée, est dénoncée par R. Godement.

cer inlassablement les risques de collusion de la science et de la guerre. Ainsi met-il constamment les jeunes mathématiciens en garde contre toute récupération par les institutions militaires ; une postface de 90 pages est consacrée à l'analyse de nombreux exemples de telles collusions, et de leur implications, constatées ou déduites, dans les monstrueux désastres de notre siècle.

Revenons au fond de cette complainte. Même si, à coup sûr, R. Godement s'en défendrait, c'est la complainte du repli français, lequel se poursuit inexorablement depuis au moins 1830. Certes, l'auteur raille et fustige vertement le «nationalisme à couper au couteau» de Charles de Gaulle, qui entendait n'utiliser l'Europe «comme un levier d'Archimède» qui «pour rendre à la France la place qu'elle a perdue depuis Waterloo : la première». Toutefois, la critique est terriblement affaiblie par l'interminable justification qui la suit : l'auteur n'a de cesse de prouver que non, la France n'a pas retrouvé cette première place, même quand on le croit (il donne, entre autres, pour les dénigrer, les exemples de la fusée *Diamant* et de la bombe H française). Ce qui tend à prouver que l'auteur n'aurait plus rien à critiquer si la France avait vraiment retrouvé la première place. En d'autres termes, dit-il, qu'il le veuille ou non, R. Godement souffre tout autant que De Gaulle du repli français, et c'est, au fond, pour cette raison qu'il dénonce partout, avec une ironie aussi mordante que drôle, l'absence au front du tableau de nos soi-disant élites, qui nous montre cruellement, dans leurs œuvres et dans leurs pompes, toujours plus arrogantes jusque dans leurs échecs répétés.

Parlons-en un peu, et commençons par l'École polytechnique. L'auteur ne rappelle pas sa devise : «Pour la patrie, la

science et la gloire.» P. Gabriel la cite, et là où R. Godement nous donne sa définition corrompue vue précédemment, P. Gabriel va plus loin et explicite la vraie critique qui blesse et qui fut reprise à sa manière par Laurent Schwartz : «En vérité ce qui se murmurait, c'est que des trois termes de la devise, il a été tôt renoncé au deuxième, et en quarante ans, de 1830 à 1870, le flambeau de la science était passé de Polytechnique à Göttingen.» L'un des poisons que ce repli a instillés chez les intellectuels français, c'est un malthusianisme sur fond de désespoir. De Gaulle, qui voulait en finir avec un «rasoir à raser», jusqu'au suicide d'un de nos meilleurs mathématiciens (Michel Lazard, qui m'avait fait part de sa désespérance), ce malthusianisme se traduit par le culte de la performance avec valorisation de quelques génies et, d'un autre côté, par un brutal message de désespoir à la communauté mathématique «de base», qui, pourtant, ne demande qu'à vivre : pas de postes, pas de vraie carrière, pas de salaire décent avant 45 ans, une place pour plus de 100 candidats accordée chichement... Certes, il y a beaucoup d'étudiants dans nos universités, et parler de malthusianisme semble un paradoxe, mais il a cours dans l'université française.

Les médaillés Fields savent bien que, seuls sur une île pendant 27 ans, tels des Robinsons Crusosé, ils n'auraient probablement rien produit. Il ne s'agit pas de gagner la coupe mondiale de football au temps en temps pour résoudre les problèmes de santé publique, avoir une jeunesse saine disposant de salles de gymnastique et de piscines olympiques dans chaque lycée. Tout le problème est là : je ne connais que deux mathématiciens qui ont posé la question en termes voisins, qui ont secoué un peu

le joug malthusien. Ce sont L. Schwartz et Alexandre Grothendieck. En 1968, ce dernier avait rédigé une sorte de samizdat qui a circulé de-ci, de-là pendant deux ans. Il s'était livré à une passionnante réflexion sur l'enseignement à l'université. Il exposait que, puisqu'il n'y aurait jamais plus de 10 ou 20 génies par an, il fallait employer les autres à enseigner, et les respectant comme il se doit, et en leur offrant des carrières aussi dignes que les autres, car ils étaient la garantie du vivre sans lequel on se condamne à se contenter d'un génie de temps en temps.

Quant à L. Schwartz, il avait été commandé un rapport sur l'état de l'enseignement en France. Ce rapport, paru en 1983, était sérieux, honnête, documenté, mais, comme il contenait le mot fatidique, «sélection», il fut enterré. L. Schwartz fut publiquement accusé par un représentant syndical d'être un «sélectionneur», un «élitiste attardé», voire un «fasciste».

Notre histoire contemporaine nous a légué ce système bancal, la dichotomie Université/Grandes Écoles. Les bons étudiants continuent de fréquenter les classes de préparation à ces écoles, ce qui est dramatique pour l'Université. Les professeurs de classes préparatoires sont rattachés aux lycées et, donc, déconnectés de l'Université. Cela leur fit du tort, mais les choses ont changé. Trop d'universitaires vivent sur des idées totalement dépassées et ignorent les immenses progrès réalisés dans l'enseignement des mathématiques dans ces classes. La crise allant, elles ont été revivifiées par de nombreux jeunes normaliens à qui l'Université n'a offert qu'un horizon bouché. Ils ont apporté un sang neuf et entretiennent le vivier précédemment mentionné. Leur revue (la *Revue de Maths* spéciale n'est peut-être pas les *Math. Annales*), mais on y trouve des articles d'une haute tenue. Les professeurs des classes préparatoires mathématiques à merveille l'outil informatique, ne sont pourtant étonnés, ignorés, voire méprisés, jaloués, mais ils continuent leur mission en s'organisant.

Sachant réformer ce système avec doigté «l'avare perd tout en voulant tout gagner», et il n'est rien de bon sans un minimum d'enthousiasme et d'ouverture sur autrui.

Jean-Marie ARNAUDIÈS

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse :

<http://www.pourlascience.com>



# Index 1998

## ARTICLES

### ARCHÉOLOGIE – ETHNOLOGIE PALÉONTOLOGIE

- ARAMÉENS (*Les*), par Luc Bachelot, n° 243, p. 88.  
 ATTAQUE D'UN DINOSAURE (*L'*), par David Thomas et James Farlow, n° 244, p. 72.  
 CLIMAT DE L'EUROPE ET ORIGINE DES NÉANDERTALIENS, par Jean-Jacques Hublin, n° 245, p. 52.  
 CULTURE ET INTELLIGENCE TECHNIQUE CHEZ LES HOMINOÏDES, par Frédéric Joulain, n° 254, p. 66.  
 ÉVOLUTION DES TORTUES (*L'*), par Guillermo Rougier, Marcelo de la Fuente et Andrea Arcucci, n° 249, p. 42.  
 INTÉGRATION DES BARBARES DANS LA SOCIÉTÉ GALLO-ROMAINE (*L'*), par Michael Kazanski et Christian Pichot, n° 248, p. 78.  
 INVENTIONS DES DERNIERS NÉANDERTALIENS (*Les*), par Francesco d'Errico, Dominique Baffier et Michèle Jolien, n° 254, p. 80.  
 NAVIRES VIKINGS (*Les*), par J. Hale, n° 246, p. 48.  
 ORIGINE DES OISEAUX ET DE LEUR VOL (*L'*), par Kevin Padian et Luis Chiappe, n° 246, p. 30.  
 SON ET MUSIQUE AU PALÉOLITHIQUE, par Michel Dauvois, Xavier Boutillon, Benoît Fabre et Marc-Pierre Verge, n° 253, p. 52.  
 STRATÉGIES ALIMENTAIRES DES NÉANDERTALIENS (*Les*), par Marylène Patou-Mathis, n° 254, p. 74.  
 YÉMEN DÉSERTIQUE : UNE ANCIENNE RÉGION HUMIDE (*Le*), par Anne-Marie Lézine, n° 250, p. 54.  
 ZIMBABWE, CÔTÉ AFRICAINE, par Webber Ndoro, n° 243, p. 74.

### ASTRONOMIE ASTROPHYSIQUE

- ANTIMATIÈRE COSMIQUE (*L'*), par Gregory Tarlé et Simon Swamy, n° 248, p. 86.  
 FOSSILES VERTUS DE MARS? (*Des*), par Everett Gibson, David McKay, Ratnie Thomas-Reppert et Christopher Romanek, n° 244, p. 84.  
 MISSION PATRINDER SUR MARS (*La*), par Matthew Golombek, n° 251, p. 64.  
 MISSION ULYSSE (*La*), par Edward Smith et Richard Marsden, n° 245, p. 74.  
 NUAGE DE OORT (*Le*), par Paul Weissman, n° 60.  
 REGARD NOUVEAU SUR LES QUASARS (*Un*), par Michael Disney, n° 250, p. 48.

### BIOLOGIE – GÉNÉTIQUE MÉDECINE – PHYSIOLOGIE

- AMÉLIORATION DES TRAITEMENTS CONTRE LE VIH (*L'*), par John Bartlett et Richard Moore, n° 251, p. 30.  
 APPLICATIONS DES RÉSEAUX CELLULAIRES (*Les*), par Warren Sutzman et Carl Dietrich, n° 248, p. 70.  
 ARCHITECTURE DE LA VIE (*L'*), par Donald Ingber, n° 245, p. 34.  
 BEAUTÉS DU MONDE MICROBIEN (*Les*), par Eshel Ben-Jacob et Herbert Levine, n° 253, p. 94.  
 CERVEAU D'ADVISÉ (*Le*), par Michael Gazzaniga, n° 251, p. 72.  
 CHIMÈRES DE CAILLE ET DE POULET POUR ÉTUDIER L'ÉMBRYOGENÈSE (*Les*), par Nicole M. Le Douarin, n° 252, p. 46.  
 CONTRACTIONS MASCULINE (*La*), par Sophie Christin-Maître et Philippe Bouchard, n° 249, p. 34.  
 CORPS HUMAIN EN APESANTEUR (*Le*), par Ronald White, n° 251, p. 44.  
 DÉFIBRILLATION : L'ÉTINCELLE DE VIE (*La*), par Mickey Roseberg, n° 250, p. 82.  
 ÉCHANGES DE GÈNES ENTRE BACTÉRIES, par Robert Miller, n° 245, p. 60.  
 ENFANT ET LE VIH (*Les*), par Catherine Wilfert et Ross McKenney, n° 251, p. 40.  
 HORMONES ET MÉNOPAUSE, par Craig Jordan, n° 253, p. 36.  
 INSTINCT ET INTELLIGENCE, par Alain Prochiantz, n° 254, p. 34.  
 LOCALISATION DE LA MÉMOIRE (*La*), par Joaquin Fuster, n° 254, p. 102.  
 MAL DES OCS (*Le*), par R. Deyo, n° 252, p. 38.  
 MÉCANISME DE LA MÉMOIRE (*Les*), par Serge Laroche, n° 254, p. 94.  
 MUSCLES, ORGANES DE LA PERCEPTION (*Les*), par Jean-Pierre Roll, n° 248, p. 92.  
 NEUROLOGIE DE LA DÉPRESSION (*La*), par Charles Dierkeroff, n° 250, p. 32.  
 PILULES DE L'INTELLIGENCE (*Les*), par Marguerite Holloway, n° 254, p. 108.  
 PLASTICITÉ CÉRÉBRALE ET APPRENTISSAGE, par Jean-Pierre Changeux, n° 254, p. 86.  
 PEINTRES ET LES ANOMALIES DE LA VISION (*Les*), par Philippe Lanthony, n° 247, p. 52.  
 POURQUOI LA ROUGEOLE TUE ENCORE EN AFRIQUE, par G. Pison et P. Aaby, n° 246, p. 40.  
 PRÉVENTION D'INFECTION APRÈS UNE EXPOSITION AU VIH, par Susan Buchbinder, n° 251, p. 52.  
 PRÉVENTION DE L'INFECTION PAR LE VIRUS DU SIDA (*La*), par T. Coates et Ch. Collins, n° 251, p. 42.  
 QU'EST-CE QUE L'INTELLIGENCE?, par Jean-Pol Tassin, n° 254, p. 30.  
 SANG ARTIFICIEL (*Le*), par Mary Nucci et Abraham Abuchowski, n° 246, p. 74.  
 SIDA DANS LE MONDE (*Le*), par Jonathan Mann et Daniel Tardif, n° 251, p. 20.  
 SIDA ET ÉTHIQUE, par Tim Beardsley, n° 251, p. 54.  
 SOMMEILS ET INSOMNIES, par Jean-Louis Valatx, n° 243, p. 80.  
 SYNDROME DE WILLIAMS (*Le*), par Howard Lenhoff, Paul Wang, Frank Greenberg et Ursula Belugi, n° 244, p. 78.  
 VACCINS CONTRE LE SIDA : ESPOIRS ET DÉFIS (*Les*), par David Baltimore et Carole Heilman, n° 251, p. 44.

### GÉOLOGIE – GÉOPHYSIQUE OCÉANOGRAPHIE

- CLIMAT DANS LES LAGUNES (*Un*), par Richard Albritton et Michael Bender, n° 246, p. 80.  
 GONDWANA (*Le*), par Roland Nimpf, n° 252, p. 64.  
 IMPACT CLIMATIQUE DES POUSSIÈRES D'AFRIQUE (*L'*), par M. Moumin et G. Lambert, n° 247, p. 76.  
 POUSSIÈRES SAHARIENNES (*Les*), par Giovanni Guerzoni et Emanuela Molinaroli, n° 247, p. 72.

### HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

- LÉON FOUCAULT, par W. Tobin, n° 251, 80.  
 LISE MEITNER ET LA FISSION NUCLÉAIRE, par Ruth Leifman, n° 245, p. 80.

### MATHÉMATIQUES INFORMATIQUE

- CALCUL QUANTIQUE AVEC DES MOLÉCULES, par N. Gershenfeld et I. Chuang, n° 250, p. 60.  
 CALCULER AVEC L'ADN, par Leonard Adleman, n° 252, p. 56.  
 COMMENT COMBATTRE LES VIRUS INFORMATIQUES, par Jeffrey Kephart, Gregory Sorkin, David Chess et Steve White, n° 243, p. 60.  
 FACTORISATION DES GRANDS NOMBRES (*La*), par Johannes Buchmann, n° 251, p. 88.  
 GÉOMÉTRIE ET RELIGION AU JAPON, par Tony Rothman et Hidetoshi Fukagawa, n° 249, p. 52.  
 JEUX MATHÉMATIQUES (*Les*), par Martin Gardner, n° 252, p. 86.  
 LOIS NOUVELLES DE L'INFORMATION QUANTIQUE (*Les*), par Jean-Paul Delahaye, n° 250, p. 66.  
 MATHÉMATIQUES DE L'AMORTISSEMENT (*Les*), par Alain Oustaloup, n° 253, p. 80.  
 SIMULATION DU MOUVEMENT HUMAIN (*La*), par Jessica Hodgins, n° 247, p. 66.

### PHYSIQUE – CHIMIE

- ACOUSTIQUE PICOSECONDE (*L'*), par Humphrey Maris, n° 247, p. 88.  
 AGRÉGATS MÉTALLIQUES ET NOMBRES MAGIQUES, par Matthias Brack, n° 244, p. 92.  
 BRUIT EN 1/f (*Le*), par E. Milotti, n° 246, p. 88.  
 CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS (*La*), par Eric Cioba, n° 253, p. 74.  
 CONDENSATION DE BOSE-EINSTEIN (*La*), par Eric Cornell et Carl Wieman, n° 247, p. 92.  
 CRÉATION DE NOUVEAUX ÉLÉMENTS (*La*), par Peter Armbruster et Fritz Peter Hessberger, n° 253, p. 68.  
 GRADIMÉTRIE GRAVITATIONNELLE (*La*), par Robert R. Taylor, n° 250, p. 82.  
 LASERS À UN SEUL ATOME (*Les*), par Michael Field et K. G. Wilson, n° 247, p. 84.  
 MÉLANGE ET DÉSORDRE FIGE, par Eugène Guyon et Jean-Pierre Hulin, n° 249, p. 70.  
 NANOLASERS (*Les*), par P. Gourley, n° 247, p. 58.  
 NOUVELLES THÉORIES DES CORDES (*Les*), par Michael Duff, n° 246, p. 66.  
 PINCES ET CISEAUX OPTIQUES, par Michael Berns, n° 248, p. 108.

## SCIENCE HUMAINES

FACTEUR GLOBAL D'INTELLIGENCE (*Le*), par Linda Gottfredson, n° 254, p. 144.  
FORMES D'INTELLIGENCE (*Les*), par Howard Gardner, n° 254, p. 136.  
GÉNÉTIQUE ET INTELLIGENCE, par Robert Plomin et John DeFries, n° 254, p. 120.  
INTELLIGENCE DE L'ENFANT (*L'*), par Bernard This, n° 254, p. 144.  
PÉRIL NUCLÉAIRE, par Bruce Blair, Harold Feiveson et Frank von Hippel, n° 254, p. 128.  
SCIENTIFIQUES DANS L'OMBRE (*Des*), par Jeffrey Richels, n° 254, p. 128.  
SURDOUÉS (*Les*), par Ellen Winner, n° 254, p. 128.  
TESTS D'INTELLIGENCE SONT-ILS INTELLIGENTS? (*Les*), par Robert Sternberg, n° 254, p. 152.  
TRAFFIC DE CÉLIMANS, par Peter Brazaitis, Myrna Watanabe et George Amato, n° 247, p. 84.

## TECHNIQUE

AQUACULTURE DES CREVETTES ET ENVIRONNEMENT, par Claude Boyd et Jason Clay, n° 250, p. 74.  
BÉTON, MATÉRIAU MODERNE (*Le*), par Bernard Clavaud, François Saucier et Laurent Barcelo, n° 244, p. 32.  
CARBURANT LIQUIDES À PARTIR DU GAZ NATUREL (*Des*), par Safaa Fouda, n° 247, p. 46.  
ÉCRANS PLAS (*Les*), par A. Sobel, n° 249, p. 78.  
ENFOUISSEMENT SOUS-MARIN DES DÉCHETS RADIOACTIFS (*L'*), par Charles Hollister et Steven Nadis, n° 245, p. 46.  
EXTRACTION DU PÉTROLE À CIEL OUVERT (*L'*), par Richard George, n° 247, p. 38.  
FIN DU PÉTROLE BON MARCHÉ (*La*), par Colin Campbell et Jean Laherrère, n° 247, p. 30.  
FUSION NUCLÉAIRE ET STRICTIOX AXIALE, par Gerold Yonah, n° 252, p. 78.  
GRATTE-CIEUX SONT-ILS ENCORE NÉCESSAIRES? (*Les*), par William Mitchell, n° 244, p. 68.  
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (*L'*), par Kenneth Ford et Patrick Hayes, n° 254, p. 158.  
INTELLIGENCE DES JEUX (*L'*), par Matthew Ginsberg, n° 254, p. 172.  
INTELLIGENCE DES RÉSEAUX DE NEURONES (*L'*), par Jean-Pierre Nadal, n° 254, p. 164.  
INTELLIGENCE DES ROBOTS (*L'*), par Arab Ali Chérif, n° 254, p. 178.  
IRRIGATION À L'EAU DE MER (*L'*), par Edward Glenn, Jed Brown et James O'Leary, n° 252, p. 96.  
NITRATE : UN POLLUANT DE LONGUE DURÉE, par André Mariotti, n° 249, p. 60.  
NORME EUROPÉENNE DE TÉLÉVISION NUMÉRIQUE (*La*), par Jean-Pierre Henot, Vincent Michon et Bertrand Sueur, n° 249, p. 86.  
NOUVEL ACCÈS À LA CHINE (*Un*), par John Kosowatz, n° 244, p. 30.  
OCCUPATION DU SPECTRE RADIO (*L'*), par David Hughes et Dwayne Hendricks, n° 248, p. 72.  
PHOTOPILES SANS SOLEIL (*Des*), par Timothy Coutts et Mark Fitzgerald, n° 253, p. 88.  
PLUS HAUTES TOURS DU MONDE (*Les*), par C. Pelli, Ch. Thornton et L. Joseph, n° 244, p. 48.

PLUS LONG JOUR SONT SUSPENDU (*Le*), par Satoshi Kashima et Makoto Kitagawa, n° 244, p. 40.  
POLLUTION PATIALE (*La*), par Nicholas Johnson, n° 252, p. 72.  
PRÉVENTION DES INONDATIONS, par Yvette Veyret et Gérard Garry, n° 243, p. 46.  
PRODUCTION DU PÉTROLE AU XXI<sup>e</sup> SIÈCLE (*La*), par Roger Anderson, n° 247, p. 40.  
RÉSEAUX DE SATELLITES (*Les*), par John Evans, n° 248, p. 48.  
RÉSEAUX RADIO TERRESTRES (*Les*), par Alex Hills, n° 248, p. 64.  
TÉLÉCOMMUNICATIONS DU XXI<sup>e</sup> SIÈCLE (*Les*), par Joseph Peltier, n° 248, p. 58.  
TÉLÉVISION NUMÉRIQUE (*La*), par Jae Lim, n° 249, p. 92.  
TRAITEMENT DES GEMMES (*Le*), par Emmanuel Frisch, Jim Shigley et Bernard Lasnier, n° 245, p. 66.

## ZOOLOGIE – BOTANIQUE

ARMES SECRÈTES DES GUÊPES PARASITOÏDES (*Les*), par Nancy Beckage, n° 243, p. 54.  
CHANTS SIGALES (*Le*), par Henry Bennet-Clark, n° 243, p. 66.  
COMMENT LES FEMELLES CHOISISSENT LEUR PARTENAIRE, par Lee Alan Dugatkin et Jean-Guy Godin, n° 243, p. 100.  
CONSCIENCE DE SOI ET CONSCIENCE DES AUTRES, par Gordon Gallup, n° 254, p. 45.  
CONSCIENCE EST LE PROPRE DE L'HOMME (*La*), par Daniel Povinelli, n° 254, p. 40.  
CONVERSATION AVEC UN PERROQUET, par Irene Pepperberg, n° 254, p. 60.  
INTELLIGENCE SOCIALE DES SINGES (*L'*), par Bernard Thierry, n° 254, p. 50.  
MIMÉTISME CHEZ LES PAPILLONS, par Jean-Louis Fischer et Jean-Georges Henrotte, n° 251, p. 56.  
RAISONNEMENT DES ANIMAUX (*Le*), par James Gould et Carol Grant Gould, n° 254, p. 50.  
RIZ GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉ (*Le*), par Pamela Ronald, n° 243, p. 68.

## L'EXPÉRIENCE DU MOIS

BATEAUX À SAVON, par Martin Shanahan, n° 244, p. 106.  
MARCHER SUR L'EAU, par Peter, La création de nouveaux éléments, n° 254, p. 105.  
LA PRATIQUE DU BILLARD, par Régis Petit, n° 246, p. 94.  
ROTATIONS CULINAIRES, par Shawn Carlson, n° 247, p. 104.  
LE STRIKE FACILE AU BOWLING?, par Patrick David, n° 254, p. 106.

## LOGIQUE ET CALCUL

LE MONDE DES MACHINES, n° 243, p. 100.  
LES PREUVES SANS MOTS, n° 244, p. 100.  
ALÉAS DU HASARD INFORMATIQUE, n° 245, p. 92.  
LES FRACTIONS ET LEURS MYSTÈRES, n° 246, p. 100.  
LA CONJECTURE DE SYRACUSE, n° 247, p. 100.

LES CONJECTURES DES COMMUNES, n° 248, p. 116.  
CERTITUDES SANS DÉMONSTRATION?, n° 249, p. 100.  
LES MATHÉMATIQUES ET LES AUTRES ILLUSIONS, n° 251, p. 100.  
LE RANGEMENT DE LA BOÎTE DE CUBES, n° 252, p. 108.  
ÉCRITURES SOUS CONTRAINTES, n° 253, p. 102.  
CHAMPENOWN, ET QUELQUES AUTRES, n° 254, p. 196.

## VISIONS MATHÉMATIQUES

DISSECTION ET MÉTAMORPHOSES, n° 243, p. 96.  
US ET CHARMES DES DES, n° 245, p. 100.  
BOITEILLES ET RUBANS, n° 247, p. 106.  
ABROGEONS LA LOI DES MOYENNES, n° 248, p. 122.  
QUELLE COÏNCIDENCE, n° 249, p. 106.  
LA CONJECTURE DU SCHEFFET, n° 250, p. 98.  
DES SCULPTURES EN CIMENT, n° 252, p. 102.  
UNE MAN-D'ŒUVRE PHARAONIQUE?, n° 253, p. 108.

## AUTEURS

### A – B

AABY Peter, Pourquoi la rougeole tue encore en Afrique, n° 256, p. 40.  
ABUCHOWSKI Abraham, Le sang artificiel, n° 246, p. 74.  
ADLEMAN L., Calculer avec l'ADN, n° 252, p. 56.  
ALI CHÉRIF Arab, L'intelligence des robots, n° 254, p. 178.  
ALLEY R., Le climat dans les glaces, n° 246, p. 80.  
AMATO George, Trafic de célimans, n° 247, p. 84.  
AN Kuyngwon, Les lasers à un seul atome, n° 250, p. 42.  
ANDERSON Roger, La production du pétrole au XXI<sup>e</sup> siècle, n° 247, p. 40.  
ARCUCCI A., L'évolution des tortues, n° 249, p. 42.  
BACHET T., Calculer avec l'ADN, n° 252, p. 56.  
BAFFIER Dominique, Les inventions des derniers Néandertaliens, n° 254, p. 80.  
BALTIMORE David, Les vaccins contre le SIDA : espoirs et défis, n° 251, p. 44.  
BARCEL Laurent, Le béton, matériau moderne, n° 244, p. 32.  
BARTLETT John, L'amélioration des traitements contre le VIH, n° 251, p. 30.  
BEARDSLEY Tim, SIDA et éthique, n° 251, p. 54.  
BECKAGE Nancy, Les armes secrètes des guêpes parasitoïdes, n° 243, p. 54.  
BELL Robin, La gradiométrie gravitationnelle, n° 250, p. 92.  
BELLUGI Ursula, Le syndrome de Williams, n° 244, p. 78.

BEN-JACOB Michel, *Les beautés du monde microbien*, n° 253, p. 94.

BENDER Michael, *Le climat dans les glaces*, n° 246, p. 80.

BENNET-CLARK Henry, *Le chant des cigales*, n° 249, p. 66.

BERNS Michel, *Pinces et ciseaux optiques*, n° 248, p. 108.

BLAIR Bruce, *Péril nucléaire*, n° 243, p. 38.

BOUCHARD Philippe, *La contraception masculine*, n° 249, p. 34.

BOUTILLON Xavier, *Son et musique au Paléolithique*, n° 250, p. 52.

BOYD Claude, *Aquaculture des crevettes et environnement*, n° 250, p. 74.

BRACK Matthias, *Agrégats métalliques et nombres magiques*, n° 244, p. 92.

BRAZAITIS Peter, *Topologie*, n° 247, p. 94.

BROWN J., *L'irrigation à l'eau de mer*, n° 252, p. 96.

BUCHBINDE Susan, *Prévenir l'infection après une exposition au VIH*, n° 251, p. 52.

BUCHMANN Johannes, *La factorisation des grands nombres*, n° 251, p. 88.

## C - D

CAMPBELL Colin, *La fin du pétrole bon marché*, n° 247, p. 30.

CHANGEUX Jean-Pierre, *Plasticité cérébrale et apprentissage*, n° 254, p. 86.

CHESS David, *Comment combattre les virus informatiques*, n° 243, p. 60.

CHIAPPE Luigi, *L'origine des oiseaux et de leur vol*, n° 246, p. 30.

CHRISTIN-MÂÎTRE Sophie, *La contraception masculine*, n° 249, p. 34.

CHUANG Isaac, *Calcul quantique avec des molécules*, n° 250, p. 60.

CLAVAUD Bernard, *Le béton, matériau moderne*, n° 244, p. 32.

CLAY Jason, *Aquaculture des crevettes et environnement*, n° 250, p. 74.

COATES Thomas, *La prévention de l'infection par le virus du SIDA*, n° 251, p. 42.

COLLINS Chris, *La prévention de l'infection par le virus du SIDA*, n° 251, p. 42.

CORNELL Eric, *La condensation de Bose-Einstein*, n° 247, p. 92.

COUTTS Timothy, *Des photopiles sans soleil*, n° 253, p. 88.

DAUVOIS Michel, *Son et musique au Paléolithique*, n° 250, p. 52.

DEFRIES J., *Génétique et intelligence*, n° 254, p. 120.

DELAHAYE Jean-Paul, *Les lois nouvelles de l'information quantique*, n° 250, p. 66.

DEYO Richard, *Le mal de dos*, n° 252, p. 38.

DIETRICH Carl, *Les applications des réseaux cellulaires*, n° 248, p. 70.

DISNEY Michael, *Un regard nouveau sur les quasars*, n° 250, p. 48.

DUFF Michael, *Les nouvelles théories des cordes*, n° 246, p. 66.

DUGATKIN Lee Alan, *Comment les femmes choisissent leur partenaire*, n° 248, p. 100.

## E - F

EISENBERG Mickey, *La défibrillation : l'étincelle de vie*, n° 250, p. 82.

ERRICO Francesco d', *Les inventions des derniers Néandertaliens*, n° 254, p. 80.

EVANS John, *Les réseaux de satellites*, n° 248, p. 48.

FABRE Bernard, *Son et musique au Paléolithique*, n° 250, p. 52.

FARLOW J., *L'attaque d'un dinosaure*, n° 244, p. 72.

FEIVESON Harold, *Péril nucléaire*, n° 243, p. 38.

FIELD M., *Les lasers à un seul atome*, n° 250, p. 42.

FISCHER Jean-Louis, *Mimétisme chez les papillons*, n° 251, p. 56.

FORD K., *L'intelligence artificielle*, n° 254, p. 158.

FOUDA Safaa, *Des carburants liquides à partir du gaz naturel*, n° 247, p. 46.

FRITSCH Emmanuel, *Le traitement des cancers*, n° 245, p. 66.

FUENTE Marcelo de la, *L'évolution des tortues*, n° 249, p. 42.

FUKAGAWA Hidetoshi, *Géométrie et religion au Japon*, n° 249, p. 52.

FUSTER Joaquín, *La localisation de la mémoire*, n° 254, p. 100.

## G - H

GALLUP Gordon, *Conscience de soi et conscience des autres*, n° 254, p. 45.

GARDNER Howard, *Les formes d'intelligence*, n° 254, p. 130.

GARDNER Martin, *Les jeux mathématiques*, n° 252, p. 86.

GARRY C., *Prévenir les inondations*, n° 243, p. 46.

GAZZANIGA M., *Le cerveau divisé*, n° 251, p. 72.

GEORGE Richard, *L'extraction du pétrole à ciel ouvert*, n° 244, p. 38.

GERSHBERG Neil, *Calcul quantique avec des molécules*, n° 250, p. 60.

GIBSON Everett, *Des fossiles venus de Mars?*, n° 244, p. 84.

GINSBERG Matthew, *L'intelligence des jeux*, n° 254, p. 172.

GLENNE J., *L'irrigation à l'eau de mer*, n° 252, p. 96.

GODIN Jean-Guy, *Comment les femmes choisissent leur partenaire*, n° 248, p. 100.

GOLOMBEK Matthew, *La mission Pathfinder sur Mars*, n° 251, p. 64.

GOTTFREDSON Linda, *Le facteur global d'intelligence*, n° 254, p. 144.

GOULD James, *Le raisonnement des animaux*, n° 254, p. 50.

GOURLÉ Paul, *Les nanolasers*, n° 247, p. 58.

GRANTON O., *Les mécanismes de la mémoire*, n° 254, p. 94.

GREENBERG Frank, *Le syndrome de Williams*, n° 244, p. 78.

GUERZONI Stefano, *Les poussières sahariennes*, n° 247, p. 72.

GUYON Étienne, *Mélange et désordre figé*, n° 249, p. 70.

HALE John, *Les navires vikings*, n° 246, p. 48.

HAYES P., *L'intelligence artificielle*, n° 254, p. 158.

HEILMAN Carole, *Les vaccins contre le SIDA : espoirs et défis*, n° 253, p. 44.

HENDRIKS Dewayne, *L'occupation du spectre radio*, n° 248, p. 72.

HÉNOT Jean-Pierre, *La norme européenne de télévision numérique*, n° 249, p. 86.

HENROTTE Jean-Georges, *Mimétisme chez les papillons*, n° 251, p. 56.

HESSBERGER Fritz Peter, *La création de nouveaux éléments*, n° 253, p. 68.

HILLS A., *Les réseaux radio terrestres*, n° 248, p. 48.

HODGINS Jessica, *La simulation du mouvement humain*, n° 247, p. 66.

HOLLISTER Charles, *L'enfouissement sous marin des déchets radioactifs*, n° 245, p. 46.

HOLLOWAY Marguerite, *Les routes de l'intelligence*, n° 254, p. 108.

HUBLIN Jean-Jacques, *Climat de l'Europe et origine des Néandertaliens*, n° 245, p. 52.

HUGHES David, *L'occupation du spectre radio*, n° 248, p. 72.

HULIN Jean-Pierre, *Mélange et désordre figé*, n° 249, p. 70.

## I - J - K

INGBERG J., *L'architecture de la vie*, n° 245, p. 34.

JOHNSON N., *La pollution spatiale*, n° 252, p. 72.

JORDAN Craig, *Hormones et ménopause*, n° 253, p. 36.

JOSEPH Leonard, *Les plus hautes tours du monde*, n° 244, p. 48.

JOULIAN Frédéric, *Culture et intelligence technique chez les Hominoïdes*, n° 254, p. 66.

JULIEN Michel, *Les inventions des derniers Néandertaliens*, n° 254, p. 80.

KASHIMURA Satoshi, *Le plus long pont suspendu*, n° 244, p. 40.

KAZANSKI Michel, *L'intégration des Barbares dans la société gallo-romaine*, n° 248, p. 76.

KEPHART Jeffrey, *Comment combattre les virus informatiques*, n° 243, p. 60.

KITAGAWA Takoto, *Le plus long pont suspendu*, n° 244, p. 40.

KOSOWITZ John, *Un nouvel accès à la Chine*, n° 244, p. 58.

## L - M

LAHERRE Jean, *La fin du pétrole bon marché*, n° 247, p. 30.

LAMBERT Claude, *L'impact climatique des poussières d'Afrique*, n° 247, p. 78.

LANTHONY Philippe, *Les peintres et les anomalies de la vision*, n° 247, p. 52.

LEBOECHE Serge, *Les mécanismes de la mémoire*, n° 254, p. 94.

LASNIER Bernard, *Le traitement des gemmes*, n° 245, p. 60.

LE DOUARIN Nicole M., *Les chimères de caille et de poulet pour étudier l'embryogenèse*, n° 252, p. 46.

LENHOFF Howart, *Le syndrome de Williams*, n° 244, p. 78.

LEVINE Herbert, *Les beautés du monde microbien*, n° 253, p. 94.

LEWIN SIMON Ruth, *Lise Meitner et la fission nucléaire*, n° 245, p. 80.  
 LÉZINE Annie-Marie, *Le Yémen désertique : une ancienne région humide*, n° 250, p. 54.  
 LIM Jae, *La télévision numérique*, n° 249, p. 92.  
 MANN J., *Le SIDA dans le monde*, n° 251, p. 28.  
 MARIOTTI André, *Nitrate : un polluant de longue durée*, n° 249, p. 60.  
 MARIS Humphrey, *L'acoustique picoseconde*, n° 245, p. 88.  
 MARK Fitzgerald, *Des photopiles sans soleil*, n° 253, p. 88.  
 MARSDEN R., *La mission Ulysse*, n° 245, p. 74.  
 MCKAY D., *Des fossiles venus de Mars?*, n° 244, p. 84.  
 MCKINNEY B., *Les enfants et le VIH*, n° 251, p. 40.  
 MILLER Robert, *Échanges de gènes entre bactéries*, n° 245, p. 60.  
 MILOTTI Edoardo, *Le bruit en 1/f*, n° 246, p. 88.  
 MITCHELL William, *Les gratte-ciels sont-ils encore nécessaires?*, n° 244, p. 68.  
 MOLINAROLI Emanuela, *Les poussières sahariennes*, n° 247, p. 72.  
 MOORE Richard, *L'amélioration des traitements contre le VIH*, n° 251, p. 30.  
 MOULIN Cyril, *L'impact climatique des poussières d'Afrique*, n° 247, p. 78.

## N - O

NADAL Jean-Pierre, *L'intelligence des réseaux de neurones*, n° 254, p. 164.  
 NADIS Steven, *L'enfouissement sous-marin des déchets radioactifs*, n° 245, p. 46.  
 NDORO W., *Zimbabwe, cité africaine*, n° 251, p. 74.  
 NEMEROFF Charles, *Comment combattre les virus informatiques*, n° 250, p. 32.  
 NUCCI Mary, *Le sang artificiel*, n° 246, p. 74.  
 O'LEARY J., *Irrigation à l'eau de mer*, n° 252, p. 96.  
 OUSTALOUPE Alain, *Les mathématiques de l'amortissement*, n° 253, p. 80.

## P - R

PADIAN Kevin, *L'origine des oiseaux et de leur vol*, n° 246, p. 30.  
 PATOU-MATHIS Marylène, *Les stratégies alimentaires des Néandertaliens*, n° 254, p. 74.  
 PELLI Cesar, *Les plus hautes tours du monde*, n° 244, p. 48.  
 PELTON Joseph, *Les télécommunications du XXI<sup>e</sup> siècle*, n° 248, p. 58.  
 PEPPERBERG Irene, *Conversation avec un perroquet*, n° 254, p. 60.  
 PILET Christian, *L'intégration des Barbares dans la société gallo-romaine*, n° 249, p. 70.  
 PISON Gilles, *Pourquoi la rougeole tue encore en Afrique*, n° 246, p. 70.  
 PLOMIN R., *Génétique et intelligence*, n° 254, p. 120.  
 POVINELLI Daniel, *La conscience est le propre de l'homme*, n° 254, p. 40.  
 PROCHIANTZ Alain, *Instinct et intelligence*, n° 254, p. 34.  
 RICHELSON Jeffrey, *Des scientifiques dans l'ombre*, n° 246, p. 58.

ROLL Jean-Pierre, *Les muscles, organes de la perception*, n° 248, p. 92.  
 ROMANOV K Christopher, *Des fossiles venus de Mars?*, n° 244, p. 84.  
 RONALD Pamela, *Le riz génétiquement modifié*, n° 243, p. 68.  
 ROTHMAN Tony, *Géométrie et religion au Japon*, n° 249, p. 52.  
 ROUGIER G., *L'évolution des tortues*, n° 249, p. 42.

## S - T

SAUCIER François, *Le béton, matériau moderne*, n° 244, p. 32.  
 SCERRI Eric, *La classification périodique des éléments*, n° 250, p. 74.  
 SCHWARTZ, *Le traitement des gemmes*, n° 245, p. 66.  
 SMITH Edward, *La mission Ulysse*, n° 245, p. 74.  
 SOBEL Alan, *Les écrans plats*, n° 249, p. 78.  
 SORKIN Gregory, *Comment combattre les virus informatiques*, n° 243, p. 60.  
 STERNBERG Robert, *Les tests d'intelligence sont-ils intelligents?*, n° 254, p. 152.  
 STUTZMAN Warren, *Les applications des réseaux cellulaires*, n° 248, p. 70.  
 SWORDY S., *L'antimatière cosmique*, n° 248, p. 86.  
 TARANTOLA D., *Le SIDA dans le monde*, n° 251, p. 28.  
 TARLE C., *L'antimatière cosmique*, n° 248, p. 86.  
 TASSIN Jean-Pol, *Qu'est-ce que l'intelligence?*, n° 254, p. 30.  
 THOMAS Bernard, *L'intelligence sociale des singes*, n° 254, p. 58.  
 This B., *L'intelligence de l'enfant*, n° 254, p. 114.  
 THOMAS David, *L'attaque d'un volcan*, n° 244, p. 32.  
 THOMAS Kevin, *Des fossiles venus de Mars?*, n° 244, p. 84.  
 THORNTON Charles, *Les plus hautes tours du monde*, n° 244, p. 48.  
 TOBIN William, *Léon Foucault*, n° 251, p. 80.  
 TROMPETTE Roland, *Le Gondwana*, n° 252, p. 64.

## V - W - Y

VALATX Jean-Louis, *Sommeils et insomnies*, n° 243, p. 80.  
 VERGE Marie-Pierre, *Son et musique au Paléolithique*, n° 250, p. 52.  
 VEYRET C., *Prévenir les inondations*, n° 243, p. 46.  
 von HIPPEL Frank, *Péril nucléaire*, n° 243, p. 38.  
 WANG B., *Le syndrome de Williams*, n° 244, p. 78.  
 WATANABE M., *Trafic de caïmans*, n° 247, p. 84.  
 WEISSMAN Paul, *Le nuage de Oort*, n° 253, p. 60.  
 WHITE Donald, *Le coma humain en question*, n° 253, p. 44.  
 WHITE DONALD, *Comment combattre les virus informatiques*, n° 243, p. 60.  
 WIEMAN Carl, *La condensation de Bose-Einstein*, n° 247, p. 92.  
 WILFERT C., *Les enfants et le VIH*, n° 251, p. 40.  
 WINNER Ellen, *Les surdoués*, n° 254, p. 128.  
 YONAS Gerold, *Fusion nucléaire et striction axiale*, n° 252, p. 78.

# POUR LA SCIENCE

8, rue Ferou 75278 PARIS CEDEX 06  
 Tél : 01-55-42-84-00  
 http://www.pourlascience.com

**POUR LA SCIENCE** est dirigée par Philippe Boulaenger, Nerve Nisi (rédacteur en chef), Françoise Ciliberti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lepercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Toccolet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction : Marie-Anne Leclercq, Hélène Dubois, assistée de Séverine Mervier et Christelle Dumais. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gaborit. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Frédéric Cadet, Françoise Collobert, Bettina Debù, Évelyne Host-Pitret, Marie-Thérèse Landousy, Marie-France Heuvelink, Pierre Nodot, Claude Olivier, Pierre Pfeiffer, Bernard Thierry.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of Editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Carol Ezzi, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leu, Wyley, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallach, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officer : Frances Newburg.

**PUBLICITÉ France**  
 Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Ferou 75278 Paris Cedex 06  
 Tél. : 01 55 42 84 28.  
 Téléc. : LIBEL 202978F.  
 Télécopieur : 01 43 25 18 29  
**Étranger** : Karen Dobson, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

**SERVICE ABONNEMENTS**  
 Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.  
**SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP**  
 Henri Gobelin  
**DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE**  
 Canada : Montréal - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada  
 Suisse : Serrières - 15, rue de la Gare 1211 Genève  
 15 Postale 3605 - CH-1211 Genève  
 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 adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Ferou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.  
 Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation ou de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific Americans» sont la propriété de Scientific American, Inc. Les livres édités par «Pour la Science» S.A.R.L.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 194A et 194B.